



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**TESIS**

**TRATAMIENTO DE BIOPELICULA EN TORRES DE  
ENFRIAMIENTO Y EQUIPOS INDUSTRIALES MEDIANTE  
OZONIFICACION**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**INGENIERO QUÍMICO**

**PRESENTA (N)**

**DIANA JESSICA NUÑEZ GARCIA**

**DANIEL VALDES HERNANDEZ**



**MÉXICO, D.F.**

**AÑO 2014**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

**JURADO ASIGNADO:**

**PRESIDENTE:** Profesor: JOSE ANTONIO ORTIZ RAMIREZ

**VOCAL:** Profesor: GERARDO REYES ALDASORO

**SECRETARIO:** Profesor: CARLOS ALVARES MACIEL

**1er. SUPLENTE:** Profesor: ZANELLI TREJO ALEJANDRO

**2° SUPLENTE:** Profesor: LUCILA CECILIA MENDEZ CHAVEZ

**SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:**

**FACULTAD DE QUIMICA**

**ASESOR DEL TEMA:**

**ORTIZ RAMIREZ JOSE ANTONIO**

**SUPERVISOR TÉCNICO:**

**LUCILA CECILIA MENDEZ CHAVEZ**

**SUSTENTANTE (S):**

**NUÑEZ GARCIA DIANA JESSICA**

**VALDES HERNANDEZ DANIEL**



**Tratamiento de Biopelículas en torres de enfriamiento y  
equipos industriales mediante Ozonificación.**



# Índice.

## **Capítulo 1.**

- 1.1 Generalidades
- 1.2 Descripción y tratamiento de Biopelícula o Biofilm
- 1.3 Ejemplos de sistemas de Ozonificación en Torres de Enfriamiento.

## **Capítulo 2.**

- 2.1 Sistemas de ozonificación
  - 2.1.1 Luz ultravioleta
  - 2.1.2 Descarga corona
- 2.2 Configuración de los electrodos
  - 2.2.1 Electrodos planos
  - 2.2.2 Electrodos tubulares
  - 2.2.3 Lámparas de descarga corona (LDC)
  - 2.2.4 Tubo ozonificador con lámpara interna
  - 2.2.5 Arreglo de tubos concéntricos

## **Capítulo 3.**

- Enfriamiento de un generador de ozono
  - 3.3.1 Potencia disipada y temperatura de operación de una celda generadora de ozono
  - 3.1.2 Cálculo del sistema de enfriamiento de una celda generadora de ozono
  - 3.1.3 Representación eléctrica de un generador de ozono
  - 3.4 Diseño teórico del prototipo de generador de ozono

## **Capítulo 4.**

- 4.1 Torres de enfriamiento
- 4.2 Tipos de torres de enfriamiento
  - 4.2.1 Torres de circulación natural
  - 4.2.2 Torres de tiro mecánico
  - 4.2.3 Tiempo de contacto
- 4.3. Teoría de una torre de enfriamiento
- 4.4 Operación de una torre de enfriamiento

## **Capítulo 5.**

- Análisis teórico de un sistema ozonificador aplicado a una torre de enfriamiento.
  - 5.1 Partes de una torre de enfriamiento
  - 5.2 Balance de Materia y Energía
  - 5.3 Dimensionamiento de una torre de enfriamiento
    - 5.3.1 Memoria de cálculo en el dimensionamiento de una torre de enfriamiento
  - 5.4 Memoria de cálculo para el dimensionamiento de un sistema ozonificador para una torre de enfriamiento
  - 5.5 Estimación de la aplicación de ozono a una torre de enfriamiento
    - 5.5.1 Estimación de la aplicación de ozono en la torre de enfriamiento usando aire como gas vehículo
  - 5.6 Instalación de un equipo ozonificador en una torre de enfriamiento
  - 5.7 Destrucción de ozono
  - 5.8 Sistema deshumidificador del generador de ozono
    - 5.8.1 Sílica gel como agente deshumidificante
  - 5.9 Protocolo Experimental del tratamiento de una torre de enfriamiento con un sistema ozonificador.

## **Capítulo 6**

- 6.1 Medición de ozono para la calibración del sistema ozonificador
  - 6.1.1 Metodología
  - 6.1.2. Calibración primaria
  - 6.1.3 Curva de calibración del instrumento
  - 6.1.4 Curva de calibración del generador

- 6.1.5 Cálculos
- 6.1.6 Procedimiento general de calibración de transferencia
- 6.1.7 Procedimiento general de chequeo Zero Span
- 6.1.8 Materiales para calibración
- 6.2 Determinación de ozono en el ambiente

## **Capítulo 7**

- 7.1 Normatividad para el tratamiento de agua.
  - 7.1.1 Aguas residuales.
  - 7.1.2 Carga contaminante.
  - 7.1.3 Condiciones particulares de descarga.
  - 7.1.4 Contaminantes Básicos.
  - 7.1.5 Contaminantes patógenos parasitarios
  - 7.1.6 Cuerpo receptor.
  - 7.1.7 Descarga
  - 7.1.8 Embalse artificial
  - 7.1.9 Embalse natural
  - 7.1.10 Límite máximo permisible
  - 7.1.11 Muestra compuesta
  - 7.1.12 Muestra simple.
  - 7.1.13 Parámetro
  - 7.1.14 Promedio Diario
  - 7.1.15 promedio mensual
  - 7.1.16 Tratamiento convencional
  - 7.1.17 Uso público urbano
- 7.2 Campo de aplicación
  - 7.2.1 Referencias
  - 7.2.2 Definiciones
  - 7.2.3 Principio y descripción del método de referencia
  - 7.2.4 Equipo de medición
  - 7.2.5 Celda de reacción
  - 7.2.6 Sistema electrónico de detección y procedimiento de la señal
  - 7.2.7 Calibración del equipo de medición
  - 7.2.7 Método de calibración.
  - 7.2.9 Componentes y características de los equipos de calibración
  - 7.2.10 Fotómetro de luz y ultravioleta
  - 7.2.11 Controladores de flujo de aire
  - 7.2.12 Generador de ozono
- 7.3 procedimiento general
  - 7.3.1 Método equivalente
  - 7.3.2 Calculo del reporte
  - 7.3.4 Vigilancia
  - 7.3.5 Sanciones

## **Capítulo 8.**

- 8.1 Reglas heurísticas para la aplicación de un sistema ozonificador a una torre de enfriamiento

## **Capítulo 9.**

- 9.1 Componente eléctrico del sistema ozonificador para la torre de enfriamiento.
  - 9.1.1 La figura de Lissajous en una celda generadora de ozono.
  - 9.2.1 Tiempo de duración de las Microdescargas.
- 9.2 Teoría de los componentes Básicos del circuito eléctrico electrónico.
  - 9.2.1 Duplicadores de voltaje, o rectificador doblador.

## **Capítulo 10.**

- 10.1 Estimación económica.
- 10.2 Insumos.
- 10.3 Análisis de costos Viabilidad Económica.

**Capítulo 11.**

11.1 Tiempo de operación para la ozonificación del tanque de abastecimiento de la torre de enfriamiento.

**Capítulo 12.**

Conclusiones



## OBJETIVOS.

- Partir de una ecuación teórica de diseño para encontrar el dimensionamiento y los materiales adecuado para la construcción de un sistema ozonificador.
- Estimar el perfil de una torre de enfriamiento para saber si es posible una instalación de un sistema ozonificador en una torre de enfriamiento.
- Analizar y calcular las variables de una torre enfriamiento para encontrar el volumen necesario de agua para realizar una aplicación de ozonificación.
- Estimar el perfil de agua para estimar el tiempo de aplicación.
- Mediante ecuaciones teóricas básicas de balance de materia y energía, estimar la cantidad de energía necesaria para formar un arco eléctrico de efecto corona.
- Ajustar el balance de materia y energía a la ecuación de diseño y estimar la potencia de operación del sistema ozonificador.
- Estimar las dimensiones óptimas del sistema de ozonificación.
- Estimar el sistema de ozonificación como medida preventiva para el mantenimiento de una torre de enfriamiento.
- Realizar una comparación económica y verificar si es rentable la instalación y operación de un sistema de ozonificación en equipos industriales.



## Generalidades.

### 1.1 Qué es el Ozono.

El ozono a temperatura ambiente es un gas oxidante, que tiene propiedades desinfectantes y bactericidas. El ozono es una variedad alotrópica del oxígeno, y su presencia en la tierra está en la atmósfera.

El ozono funciona como una capa protectora de la tierra en contra de los rayos ultravioleta evitando así los efectos perjudiciales a la vida terrestre. El ozono se produce de forma natural por la acción de los rayos ultravioleta solares, al ingresar éstos en la atmósfera, chocan con el oxígeno presente formando ozono, que es responsable de evitar que los rayos ultravioleta ingresen a la Tierra libremente.

El ozono es un oxidante mayor que el oxígeno molecular, y por ello puede ayudar al proceso de respiración celular.

Una de las principales cualidades del ozono, es el poder germicida, bactericida y desinfectante. El ozono, por su efecto oxidante destruye todo tipo de microorganismos así como hongos y virus.

La siguiente tabla muestra algunas propiedades físicas del ozono.

**Tabla 1.1 Propiedades del Ozono**

PROPIEDADES	OZONO
FORMULA MOLECULAR	O <sub>3</sub>
PESO MOLECULAR	48 g/mol
COLOR	AZUL PÚRPURA
SOLUBLE EN AGUA (17°C)	0.45 (L <sub>O3</sub> /L <sub>H2O</sub> )
DENSIDAD ( g/l )	2.144 g/l
OLOR.	Si
POTENCIAL ELECTROQUIMICO V.	2,07 Volts

Como todos los gases, la temperatura tiene efecto sobre la estabilidad del gas y especialmente tiene efecto sobre la vida media del ozono.

En la siguiente tabla se muestra el tiempo de vida del ozono en función de la temperatura.

**Tabla 1.2. Efecto de la temperatura en el aire y disuelto en agua.**

Temperatura C°	Vida Media En aire.	Temperatura C°	Vida Media Disuelta en agua
- 35	18 días	15	30- minutos
- 25	8 días	20	20- minutos
- 20	3 días	25	15- minutos
120	1,5 horas	30	12- minutos
250	1,5 segundos.	35	8- minutos

El ozono es un agente oxidante muy poderoso, en la siguiente tabla muestra una comparación con los diferentes agentes oxidantes.

**Tabla 1.3. Comparativo de agentes oxidantes.**

<b>OXIDANTES QUÍMICOS</b>		
AGENTE	Potencial de oxidación	de
<b>Ozono</b>	<b>2,07</b>	
Peróxido de Hidrógeno	1,77	
Permanganato	1,67	
Dióxido de Cloro	1,57	
Ácido Hipocloroso	1,49	
Gas Cloro	1,36	
Ácido Hipobromoso	1,33	
Oxígeno	1,23	
Bromuro	1,09	
Hipoclorito	0,94	
Yodo	0,54	

Es importante señalar; el ozono como cualquier compuesto gaseoso, en concentraciones elevadas de éste, en un determinado lugar o volumen donde hay residencia de personas, puede ser tóxico para el ser humano o los seres vivos; es por esto que los países han trabajado para establecer los límites máximos permisibles de exposición de ozono para el ser humano y seres vivos. También se han establecidos las concentraciones de ozono permisibles para lograr la desinfección y confort en el aire, logrando una desinfección eficiente.

El congreso del Instituto Americano de Ingenieros Químicos en marzo de 1975 definieron las bases de la ozonización ambiental y a partir de este congreso los distintos organismos mundiales han aprobado los diferentes límites de exposición que son detallados en la siguiente tabla.

**Tabla 1.4. Límites de Exposición permisibles de ozono ambiental.**

<b>Organización</b>	<b>Concentración ppm / O<sub>3</sub>/m<sup>3</sup> aire</b>
<b>OMS: Organización Mundial de la salud.</b>	<b>0.1 ppm- 0.2 O<sub>3</sub>/m<sup>3</sup> aire</b>
<b>FDA: Food and Drug Administration</b>	<b>0.05 ppm- 0.1 O<sub>3</sub>/m<sup>3</sup> aire</b>
<b>OSHA: Occupational Safety and Health</b>	<b>0.1 ppm – 0.2 O<sub>3</sub>/m<sup>3</sup> aire</b>
<b>EPA: Environmental Protection Agency</b>	<b>0.08 ppm – 0.16 O<sub>3</sub>/m<sup>3</sup> aire</b>

El parámetro utilizado mundialmente para la exposición de ozono en el aire es el proporcionado por la OMS.

El uso de ozono por debajo de estas concentraciones permisibles es de una amplia utilidad para la desinfección de sistemas de aireación, SIEMENS empezó la fabricación de generadores de ozono a escala industrial pero el uso ha sido limitado, sin embargo, **la acción bactericida de ozono puede resultar altamente eficiente para la esterilización de sistemas industriales que utilicen agua o aire.**

El ozono también tiene un efecto desodorizante, no es un simple camuflaje de olor, si no que se trata de una destrucción química de agentes patógenos. A pesar de que el uso del ozono en la industria ha tenido un desarrollo lento, puede ser aplicado de forma eficiente en la eliminación de materia orgánica en equipos industriales.

El ozono es capaz de destruir con gran eficiencia Estafilococos, Colibacilos Legionellas y demás agentes patógenos. El ozono se ha utilizado moderadamente para la desinfección de baños públicos, piscinas de natación cubiertas, almacenes frigoríficos, refrigeradores de mataderos en la industria alimentaria de embutidos, el ozono impide la formación de moho y hongos. En estas industrias es de vital trascendencia evitar la proliferación de agentes patógenos.

El uso del ozono en los equipos industriales tiene un potencial importante. El ozono posee la capacidad de eliminar un problema que aqueja a los equipos industriales que trabajan con agua, aire o algún otro medio óptimo para la proliferación de bacterias. Los equipos tales como intercambiadores de calor, torres de enfriamiento, torres de absorción, chillers, equipos de aire acondicionado e incluso reactores químicos, en los que se utiliza agua, son objeto de formación y proliferación de una película de bacterias en el interior. Esta película formada por bacterias se llama Biofilm o Biopelícula, éstas alteran la eficiencia y estabilidad en la operación de los equipos industriales.

## **1.2 Descripción y tratamiento de Biofilm o Biopelícula.**

El Biofilm es una película causada por microorganismos como bacterias, que excretan una sustancia polimérica formando un gel. Esta biopelícula genera diferentes tipos de problemas, ya sea de tipo industrial, natural o médico.

Los equipos industriales que utilizan agua ya sea para tratamiento térmico o para proceso, tienen problemas ocasionados por el arrastre de bacterias contenidas en el líquido. Estos problemas ocasionan una deficiencia en la operación de dichos equipos industriales, por ejemplo: en las torres de enfriamiento, la aparición de biopelícula puede alterar el intercambio de calor entre el agua y el aire, al alterarse la superficie de contacto en las cámaras internas de la torre de enfriamiento. Otro problema que suele ser ocasionado por las bacterias es la corrosión de los equipos industriales, en las tuberías o líneas de flujo en las plantas de operación industrial. Estos problemas pueden generar gastos extra en las operaciones de la planta debido al costo del mantenimiento y limpieza de los equipos.

Las empresas que deciden tratar el agua para su utilización industrial, en su búsqueda, diseñan técnicas para desinfectar y generalmente encuentran métodos químicos; estos métodos incluyen una inversión que puede resultar costosa; esto es debido a que estos procesos requieren una planta de tratamiento de agua alterna a los equipos principales en el proceso de las plantas. También estos equipos de tratamiento de agua de proceso o tratamiento térmico pueden generar sustancias residuales que pueden ser contraproducentes para el equipo industrial, además las sustancias residuales pueden requerir confinamiento o tratamiento especial.

Otro método que es el más utilizado, es la agregación de cloro gaseoso al agua de proceso. Este método es muy usado pero tiene sus inconvenientes; el cloro queda disuelto en el agua, éste puede reaccionar con compuestos presentes en los equipos industriales o con partes integradas a los equipos. La reactividad del cloro puede seguir un mecanismo de halogenación por ejemplo, si hay presencia de grupos aromáticos en los procesos, obteniendo un subproducto que posteriormente se debería separar. Hay que señalar que son muy pocos los casos en los que este escenario se pueda dar, pero por lo general el uso de agua en plantas industriales es para fines de intercambio de calor, con el cual no existe un compuesto reactivo con el cloro, sin embargo no queda exento el cloro de ocasionar problemas debido a su naturaleza residual.

Así también el cloro, no es suficientemente eficiente para la mayoría de las bacterias causantes de la biopelícula, como la *Legionella*, que es principalmente formadora de biopelícula.

El género de la *Legionella* pertenece a la familia Legionellaceae y está formada por al menos 42 especies.

Las *Legionellas* son bacilos gramnegativos, no esporulantes que requieren L-cisteína para su crecimiento y aislamiento primario. Son bacterias heterótrofas, se encuentran en una gran variedad de medios acuáticos y pueden proliferar a temperaturas superiores a 25 ° C.<sup>1</sup>

El cloro se utiliza comúnmente en el tratamiento de la *Legionella*; es dosificado en forma de gas mediante el compuesto dióxido de cloro pero como se dijo anteriormente es ineficiente.

Otro agente patógeno en la formación de Biopelícula es la *Pseudomona*, esta bacteria es muy estudiada por las empresas y por instituciones que demuestran

---

<sup>1</sup> [http://www.bvsde.paho.org/cd-gdwq/docs\\_microbiologicos/Bacterias%20PDF/Legionella.pdf](http://www.bvsde.paho.org/cd-gdwq/docs_microbiologicos/Bacterias%20PDF/Legionella.pdf)

un gran interés por sus efectos tanto positivos como negativos sobre los distintos sistemas industriales naturales, industriales y médicos.

La ASTM (American Society for Testing Materials) ha generado una serie de normas para el tratamiento y cultivo de *Pseudomona* a través de reactores de flujo por goteo.<sup>2</sup>

Esto se debe a que el correcto tratamiento de las biopelícula puede beneficiar a la industria química y de materiales.

La biopelícula actualmente está afectando a la industria en sus diferentes campos. La industria alimenticia con problema de biopelícula puede contaminar lotes enteros de producto alimenticio. Este es un problema que la industria alimenticia debe atacar y controlar. Si bien es cierto que no todas las biopelículas son perjudiciales, es trascendental atacar aquellas biopelículas que tienen presentes bacterias como la *Legionella* o la *Pseudomona*.

La gran variedad de bacterias como las antes mencionadas, así como *Enterobacteriaceae* (contaminantes fecales), *Staphylococcus*, son causantes de enfermedades que afectan al ser humano<sup>3</sup>. Es de vital importancia controlar o erradicar cepas de bacterias presentes en las biopelículas que se almacenan en componentes de las maquinarias industriales.

Los mecanismos de desinfección son muy diversos, así mismo se pueden encontrar en el mercado varios tipos de modelos de mecanismos desinfectantes. Están los que utilizan agentes químicos, hasta los que utilizan el ultrasonido o métodos mecánicos como filtración y lavado a presión. Todos tienen ventajas y desventajas.

El sistema propuesto en esta tesis, debe cumplir con disminuir y/o eliminar a estos agentes patógenos, este es el tratamiento de **ozonificación**. Así mismo se realizará una comparación del sistema de ozonificación con los tratamientos químicos existentes, aplicados en los diferentes equipos industriales.

La ozonificación es un método eficaz en el tratamiento y desinfección de sistemas donde existe la presencia de microorganismos adheridos a las superficies de los equipos industriales.

### **1.3 Ejemplos de sistemas de Ozonificación en Torres de Enfriamiento.**

Las instalaciones donde se ha ocupado la aplicación de los sistemas de tratamiento en base en ozono son los siguientes:

- Instalación: Edificio de montaje de vehículos del centro espacial Kennedy de la NASA (KSC), Florida (1994). Se utilizó para las torres de refrigeración que tienen una capacidad de 8750 kW/torre, el sistema ozonificador tiene una producción de 600 g/h. Las cuatro torres poseen una capacidad total de 10 000 toneladas, y contienen un total de 553000 L/día. Esta instalación muestra que el ozono

---

<sup>2</sup> [http://www.astm.org/SNEWS/SPANISH/SPMA09/e3515\\_spma09.html](http://www.astm.org/SNEWS/SPANISH/SPMA09/e3515_spma09.html)

<sup>3</sup> <http://www.consumer.es/seguridad-alimentaria/ciencia-y-tecnologia/2004/06/02/12636.php>

puede ser tomado como para el tratamiento de las torres de enfriamiento.

- Instalación: Lockheed Martin electronics and Missiles Ocala Operation, Ocala florida (1994). En esta instalación se tienen 2 torres de enfriamiento con una capacidad de 2.5 m<sup>3</sup> / torre a 3.0 m<sup>3</sup> / torre. La capacidad del sistema generador de ozono es de 30 g /h. Estas torres de enfriamiento cuenta con torres de enfriamiento a contracorriente de tipo Marley convencionales con una capacidad de funcionamiento de 2250 L por cada una de las torres. Esta planta en especial no contaba con conexión a una planta de tratamiento de aguas residuales de obras públicas, por lo que para eliminar el agua de purga había que transportar el agua fuera de la planta general. Como esta instalación no estaba conectada a una fuente de agua exterior, la fuente de agua de relleno eran aguas residuales tratadas recicladas del proceso de fabricación. Esta agua tenía un contenido orgánico total (COT) superior a 1500 mg/L. Esta elevada concentración de COT se traducía en una gran necesidad de sustancias químicas para tratar el agua de las torres, y esto se veía reflejado en altísimos costos de tratamiento. La concentración de CaCO<sub>3</sub> en el agua era de 50 mg/L (relativamente blanda) y contenía sulfato ferroso del proceso de fabricación. El escaso sistema de control se tradujo en uso excesivo de productos químicos, trayendo como consecuencia la formación de incrustaciones y frecuentes requerimientos de limpieza acida. Los condensadores del enfriador se limpiaban al menos 2 veces durante los meses de verano, debido al desarrollo de una biopelícula. Las limpiezas se realizaban con ácidos de múltiples productos químicos de gas cloro, y otros biocidas e inhibidores de corrosión. Durante la limpieza en marcha inicial del sistema con ozono, se observó una cantidad importante de partículas en suspensión. Estas partículas provenían de la resuspension de incrustaciones minerales en el agua, (fenómeno que fue esperado). El recuento bacteriano de Legionella se redujo en tres órdenes de magnitud de un millón a mil unidades formadoras de colonias (UFC) y el residuo de purga se redujo en un 90 %. El operador informo un año después de la instalación con ozono que no se requirió el añadido de sustancias químicas a la torre de refrigeración.
- Instalación de fabricación situada en Almería, La capacidad de las torres de refrigeración son de 4500 mg/L (2003) la capacidad del sistema generador de ozono es de 4 g/h. El equipo se mantuvo funcionando durante las 24 horas del día, con el fin de atacar las incrustaciones aparecidas tras la última limpieza tres meses antes. A las dos semanas después las incrustaciones empezaron a desintegrarse y caer en el fondo de la balsa. Fue necesario purgar para limpiar la balsa físicamente tras lo cual las purgas han sido mínimas, del orden de un 10 % de las iniciales cuando las torres trabajaban sin ozono (en su mayor parte carbonatos en la balsa que debieron ser aspirados periódicamente).



### 2.1 Sistemas de Ozonificación.

Para que se pueda producir ozono en grado industrial, existen 2 métodos:

- Lámparas de luz ultravioleta.
- Descarga corona o de alta tensión.

#### 2.1.1 Luz Ultravioleta.

Para poder generar ozono por medio de radiación ultravioleta, se debe de irradiar aire u oxígeno con luz ultravioleta proveniente de tubos o lámparas que producen este tipo de radiación. La luz ultravioleta es una onda electromagnética que posee una longitud de onda de 10 nanómetros, con una frecuencia de  $10^{16}$  Hertz (Hz). Esta frecuencia y longitud de onda es muy cercana a la radiación visible. La radiación ultravioleta irradia un espacio determinado por donde se hace circular el gas para convertir el oxígeno a ozono. Este tipo de radiación es peligrosa debido a que causa quemaduras en la piel así como daños oculares. Este tipo de lámparas ultravioleta suelen quemarse con el uso constante, además de que consumen mucha energía. Este tipo de tecnología para la producción de ozono, por consiguiente, está cayendo en desuso en los sistemas de producción de ozono.

#### 2.1.2 Descarga Corona.

Este tipo de generación de ozono es el más utilizado por los equipos especializados, estos poseen como elementos principales 2 electrodos, sobre los cuales se les suministra una diferencia de potencial elevada, éste dispositivo posee un dieléctrico (aislante), que se interpone entre los electrodos. El espacio que hay entre los electrodos y el dieléctrico se conoce como espacio de descarga y regularmente tiene una dimensión de 2 milímetros de separación por lo general, aunque ésta separación puede variar según la ingeniería aplicada al dieléctrico.

La descarga corona es entonces: la descarga eléctrica que se produce por la diferencia de potencial que existe entre los electrodos, y que a su vez esta descarga “atraviesa” el dieléctrico ocasionando una chispa.

Para que esta descarga se produzca, se necesita una diferencia de potencial de al menos 5000 volts de corriente alterna, esto producirá un arco voltaico y detonaciones intermitentes con una frecuencia de 300 Hertz. Este consumo energético puede resultar elevado e incluso quemar el transformador que provee el voltaje necesario. Para poder evitar este consumo de energía existen dispositivos eléctricos y electrónicos que incrementan el voltaje, así de esta forma sólo se consume una diferencia de potencial menor.

Al colocar un cristal dieléctrico entre los dos electrodos ocurre lo siguiente: siguiendo el sentido de la corriente, se desprenderán electrones de uno de los electrodos al cristal, de este cristal se desprenderán electrones al otro electrodo situado del otro lado. Como el cristal no permite que los electrones pasen libremente a través de él, sólo los electrones superficiales tendrán el movimiento necesario para pasar al electrodo interno, Esto sólo ocurre una vez

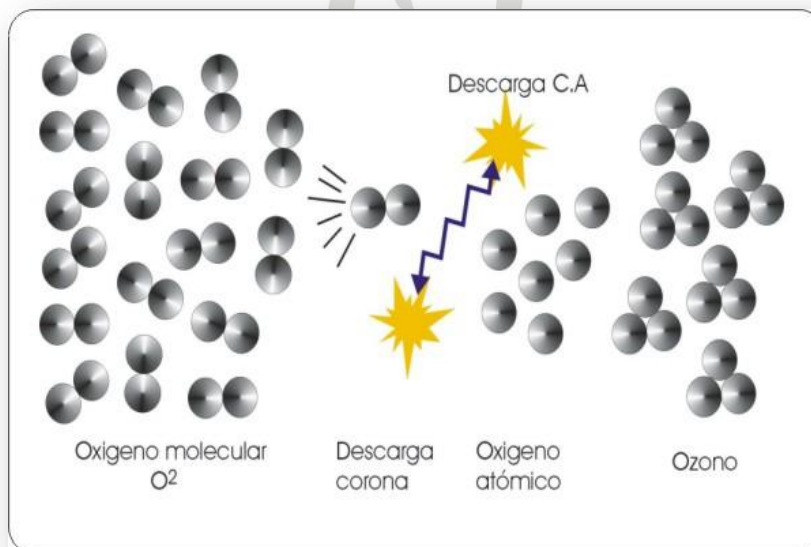
sí la descarga se produjera con corriente continua, es decir, inmediatamente al aplicar la corriente continua ocurriría este fenómeno y no captaríamos nada; pero al ser aplicada la diferencia de potencial con corriente alterna, el fenómeno descrito anteriormente sucede cada vez que cambia el sentido de la corriente, esto se da 60 veces por segundo mediante un transformador ordinario conectado a la red pública, que posee una frecuencia de 60 Hertz.

Cuando se produce una descarga corona en el sistema de ozonificación, se puede visualizar una luz tenue de color violeta o purpurea, además se oirá una especie de zumbido parecido al que se escucha al soldar con arco eléctrico; señal indicativa de que se está produciendo una descarga corona.

El aire que existe entre el espacio de descarga, se ioniza y permite que los electrones vayan y vengan a través de él, no hay un auténtico paso o flujo de electrones, sino un vaivén constante, por ésta razón el consumo total será muy reducido. Sin embargo el consumo energético principal de la descarga corona es debida a la producción y pérdida de calor. Esta ionización del aire rompe las moléculas de oxígeno, los átomos individuales libres de oxígeno se unen posteriormente para formar una molécula de ozono, que consiste en triadas de átomos de oxígeno.

El proceso de la generación de ozono se muestra en la siguiente figura.

**Figura 2.1. Formación de Ozono a partir de descarga Corona**



La configuración que hay entre los 2 electrodos y el dieléctrico responde a la configuración de un capacitor eléctrico. El rendimiento del par de electrodos para poder producir la descarga corona está en función de la superficie de los electrodos, de la diferencia de potencial, de la frecuencia de la corriente y la producción de ozono también está en función del caudal del gas inyectado en el espacio de descarga, así como del tipo de gas; difiere si es oxígeno puro o aire.



## 2.2 Configuración de los electrodos.

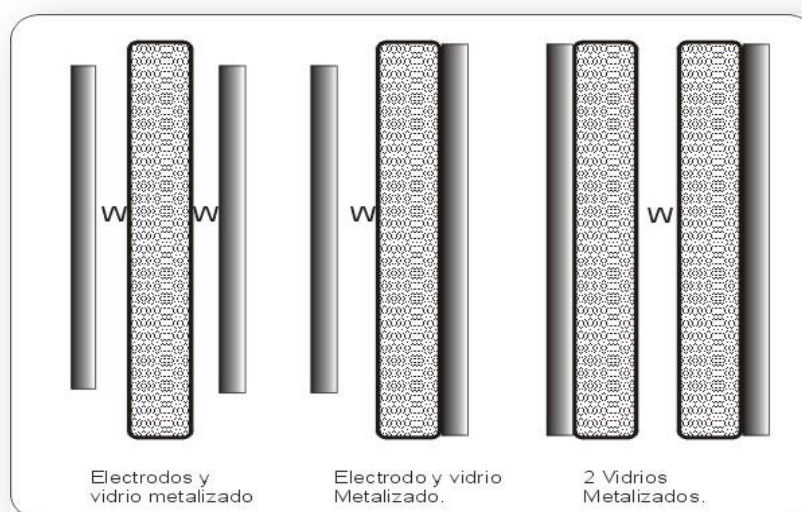
Existen diferentes configuraciones de electrodos tanto comerciales como fabricados de forma empírica, se analizaran estas formas de posición de electrodos.

### 2.2.1 Electrodo Planos.

Puede haber varios tipos de configuración de sistemas de ozonificación, varían en las posiciones de los electrodos así como en la posición del vidrio dieléctrico. Cada electrodo se conecta a un polo del transformador. La descarga corona se produce en el espacio de descarga **W**, recordemos que este espacio usualmente es de 2 milímetros. El grosor del dieléctrico no influye en el rendimiento de descarga, pero **lo importante en la producción de ozono es el espacio de descarga y el material del dieléctrico.**

La siguiente figura muestra las posiciones relativas de los electrodos.

**Figura 2.2. Posiciones de electrodos para un sistema ozonificador.**



El acero inoxidable es el material utilizado para la fabricación de electrodos, este material puede remplazar a electrodos de oro y platino que son mucho más costosos. La utilización de acero inoxidable es la razón por la cual se ha podido retomar esta tecnología en la fabricación de generadores de ozono, ya que antiguamente se utilizaban otro tipo de electrodos que al estar en contacto con el ozono se corroían. Los electrodos hechos con otros materiales funcionarían óptimamente; pero el inconveniente radica en que el ozono producido, entraría en contacto con los electrodos causando corrosión, debido a que el ozono es un oxidante muy potente, esto reduce el tiempo de vida del sistema ozonificador.

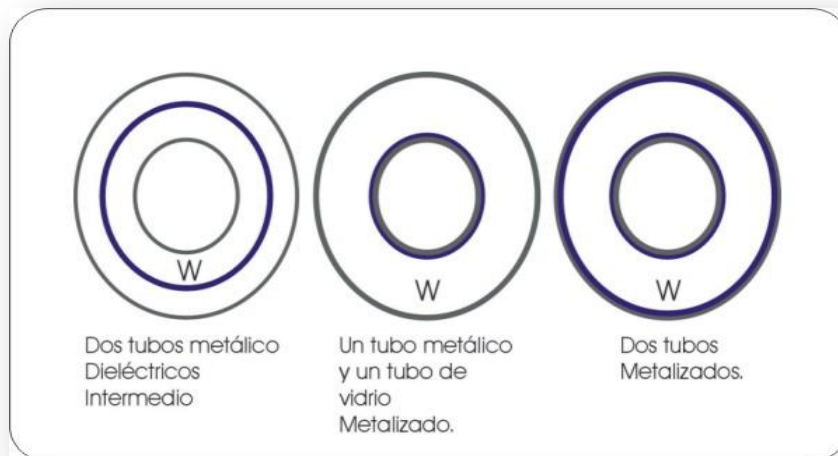
El dieléctrico puede ser de vidrio, el material más apropiado es el vidrio de borosilicato cuarzo y cerámica. En el vidrio se puede metalizar por una de sus caras, esta capa de metal tiene la función de sustituir a uno de los electrodos, así mismo se pueden poner dos vidrios metalizados; como las capas de metal están unidas a los vidrios, la descarga comienza del lado del vidrio que no tiene la capa de metal; este arreglo de electrodos tiene la ventaja que se pueden

utilizar dos diferentes metales que en principio sean incompatibles, de esta forma el ozono no tocaría el metal y no se produciría la corrosión.

### 2.2.2 Electrodo tubulares.

La siguiente configuración de electrodos muestra la forma más común de colocar el sistema generador de ozono. Esta sistema está realizado en un arreglo de tubos concéntricos; esté tipo de arreglo comercialmente se puede nombrar como **LAMPARA DE OZONIFICACION**. La siguiente figura muestra la configuración de tubos concéntricos.

**Figura 2.3. Arreglo de tubos ozonificadores tubos concéntricos.**



Para generar ozono se debe de forzar una corriente de aire u oxígeno a que fluya en el interior del espacio de descarga **W**. Solo el aire que pasa dentro del espacio de descarga resultara ozonificado. Esto resulta más sencillo si los electrodos y dieléctricos son tubos concéntricos. Cuando ambos electrodos son tubos metálicos, el espacio de descarga es doble, uno a cada lado del dieléctrico.

Cuando el aire entra en el espacio de descarga, la producción de ozono depende del movimiento caótico aleatorio de las moléculas de oxígeno presentes en el aire. Sin embargo, para tener una producción continua de ozono se necesita forzar un caudal continuo de aire u oxígeno a que circule por el espacio de descarga.

### 2.2.3 Lámparas de Descarga Corona. (LDC).

Existen lámparas comerciales de descarga corona, este tipo de válvulas no emiten luz alguna, no se debe de confundir con tubos de luz ultravioleta, aunque las dos producen ozono. La siguiente figura muestra como está fabricada esta válvula para la venta comercial.

**Figura 2.4. Tubo Ozonizador.**



Este tipo de ampollas o válvulas están rellenas de gases nobles los cuales son conductores de electricidad. La lámpara es de vidrio de borosilicato, y tienen un electrodo central, el cual puede ser de un material diferente al acero inoxidable, esto es debido a que los gases no atacan al electrodo. El electrodo está conectado a un casquillo que cierra la ampolla, por la cual se recibe la corriente. Éste casquillo sí es de acero inoxidable; este arreglo sin embargo dificulta que el electrodo sea de una sola pieza.

Esta lámpara de ozono usa el electrodo exterior en forma de rejilla colocada alrededor de la ampolla, ésta instalación típica, está presente en pequeños generadores de ozono que no usan compresores de aire para forzar el caudal. El ozono se produce del contacto directo del aire con la ampolla y la rejilla externa. Para forzar la difusión de ozono, en estos pequeños generadores se suele colocar un pequeño ventilador cerca de la ampolla. La ventaja radica en que salvo que se rompa la ampolla de vidrio, el electrodo central tiene gran durabilidad debido a que los gases que contiene el interior del recipiente no son corrosivos. La rejilla externa si está expuesta al aire y el ozono pero sin embargo la rejilla externa es de fácil mantenimiento.

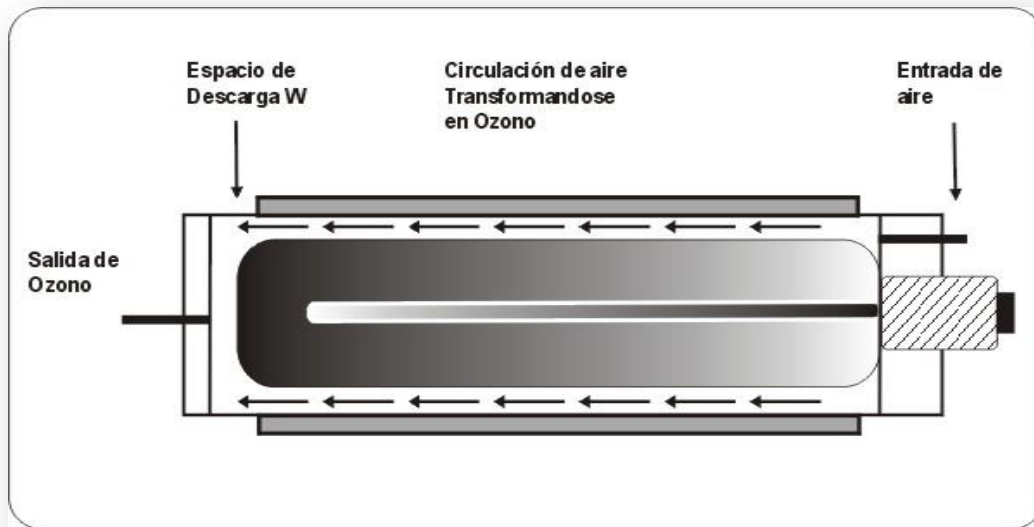
Las variantes de este tipo de lámparas ozonizadoras son las siguientes:

- El electrodo interior es una rejilla o una lámina adaptada a la pared interna del tubo de vidrio y conectada al casquillo.
- El electrodo interior es una película metalizada sobre la superficie interior de la ampolla y tiene un contacto de tipo escobilla con el casquillo.

Para estos tipos de casos el relleno de gas no tiene que ser conductor de electricidad, sólo un simple vacío servirá para mantener el electrodo intacto.

## 2.2.4 Tubo ozonificador con lámpara interna.

Figura 2.5 ozonificador con lámpara.



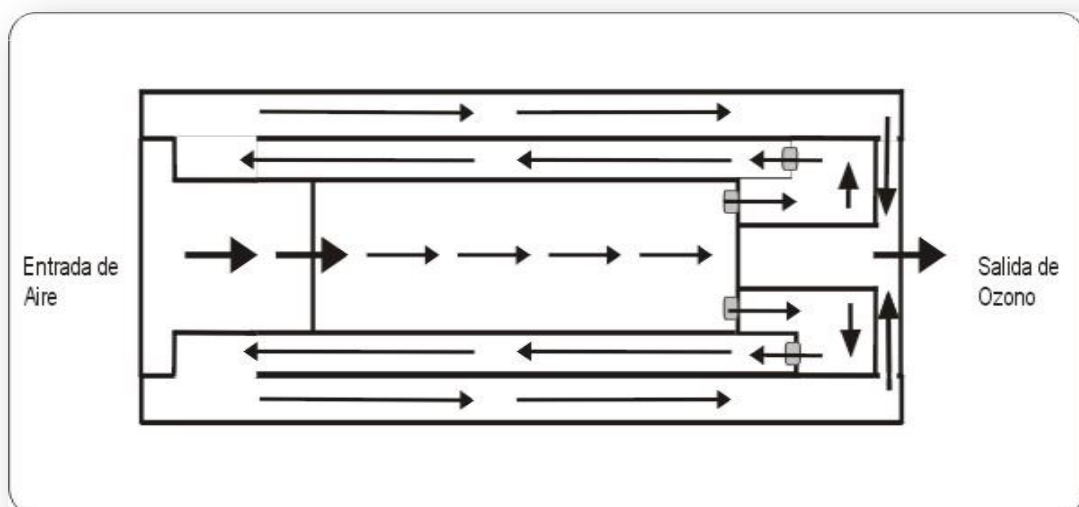
Este sistema es un tubo equipado con una lámpara ozonificadora interna. Se necesitan de dos tapones y de algunos sellos para lograr este sistema para que no haya fugas de ozono o de aire.

El material de estos tapones puede ser de teflón, cerámica, vidrio o PVC. La principal ventaja de este sistema es que el volumen que se inyecta en el tubo ozonificador está obligado a pasar por el espacio de descarga, logrando así el control de la conversión del oxígeno en ozono.

## 2.2.5 Arreglo de tubos concéntricos de Ozonificación.

El siguiente arreglo se muestra un diseño más complejo de tubos concéntricos de ozonificación.

Figura 2.6. Ozonificador tubos concéntricos,



Este tipo de arreglos tienen la característica de tener tapones torneados en teflón, y son una sucesión de 2 tubos cilíndricos interconectados a una misma pieza. Es necesario realizar estrías en los sitios oportunos para poder orientar y canalizar el aire inyectado, que posteriormente se convertirá en ozono. El oxígeno del aire inyectado por un costado es convertido inicialmente por un primer sistema de tubos ozonificadores, posteriormente pasa por unas estrías hacia un segundo sistema de tubos ozonificadores convirtiendo el oxígeno remanente que no había sido convertido en ozono en el primer módulo. Al final del tubo, el aire ya ha pasado por dos espacios de descarga, elevando la conversión de oxígeno a ozono. La pareja de cilindros iguales, llevan alternativamente estrías de fuga, o juntas tóricas hechas en material de cerámica o vidrio.<sup>4</sup>



---

<sup>4</sup> <http://www.eureka.ya.com/ozonogratis/Contenidos/Spanish/Pages/EIOzono.html>

**BASES DE DISEÑO DE UN OZONIZADOR.**

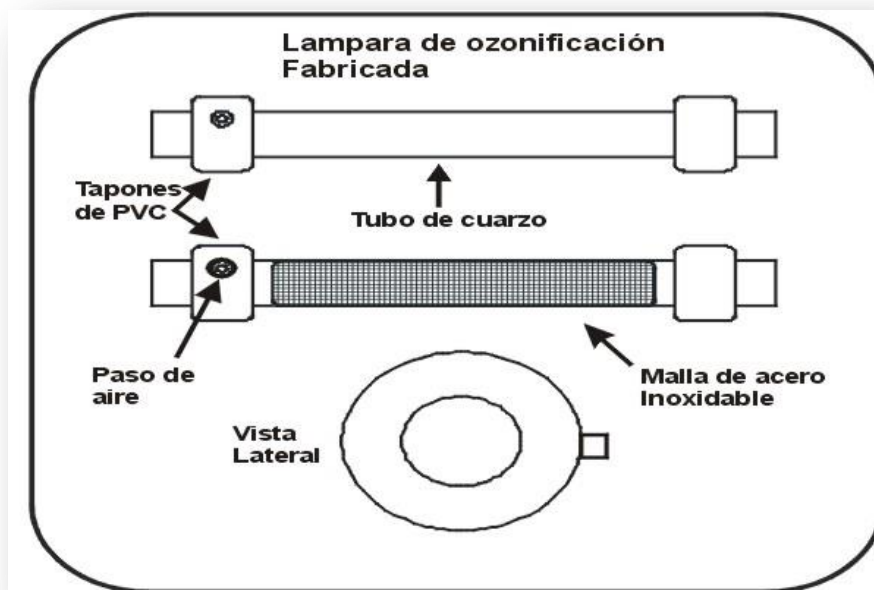
**3.1 Generador de Ozono por efecto Corona Propuesto.**

Existen diversos procedimientos para producir ozono, elegimos efecto corona, también llamado arco eléctrico por su alta eficiencia (mayor grado de conversión del oxígeno ambiental en ozono) con respecto a otros. Nuestro propósito es utilizar el ozono para eliminar bio-película en torres de enfriamiento de agua y en otros equipos industriales.

A continuación se describe un diseño propuesto para la construcción de un ozonificador:

Un equipo ozonificador evidentemente requiere una cámara de conversión de oxígeno ambiental en ozono.

**Figura 3.1. Propuesta de sistema ozonificador.**



La cámara generadora de ozono constará de dos tubos concéntricos, el interno de acero inoxidable y el externo de vidrio de cuarzo o de vidrio de borosilicato; mismos que formarán el electrodo que mediante una descarga eléctrica proporcionará la energía suficiente para realizar la conversión de oxígeno ambiental en ozono.

Se deberá utilizar como material de construcción, dos tapones de PVC con base plana, se utilizará malla de acero inoxidable de 90 hilos por pulgada, alambre de acero inoxidable N° 18 y resina epóxica.

Herramientas: Brocas, paletas, pinzas, lijas, tornero milimétrico, taladro fresadora todos especiales para acero inoxidable y alcohol isopropílico para limpiar las partes.

El protocolo de fabricación propuesto para un sistema generador de Ozono.

El ensamblado de la cámara propuesta es la siguiente:

- Se debe de perforar los tapones de PVC con una broca tipo fresadora, del tamaño exacto del diámetro del tubo de acero inoxidable, es muy importante centrar con un ajuste milimétrico, la mínima irregularidad o desviación no permitirá un funcionamiento adecuado del equipo, se debe tener en cuenta que se fabrica un sistema capacitor o condensador eléctrico. La otra perforación se realiza con una broca nueva de  $\frac{1}{4}$  en el costado superior del tapón, esta perforación es para la entrada de aire en el espacio de descarga.
- Se debe de limpiar perfectamente con el taladro fresadora y su aditamento con lija cilíndrica especial para acero inoxidable.
- El tubo de acero inoxidable requiere una perforación aproximada de  $\frac{3}{32}$  para fijar el transformador que alimenta aproximadamente unos 5000 volts, esta fuente de potencial será construida como parte del circuito eléctrico- electrónico.
- Tomar el tubo de acero y el tubo de cuarzo previamente lijados y lavados con alcohol isopropílico en el interior y exterior de los tubos. Perfectamente secos y libres de polvo o suciedad.
- Inmediatamente ensamblar colocando el tubo de acero dentro del orificio del tubo de cuarzo, la diferencia de diámetros de estos nos permite obtener el espacio de descarga para generar ozono. El tubo de acero inoxidable en ningún punto debe tocar al tubo de cuarzo.
- Pegar los dos tapones de PVC al tubo de cuarzo con resina epóxica, uno de cada lado y se debe dejar secar aproximadamente 4 horas o el tiempo que indique el proveedor de la resina.
- Posteriormente se debe pegar, conexiones de acero inoxidable en forma de tubo, de  $\frac{1}{4}$  al tapón de PVC que previamente se perforó en el costado superior. Dejar secar aproximadamente 4 horas esta es la entrada o salida de aire-Ozono.
- Se procede a cubrir el tubo de cuarzo con la malla de acero inoxidable de 90 hilos por pulgada cuadrada dejando en cada lado del tubo, por lo menos 5 centímetros sin cubrir. Se fija con el hilo de acero inoxidable de N° 18
- En el centro del tubo se hace una hebra del hilo de acero inoxidable, que posteriormente nos permitirá conectar el transformador.

El tamaño del electrodo o espacio de descarga, el tiempo de reacción, frecuencia de entrada, voltaje, flujo del gas de alimentación y el tipo de gas de alimentación son nuestras principales variables de control, permiten estimar la concentración máxima de ozono que alcanzará el ozonificador, es decir, su capacidad. Esto será calculado considerando la producción de ozono que se requiera, en cada caso particular. En la sección 3.2 se analizan las ecuaciones de diseño para poder realizar la ingeniería en la producción de ozono y el diseño del ozonificador.



Evidentemente, el equipo requiere una alimentación eléctrica, esta cámara consume alrededor de 3000 miliamperes. Y este dispositivo será controlado por medio del transformador.

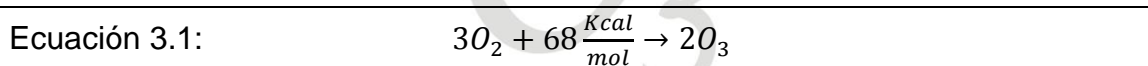
### ✓ TRANSFORMADOR

Para ello se requiere construir un circuito de alto voltaje. Este dispositivo es un sistema de ingeniería eléctrica que requiere un alto diseño en cuanto a un arreglo especial de capacitores, diodos y resistencias. De este diseño se hablara más adelante (capitulo 5).

El diseño del sistema ozonificador será soportado en los siguientes principios teóricos:

### 3.2 Base teórica de Diseño de un generador de Ozono.

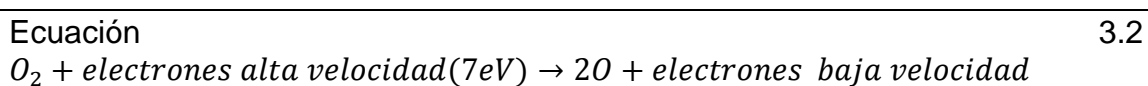
El ozono requiere de moléculas de oxígeno de enlaces estables, estas moléculas deben de ser divididas en dos átomos inestables de oxígeno. Estos átomos de oxígeno reaccionan inmediatamente con otra molécula de oxígeno para formar ozono. La constante de reactividad es  $k = 1.9 \times 10^{-11} \text{s}^{-1}$  (reacción 1°orden). El método para producir ozono en cantidades altas de concentraciones o en cantidades elevadas controladas es mediante la descarga corona. Esta descarga corona es una descarga silenciosa en la que es usada para acelerar los electrones y proporcionar suficiente energía cinética, para dividir por impacto, una molécula de oxígeno en dos átomos individuales. La termodinámica de esta reacción de la síntesis del ozono es la siguiente.



**Se tiene que la formación de 1 Kg de ozono requiere 3.02 MJ (721 Kcal/mol).** Un generador de ozono típico, que use la descarga corona, requiere de 16.5 KW – H para poder producir 1 Kg de ozono con una concentración de 1% peso a partir del aire. Por lo tanto sólo el 5 % de la energía eléctrica aplicada al generador es consumida para la producción de ozono. La porción más grande de energía aparece en forma de calor y una cantidad insignificante es liberada en forma de energía luminosa.

La descarga corona produce un color púrpura si proviene de aire seco, habiendo un espacio de descarga de 2 mm aproximadamente, si el espacio de descarga es más ancho y tiene cierta cantidad de humedad las descargas serán más luminiscentes. Si el espacio de descarga es inyectado con oxígeno, el efecto de descarga corona es de color blanco.

Cuando un electrón es acelerado a altas velocidades y contiene de 6 a 7 eV (**electrón volts**) ocurre una interacción entre las moléculas de oxígeno y el electrón, la cual da lugar a dos átomos oxígeno por corona-impacto del electrón, depende de la distribución de la energía en la descarga siendo:





Esta relación es usualmente tratada como una función de la fuerza del campo eléctrico por unidad de densidad del gas.

La descarga corona está integrada por numerosas pulsaciones de descarga, las cuales, cada pulsación dura aproximadamente 10 nanosegundos. Los átomos activos reaccionan rápidamente con las moléculas de oxígeno, de acuerdo a la siguiente ecuación.

Ecuación 3.3	$K = 1.06 \times 10^{-34} e^{\frac{510}{T}} \left[ \frac{cm}{s} \right]$
T = K, para formar ozono.	

La formación de ozono a través de descargas eléctricas en un gas procesado, está basado en las descargas corona homogéneas en el aire u oxígeno, es decir el numero de descargas con la misma cantidad energía por cada descarga. Hay numerosas microdescargas distribuidas, estas generan ozono, el cual aparece en cada microdescarga que dura aproximadamente algunos nanosegundos. La relación de tiempo de microdescarga es entre 2.5 y 3 veces más en el aire, que en el oxígeno (Kogelschatz en 1987). La densidad de corriente puede variar entre 100 y 1000 A / cm<sup>2</sup>.

### 3.3 Enfriamiento del generador de ozonificador.

La forma más eficiente de enfriar un sistema de generación de ozono es que sea por ambos lados del espacio de descarga, esto permite desplazar el calor, del lado de alto voltaje y del lado de tierra. Sin embargo, en el caso de accidente o ruptura una lámpara o de ruptura solo de un dieléctrico, el liquido para enfriar (agua como ejemplo) puede entrar en el espacio de descarga y esto puede ocasionar un corto circuito en todo el sistema. Debido a esto es indispensable enfriar solo el lado de tierra, este tipo de diseño de enfriamiento es el más seguro, previniendo posibles fallas como la antes mencionada. La distancia espacial que hay en el espacio de descarga es importante para el control de la temperatura. Los generadores clásicos usan aire como refrigerante y por lo general un espacio destinado para la inyección del gas de 2.5 a 3 mm aproximadamente. Los generadores que usan oxígeno y/o corrientes de frecuencia de media a alta, tienen un espacio tenue de descarga de aproximadamente 1 a 1.5 mm y deberá extraerse mucho más calor de la cámara de descarga.

El enfriamiento de una celda generadora de ozono se puede lograr mediante 2 mecanismos de transferencia de calor; transferencia de calor por conducción y por convección.

Al igual que en un circuito eléctrico básico, en un circuito térmico existen 3 elementos fundamentales: flujo energético o corriente, la temperatura cumple la función de la tensión eléctrica, las resistencias térmicas cumplen la función de las resistencias óhmicas y el flujo de calor cumple la función de una corriente eléctrica. Para que se lleve a cabo el flujo de la energía calorífica de un punto a otro en un circuito térmico, debe de existir una diferencia de temperatura. El calor pasará del punto mas caliente al más frio. A estos factores se les denomina resistencias térmicas.

### 3.3.1 Potencia disipada y temperatura de operación de una celda generadora de ozono.

La potencia disipada total depende principalmente de la densidad de potencia a la que se diseña la celda (dicha densidad de potencia se representa en las ecuaciones de Paschen, ecuación 3.14 y 3.15) Para una celda construida con una densidad de potencia de  $1 \text{ kW/m}^2$  La potencia disipada en calor por la celda  $q_t$  puede ser calculada de la siguiente manera.

Ecuación 3.4	$q_t = \frac{w(\%disipacion)}{100\%}$
--------------	---------------------------------------

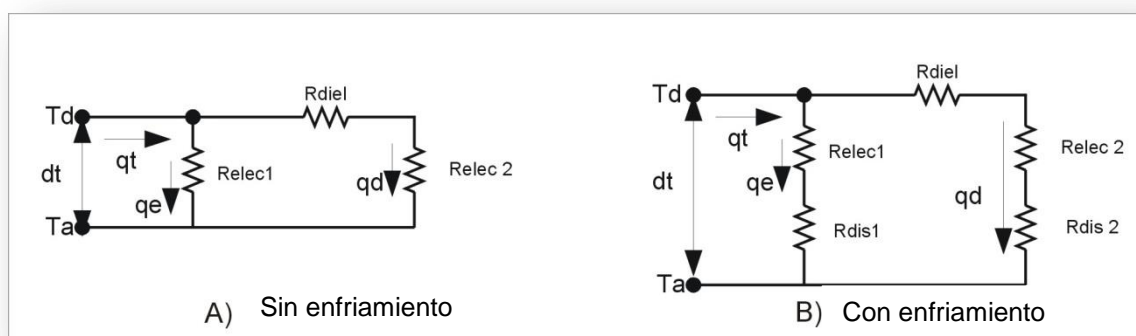
Del mismo modo pueden ser calculadas las potencias disipadas por los electrodos.

Otro dato necesario para emprender el cálculo del sistema de enfriamiento es la temperatura del espacio de descarga a la que deseamos que opere la celda de ozonificación. Para un sistema de enfriamiento como el propuesto en esta tesis, la temperatura de operación nunca será menor a la temperatura ambiente. Adicionalmente, hay que considerar que la temperatura en algunos lugares puede superar lo  $40^\circ \text{C}$  en primavera (para el caso de la ubicación de nuestra torre de enfriamiento este no se aplica), pero para este caso crítico es recomendable que la temperatura de operación se mantenga debajo de los  $50^\circ \text{C}$ , ya que de lo contrario el ozono generado será destruido inmediatamente después de ser creado. Sin embargo, las mejores eficiencias eléctricas de una celda generadora de ozono se obtienen cuando la temperatura de operación de la celda se encuentre por debajo de los  $33^\circ \text{C}$ <sup>6</sup>.

### 3.1.2 Cálculo del sistema de enfriamiento de una celda generadora de ozono.

La representación del circuito térmico de la celda generadora con y sin sistema de enfriamiento se presenta en la siguiente figura:

**Figura 3.2. Circuito térmico con y sin sistema de enfriamiento:**



Donde  $T_d$  y  $T_a$  son las temperaturas del espacio de descarga y ambiente respectivamente,  $q_t$  es el calor total que la celda debe disipar,  $q_e$  y  $q_d$  son el

<sup>5</sup> Diseño y construcción de un generador de ozono para aplicaciones de purificación de agua, Tesis, Anexo A9

<sup>6</sup> Diseño y construcción de un generador de ozono para aplicaciones de purificación de agua, Tesis Anexo A7.

calor a disipar en cada uno de los electrodos de la celda.  $R_{diel}$  es la resistencia térmica por conducción que ofrece el material dieléctrico al flujo del calor,  $Relec1$  y  $2$  de A) representan las resistencias térmicas de los electrodos por conducción y convección natural con el ambiente. Mientras que  $Relec1$  y  $2$  de B) representan las resistencias térmicas producidas por el sistema disipador ventilador que se propone para el sistema de enfriamiento del ozonificador, es decir, la resistencia térmica que ofrece el sistema de enfriamiento por conducción y convección forzada.

El calculo del sistema de enfriamiento parte del circuito térmico de la figura B). Las resistencias  $R_{diel}$ ,  $Relec1$  y  $Relec2$  pueden ser calculadas en base a las dimensiones y conductividades térmicas de los materiales usados, mediante la aplicación de la siguiente ecuación:

Ecuación 3.5	$R_{cond} = \frac{\Delta x}{AcKt}$
--------------	------------------------------------

El calor disipado en la celda y en cada uno de los electrodos pueden ser estimados con la ecuación 3.4 se propone la diferencia de temperaturas  $\Delta T$  a la que va a operar la celda de generación de ozono, tomando en consideración el caso crítico, es decir una temperatura ambiente a  $40^{\circ}\text{C}$ .

Las resistencias térmicas equivalentes de cada rama del circuito de la figura 8 B) pueden ser calculadas por las ecuaciones siguientes:

Ecuación 3.6	$R_{termica1} = \frac{\Delta T}{q_e}$
--------------	---------------------------------------

Ecuación 3.7	$R_{termica2} = \frac{\Delta T}{q_d}$
--------------	---------------------------------------

Las resistencias térmicas equivalentes de cada rama  $R_{di1}$  y  $R_{dis2}$  pueden ser calculadas con las ecuaciones siguientes:

Ecuación 3.8	$R_{dis1} = R_{termicas1} - Relec1$
--------------	-------------------------------------

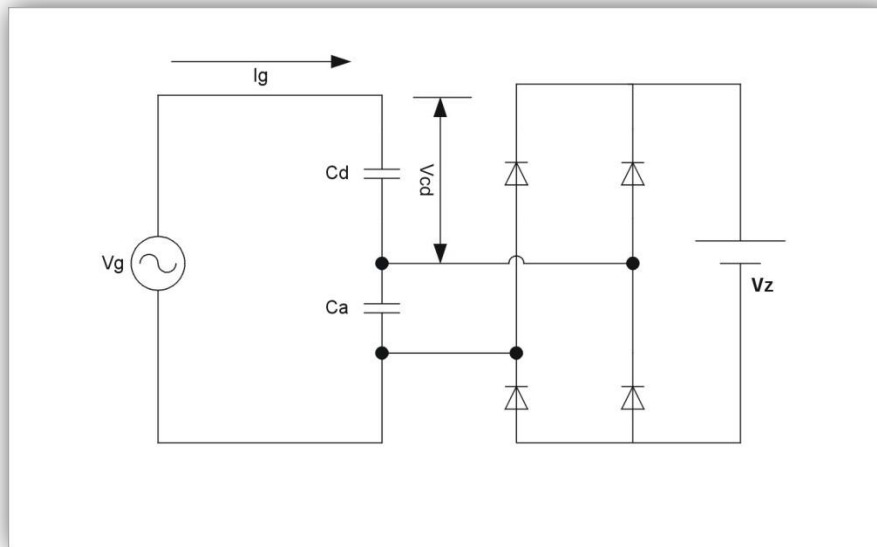
Ecuación 3.9	$R_{dis2} = R_{termicas2} - Relec2 - R_{diel}$
--------------	--

Conociendo el valor de  $R_{dis}$  en cada rama se elige el **disipador y el ventilador** cuya resistencia térmica  $R_{sel}$  sea igual o menor que  $R_{dis}$  calculada, y físicamente puede ser instalado. El disipador y el ventilador se eligen con ayuda de las curvas proporcionadas por el fabricante.

### 3.1.3 Representación eléctrica de un generador de ozono.

El comportamiento de una celda generadora de ozono como se vio anteriormente, puede ser representado de la siguiente forma, donde se integran las partes eléctricas y la cámara de generación de ozono.

**Figura 3.3: Representación eléctrica de un generador de ozono<sup>7</sup>.**



La celda esta formada por las capacitancias Cd y Ca las cuales representan las capacitancias formadas por el material dieléctrico adherido a uno de los electrodos de la celda y por el gas de alimentación. En nuestro caso esta celda estará formada por el generador propuesto en la sección anterior, que consta de dos tubos cilíndricos concéntricos de vidrio y acero inoxidable. La fuente Vz conectada al puente de diodos configura la condición para llevar a cabo la generación de energía necesaria para que suceda el efecto corona. Esta configuración de diodos se verá mas adelante cuando se trate sobre los componentes eléctricos.

La magnitud del voltaje para que se realicen y sostengan las microdescargas causantes del efecto corona, se establecen por medio del valor de la fuente Vz.

### 3.4 DISEÑO TEORICO DEL PROTOTIPO DE GENERADOR DE OZONO.

Las siguientes ecuaciones muestran la relación que hay entre los parámetros básicos de diseño de un generador de ozono prototipo propuesto.

La **ENERGIA** aplicada al generador de ozono es una función del voltaje y de la frecuencia según la siguiente relación de Manley [1943]<sup>8</sup>.

Ecuación 3.10	$W = 4fCgEo \left[ Em - \left( \frac{Cg+Ca}{Cg} \right) Eo \right]$
---------------	---

En donde:

W = Energía o potencia que aplica la celda de ozonificación expresada en watts.

f = Frecuencia de operación fundamental.

Cg = Capacitancia del dieléctrico (aislador).

Ca = Capacitancia del intervalo de descarga.

<sup>7</sup> Tesis; Diseño y construcción de un generador de ozono para aplicaciones de purificación de agua. CENIDET; Centro nacional de investigación y de desarrollo. Ingeniero Erwin Beutelspacher Santiago, José María Calderón Ancona.

<sup>8</sup> Ozone in water treatment, application and engineering; Lewis Publisher pag 375.

$E_o$  = Potencial de descarga en el intervalo de descarga o voltaje de mantenimiento de la microdescarga.

$E_m$  = Valor máximo del voltaje en los electrodos.

Para un determinado ozonificador y un conjunto invariable de condiciones en cuanto a presión y temperatura de operación,  $C_g$ ,  $C_a$  y  $E_o$  son constantes independientes del voltaje y de la frecuencia. El consumo de energía es directamente proporcional a la frecuencia y al voltaje más alto (por arriba del voltaje de arranque) Además dicho consumo es incrementado por el aislante, el que por ésta razón debe ser un aislante muy delgado con altas constantes dieléctricas.

Las celdas del tipo industrial de descarga corona tienen una capacitancia debido al espacio de aire y del material aislante. La ecuación para calcular la capacitancia total de la celda es la siguiente:

Para geometría cilíndrica.

Ecuación 3.11	$C(f) = \frac{(2\pi\epsilon\epsilon_0L)}{\ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right)}$
---------------	--

Para geometría de placas paralelas.

Ecuación 3.12	$C(f) = \epsilon\epsilon_0 \frac{A}{d}$
---------------	---

Donde  $r_e$ ,  $r_i$  = radios de los electrodos concéntricos exterior e interior de la lámpara o tubo ozonificador.

$d$  = Distancia entre los electrodos.

$A$  = área del electrodo.

$\epsilon_0$  = Constante dieléctrica absoluta. ( $8.854 \times 10^{-12}$  Faradios)

$\epsilon$  = Constante relativa del dieléctrico (6 para vidrio).

$C$  = Capacitancia (faradios)

El potencial de excitación es una función de la frecuencia de la señal  $W$  esto es:

Ecuación 3.13	$E_o = E_m \text{sen}(2\pi wt)$
---------------	---------------------------------

Estas ecuaciones son para el cálculo de la capacitancia cuando no hay descarga, este valor es el valor de la capacitancia teórica. Para calcular la capacitancia real, hay que considerar una serie variable de factores; sin embargo estas ecuaciones se pueden utilizar como una aproximación a las capacitancias reales, en el cual  $E_m$  es el potencial de pico de la corriente alterna aplicada.

En un valor  $E_s$ , la descarga corona se convierte en un arco.

El voltaje en el que se inicia la descarga (voltaje en el umbral) del efecto corona depende de la presión del gas de alimentación, del tipo de gas y del espacio de

descarga, este voltaje de inicio de descargas puede ser estimado mediante la ecuación de Paschen.

Ecuación 3.14	$E_s = 29.64 P d_g + 1350$	Para aire.
---------------	----------------------------	------------

Ecuación 3.15	$E_s = 26.55 P d_g + 1480$	Para el oxígeno.
---------------	----------------------------	------------------

Dónde:

P = presión absoluta del gas en Kpa,  $d_g$  = espacio de descarga, en milímetros.

Estas ecuaciones indican que para valores de espacio de descarga iguales, el potencial de arco en el oxígeno es algunas veces más alto que en el aire. Esto se puede corregir usando espacios más estrechos en el diseño de los generadores de ozono, basados en oxígeno. Con otras condiciones constantes, el potencial de arco opera a voltajes altos, y cuando el espacio de descarga es muy pequeño, el potencial de arco es menor.

La formación de ozono en el diseño del equipo es directamente proporcional a la energía disipada en la descarga, si se mantiene constante la concentración del ozono y la temperatura, cerca del 85 % de la energía eléctrica es transformada en calor en el espacio de descarga, si se aumenta la energía de entrada aumenta la temperatura a no ser de que se suministre alta refrigeración; de ésta forma, la cantidad de energía dedicada a producir la descarga estará restringida por las disposiciones de refrigeración.<sup>9</sup>

La ecuación 3.10 presenta una desventaja, esta depende del valor del voltaje de mantenimiento  $E_0$  (Ecuación 3.13), el cual es un parámetro que no se puede estimar ni calcular de forma directa, sin embargo la potencia puede ser calculada empleando el voltaje en el umbral  $E_s$ , arreglando la ecuación 3.10 sustituyendo la ecuación de Paschen aplicada para aire queda de la siguiente forma:

Ecuación 3.16	$W = 4fC_g \frac{C_g}{C_g + C_a} E_s (E_m - E_s)$
---------------	---

Esta forma de la ecuación de Manley nos permite estimar la potencia de generación eléctrica de la celda de ozonificación a partir de variables como la presión del gas de entrada.

Posteriormente se diseñara a partir de esta ecuación las dimensiones adecuadas para la celda de ozonificación para poder darle tratamiento a la torre de enfriamiento y equipos industriales.

<sup>9</sup> <http://www.depi.itchiuhuahua.edu.mx/electro/archivo/electro2000/mem2000/articulos/IN3.pdf>

### 4.1 Torres de enfriamiento de agua

El propósito de esta tesis es, proponer un modelo de un generador de ozono, a partir de un modelo matemático, para realizar una aplicación a una torre de enfriamiento industrial. Nuestro objetivo será proponer la instalación de un equipo ozonificador en una torre de enfriamiento piloto y probar que puede ser rentable la utilización de esta tecnología en la industria. Para poder instalar el generador de ozono en la torre de enfriamiento es necesario analizar la configuración de la torre de enfriamiento, analizar la posición de instalación, así como los parámetros necesarios para lograr esta instalación, así como analizar el tipo de torres de enfriamiento y determinar el perfil de los equipos al que se puede lograr instalar esta aplicación.

Las torres de enfriamiento tienen como finalidad enfriar una corriente de entrada de agua mediante la vaporización parcial de ésta con el intercambio de calor sensible y latente de una corriente de aire seco y frío que circula en contacto con el agua.

Existen diversos tipos de torres de enfriamiento, la selección adecuada de las torres de enfriamiento se basa en el costo inicial el cual debe de ser de bajo costo, así como de bajo de costo de operación.

Con frecuencia el armazón y el empaque interno son de madera, suele ser común la impregnación de la madera con fungicidas.

El entablado de los costados de la torre es de pino, poliéster reforzado con vidrio o cemento de asbesto.

Las torres de enfriamiento pueden rellenarse con empaques de plástico. El empaque de plástico puede ser de polipropileno moldeado en forma de enrejado o de alguna otra forma. El espacio vacío de la torre es muy grande, generalmente mayor del 90 % con el fin de que la caída de presión del gas sea lo más baja posible.

Como consecuencia la superficie en la interface, no solo incluye la superficie de las películas líquidas que humedecen el empaque, sino que también la superficie de las gotas que caen como lluvia.

### 4.2 Tipos de Torres de Enfriamiento.

Las torres de enfriamiento se clasifican según la forma en la que se suministra el aire:

#### 4.2.1 Torres de circulación natural.

**Atmosféricas** El movimiento del aire depende del viento de los alrededores y del efecto aspirante de las boquillas aspersoras. Estas torres se usan en pequeñas instalaciones, y depende de los vientos predominantes para el movimiento de la entrada de aire en la torre.

**Tiro natural** El flujo de aire necesario se obtiene como resultado de la diferencia de densidades, entre el aire más frío del exterior y el aire húmedo del interior de la torre de enfriamiento. Este tipo de torres de enfriamiento utilizan una chimenea de gran altura para lograr el tiro deseado.



Debido al inmenso tamaño de estas torres (entre 500 pies de alto y 400 pies de diámetro), se utilizan por lo general para flujos de agua por encima de 200000 gpm.

Este tipo de torres de enfriamiento son ampliamente utilizadas en las centrales térmicas.

#### **4.2.2 Torres de tiro Mecánico.**

El agua caliente que llega a la torre puede distribuirse por boquillas aspersores o compartimientos, que dejan pasar hacia abajo el flujo de agua a través de unos orificios.

El aire usado para enfriar el agua caliente es extraído de la torre en cualquiera de las dos siguientes formas.

**Tiro Forzado.** El aire se fuerza por un ventilador situado en el fondo de la torre de enfriamiento y se descarga por la parte superior de la torre.

Estas torres están sujetas particularmente a la recirculación del aire caliente y húmedo del cual es descargado dentro de la toma del ventilador, debido a la baja velocidad de descarga y que materialmente reduce la efectividad de la torre.

**Tiro inducido.** El tiro inducido está configurado con el ventilador en la parte superior de la torre, esto permite una distribución más uniforme del aire.

El aire se succiona a través de la torre mediante el ventilador situado en la parte superior de la torre; este tipo de torre es la más utilizada por la industria.

Las torres de flujo cruzado y flujo transversal pertenecen a la categoría de torres de tiro inducido y se describen a continuación:

**Flujo cruzado.** El aire entra a los lados de la torre fluyendo horizontalmente a través del agua que cae. Las corrientes de aire laterales se unen en un pasaje interno y dejan la torre por el tope. Las torres de flujo cruzado requieren más aire y tienen un costo de operación más bajo que las torres a contracorriente.<sup>10</sup>

Desde el punto de vista termodinámico, la configuración a contraflujo es más eficaz, ya que el agua más fría entra en contacto con el aire más frío, obteniéndose así un potencial máximo de entalpia. Cuantos mayores son los intervalos de enfriamiento y más difícil la diferencia de temperaturas, tanto más evidente serán las desventajas del tipo de contraflujo.

**Flujo Transversal** El fabricante de torres de flujo transversal puede reducir con eficacia la característica de torre a acercamientos muy bajos incrementando la cantidad de aire para proporcionar la razón L/G más baja. El aumento en el flujo de aire no se logra necesariamente incrementando la velocidad del mismo, sino sobre todo alargando la torre para aumentar el área de corte transversal para el flujo de aire. Así pues, es obvio que el llenado para flujos transversales se hace progresivamente más largo en la dirección perpendicular al flujo del aire y más corto en la dirección de éste, hasta que casi pierde su desventaja inherente de la diferencia de potencial. Con todo, al lograr esto se incrementa el consumo del potencial de ventilador.

---

<sup>10</sup> <http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/csalas/OPIV/torres1.pdf>

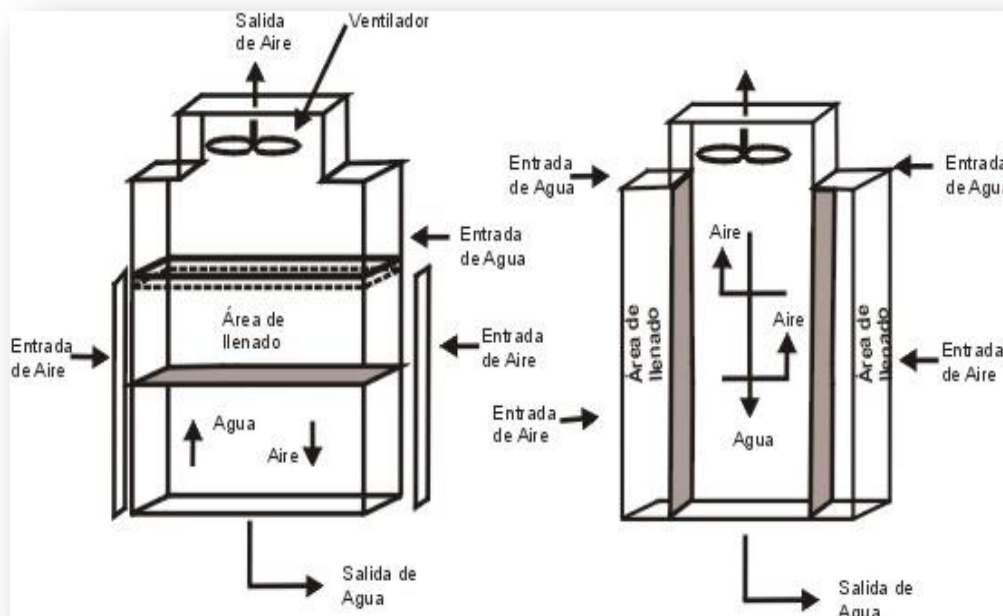


La elección económica de una torre de enfriamiento entre el sistema a contraflujo y la torre de enfriamiento transversal se determina según la eficiencia del relleno, las condiciones de diseño y los costos de construcción de la torre.

El resultado del funcionamiento de un tipo específico de torre de enfriamiento está dictaminado por la razón de los pesos del aire y agua así como del tiempo de contacto entre uno y otro. En la práctica comercial, la variación en la razón de aire y agua se obtiene primeramente manteniendo constante la velocidad del aire  $350 \text{ ft}/(\text{min}\cdot\text{ft}^2)$  de área activa de la torre) y haciendo variar la concentración de agua,  $\text{gal}/(\text{min}\cdot\text{ft}^2)$  de área de la torre). Como operación secundaria, la velocidad del aire se altera para que la torre se adapte al requisito de enfriamiento.<sup>11</sup>

En las siguientes figuras se muestran las torres de tiro inducido.

**Figura 4.1. Torres de enfriamiento Tiro inducido.**



#### 4.2.3 Tiempo de contacto.

El tiempo de contacto que hay entre el aire y el agua se rige por el tiempo necesario para que el agua se descargue por las boquillas y caiga a través de la torre de enfriamiento hasta el depósito. Así de esta forma el tiempo de contacto se determina por la altura de la torre de enfriamiento. Si el tiempo de contacto es insuficiente, ningún incremento en la relación de aire-agua generará el enfriamiento deseado, por ésta razón es importante mantener una altura adecuada mínima en las torres de enfriamiento. Cuando se requiere un acercamiento de temperatura de bulbo húmedo entre  $8$  y  $11$  °C ( $15$  a  $20$  °F) y un intervalo de enfriamiento de  $13.9$  a  $19.4$  °C ( $15$  a  $20$  °F) bastará con una torre relativamente baja. Una torre en que el agua se desplaza de  $4.6$  a  $6.1$  m desde el sistema de distribución hasta el depósito será suficiente para enfriar el

<sup>11</sup> Manual del Ingeniero Químico, Perry sexta edición, Torres de tiro mecánico, Tomo 1 pp. 12-15, 12-16

agua. Este tiempo de contacto también influirá en el diseño del sistema de ozonificación ya que será el tiempo en que el agua ozonificada entre en contacto con la empaquetadura interna.

El tamaño de la torre necesario es función de lo siguiente:

- ✓ Intervalo de enfriamiento (temperatura de agua caliente menos temperatura de agua fría).
- ✓ Diferencia útil de temperaturas a la temperatura de bulbo húmedo (temperatura de agua fría menos temperatura de bulbo húmedo)
- ✓ Temperatura de bulbo húmedo.
- ✓ Velocidad de aire a través de la celda.
- ✓ Altura de la torre de enfriamiento.

### 4.3 Teoría de una Torre de enfriamiento

Es de vital trascendencia que en la instalación de nuestro equipo ozonificador en una torre de enfriamiento, no interrumamos sobre las variables de operación de la torre de enfriamiento, esto es debido a que la incursión de un nuevo equipo, que tenga el efecto de modificar estas variables de control, implicaría un rediseño diferente al que se había planeado.

Por esta razón haremos referencia a la teoría termodinámica de las torres de enfriamiento y los procesos de transferencia de calor.

Dentro de la teoría del proceso de transferencia de calor en una torre de enfriamiento que ah merecido una aceptación más generalizada es la que desarrolla Merkel (op.cit). Este análisis se basa en la diferencia del potencial de la entalpía como fuerza impulsora.

Esta teoría supone que cada partícula de agua está rodeada de una película de aire y así mismo que la diferencia de entalpia entre la partícula de agua y la película de aire proporciona la fuerza impulsora en el proceso de enfriamiento. Por este análisis se conduce a la ecuación de Merkel y está se expresa como:

Ecuación 4.1	$\frac{KaV}{L} = \int_{T2}^{T1} \frac{dT}{h'-h}$
--------------	--

En donde K = coeficiente de transferencia de masa en lb de agua/ (h•ft<sup>2</sup>)

a = área de contacto en ft<sup>2</sup> / ft<sup>3</sup> del volumen de la torre de enfriamiento.

V = Volumen de la torre de enfriamiento activo en ft<sup>3</sup> / ft<sup>2</sup> de área plana.

L = Velocidad del agua en lb / (h•ft<sup>2</sup>)

h' = Entalpía del aire saturado a la temperatura del agua

h = Entalpia de la corriente del aire en BTU / lb.

T1y T2 = Temperatura del agua de entrada y de Salida en °F.

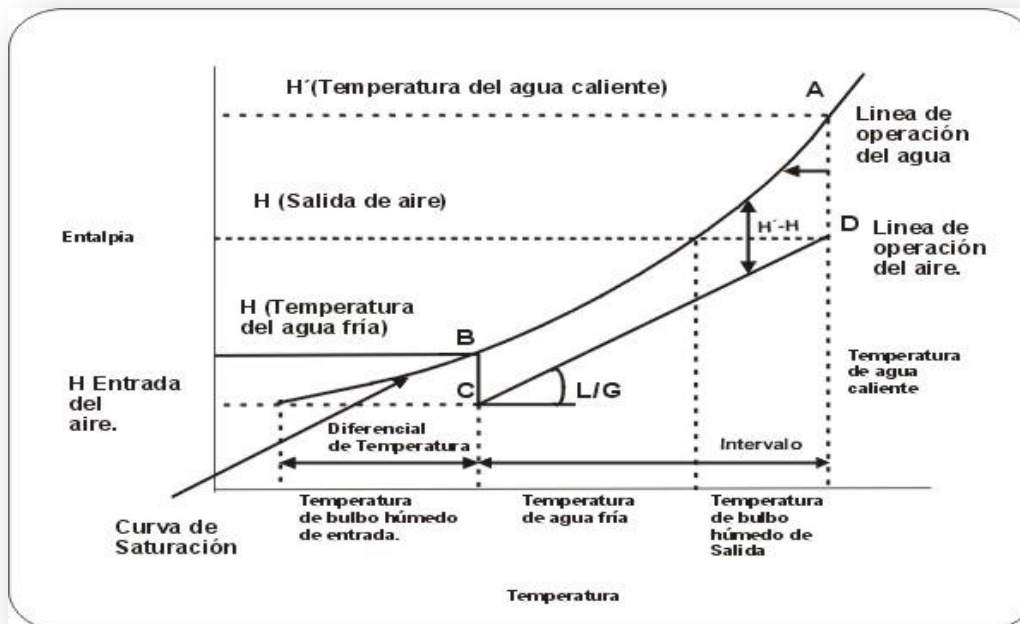
En el lado derecho de la ecuación se expresa por completo en términos de las propiedades del aire y el agua, y es independiente de las dimensiones de la torre.

*A través de esta ecuación se puede dar un acercamiento en los parámetros de operación de la torre de enfriamiento y así instalar la aplicación de ozonificación en la torre de enfriamiento.*

En la siguiente figura se muestra la relación que existe entre el agua y el aire así mismo como el potencial del impulsor en una torre de enfriamiento de contraflujo, en donde el aire fluye en sentido paralelo, pero siguiendo una

dirección opuesta al flujo de agua. La compresión de este diagrama constituye un pilar fundamental para el entendimiento del proceso de una torre de enfriamiento.

**Figura 4.2.<sup>12</sup> Grafica característica de una torre de enfriamiento.**



La línea del agua está indicada y representada por la línea AB y se especifica por medio de la temperatura del agua de la torre en la entrada y la salida. La línea de operación del aire principia en C, verticalmente por debajo de B, y en un punto que tiene una entalpía correspondiente a la temperatura de entrada de bulbo húmedo. La línea BC representa la fuerza impulsora ( $H' - H$ ). Para enfriar el agua  $1^\circ F$  la entalpía por libra de aire aumenta 1 BTU multiplicada por la razón de libras de agua por libra de aire. La relación líquido gas  $L/G$  es la pendiente de la línea de operación. El aire que sale de la torre representa por medio del punto D y la gama de enfriamiento es la longitud proyectada sobre la línea CD sobre la escala de temperatura.

Las coordenadas hacen referencia directamente a la temperatura y la entalpía de cualquier punto en la línea de operación del agua; pero en la línea de operación del aire, la referencia se hace solo en la entalpía de un punto. La temperatura del bulbo húmedo correspondiente a cualquier punto de CD se encuentra proyectando dicho punto en sentido horizontal a la curva de saturación y luego en sentido vertical a la coordenada de la temperatura. La integral de la ecuación 4.1 se representa por medio del área ABCD del diagrama de la figura 10 y dicho valor se conoce como la característica de la torre de enfriamiento que varía con la razón  $L/G$ . Por ejemplo, si hay un incremento en la temperatura de bulbo húmedo de entrada se mueve el origen C en sentido ascendente y la línea CD se desplaza a la derecha para mantener un valor constante de  $KaV/L$ . Si la gama de enfriamiento aumenta, la línea CD se alarga. A una temperatura de bulbo húmedo constante, el equilibrio se

<sup>12</sup> Manual del ingeniero Químico, Perry, P.P Figura 12-12. Sexta edición, Tomo I.

establece recorriendo la línea a la derecha a fin de mantener constante el valor de  $KaV/L$ . Por otro lado, cualquier cambio en la razón  $L/G$  hace que varíe la pendiente de CD, y la torre de enfriamiento alcanza un equilibrio con un nuevo valor de  $KaV/L$ .

Para predecir el rendimiento de una torre es necesario conocer las características de torre requeridas para condiciones específicas del ambiente del agua.

Las características de torre  $KaV/L$  se determina mediante una integración. El método de Chebyshev para evaluar numéricamente la integral 4.1 es el que se emplea con mayor frecuencia.<sup>13</sup>

$$\text{Ecuación 4.2} \quad \frac{KaV}{L} = \int_{T_2}^{T_1} \frac{dT}{hw' - ha} \cong \frac{T_1 - T_2}{4} \left( \frac{1}{\Delta h_1} + \frac{1}{\Delta h_2} + \frac{1}{\Delta h_3} + \frac{1}{\Delta h_4} \right)$$

En donde  $hw$  = entalpía de la mezcla de aire-vapor de agua a la temperatura masiva del agua en BTU/lb de aire seco,  $ha$  = entalpía de la mezcla de aire – vapor de agua a la temperatura de bulbo húmedo en BTU / lb de aire seco.

$$\text{Ecuación 4.3} \quad \Delta h_1 = \text{valor de } (hw - ha) \text{ a } T_2 + 0.1(T_1 - T_2)$$

$$\text{Ecuación 4.4} \quad \Delta h_2 = \text{valor de } (hw - ha) \text{ a } T_2 + 0.4(T_1 - T_2)$$

$$\text{Ecuación 4.5} \quad \Delta h_3 = \text{valor de } (hw - ha) \text{ a } T_1 + 0.4(T_1 - T_2)$$

$$\text{Ecuación 4.6} \quad \Delta h_4 = \text{valor de } (hw - ha) \text{ a } T_1 + 0.1(T_1 - T_2)$$

#### 4.4 Operación de una Torre de enfriamiento.

##### Acondicionamiento de agua.

Los requisitos del acondicionamiento del agua para una torre de enfriamiento consisten en hacer la suma de las pérdidas de evaporación, perdidas de arrastre y perdidas a causa del viento siguiendo la siguiente ecuación:

$$\text{Ecuación 4.7} \quad W_m = W_e + W_d + W_b$$

Donde  $W_m$  = Acondicionamiento de agua,

$W_d$  = Pérdidas por arrastre

$W_b$  = Pérdidas a causa del viento. (Unidades congruentes,  $m^3 / h$  (gal / min)).

Las pérdidas por evaporación se pueden estimar como mediante la siguiente relación:

$$\text{Ecuación 4.8} \quad W_e = 0.00085W_c(T_1 - T_2)$$

<sup>13</sup> Manual del Ingeniero Químico, Perry, Sexta Edición, P.P 12-14 (Teoría de la torre de enfriamiento)

Donde  $W_c$  es el flujo de aire circulante, en gal / min, en la entrada de la torre.

$T_1 - T_2$  = Temperatura del agua de entrada menos la temperatura del agua de salida, en °F.

El arrastre tiene lugar en los vapores de descarga de la torre de enfriamiento. Las pérdidas por arrastre son una función del diseño del eliminador de arrastre cuya variación es usual entre 0.1 y 0.2 % del agua suministrada a la torre de enfriamiento. Existen nuevos desarrollos tecnológicos en el diseño del eliminador hacen posible la reducción de las pérdidas por arrastre en valores hasta por debajo de 0.1 %.

Las deposiciones a causa del viento se refieren a una parte del agua circulante que es desechada a consecuencia del proceso de evaporación, con objeto de disminuir la concentración de sólidos en el sistema.

La cantidad de pérdidas puede calcularse de acuerdo con el número ciclos de concentración requeridos para una formación a escala límite.

Los ciclos de concentración son; la relación de sólidos disueltos en el agua recirculante respecto a los sólidos disueltos en el agua de acondicionamiento. Como los cloruros permanecen solubles en la concentración, los ciclos pueden expresarse mejor como la relación del contenido de cloruros del agua respecto a las corrientes de recirculación y acondicionamiento. De acuerdo a esto, la cantidad de pérdidas a causa del viento se determinan de acuerdo con la siguiente expresión:

Ecuación 4.9	$\text{Ciclos de concentración} = \frac{W_e + W_b}{W_b}$
--------------	--

O

Ecuación 4.10	$W_b = \frac{W_e}{(\text{Ciclos de concentración} - 1)}$
---------------	--

Los ciclos de operación incluidos en la operación normal de las torres de enfriamiento se encuentran entre tres y cinco. Cuando se tiene menos de tres ciclos de concentración se requieren cantidades excesivas de flujo que se pierde a causa del flujo que se pierde a causa del viento, además de considerar la adición de ácido a la escala límite.<sup>14</sup>

<sup>14</sup> Manual del Ingeniero Químico, Perry; sexta Edición, Tomo 1P-p 12 17

## 5.1 ANALISIS TEORICO DE UN SISTEMA OZONIFICADOR APLICADO EN UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO EMPACADA.

Las torres de enfriamiento como se dijo anteriormente son intercambiadores de calor que enfrían agua por medio de la evaporación. Las torres de enfriamiento son usadas cuando los rangos de enfriamiento son bajos, generalmente entre 5 y 25 ° C. La temperatura mínima que se puede alcanzar con una torre de enfriamiento depende la temperatura de bulbo húmedo de la zona.

Esta sección tratara de realizar un análisis teórico de un ozonificador en una torre de enfriamiento, se tratará de emular las condiciones de operación así como del dimensionamiento teórico de la empaquetadura de una torre de enfriamiento piloto. Esto dará las bases necesarias para proceder a dar el análisis de la formación de biopelícula en esta torre calculada. Se denominará: *Análisis de ozonificador en torre de enfriamiento ozono-tratada.*

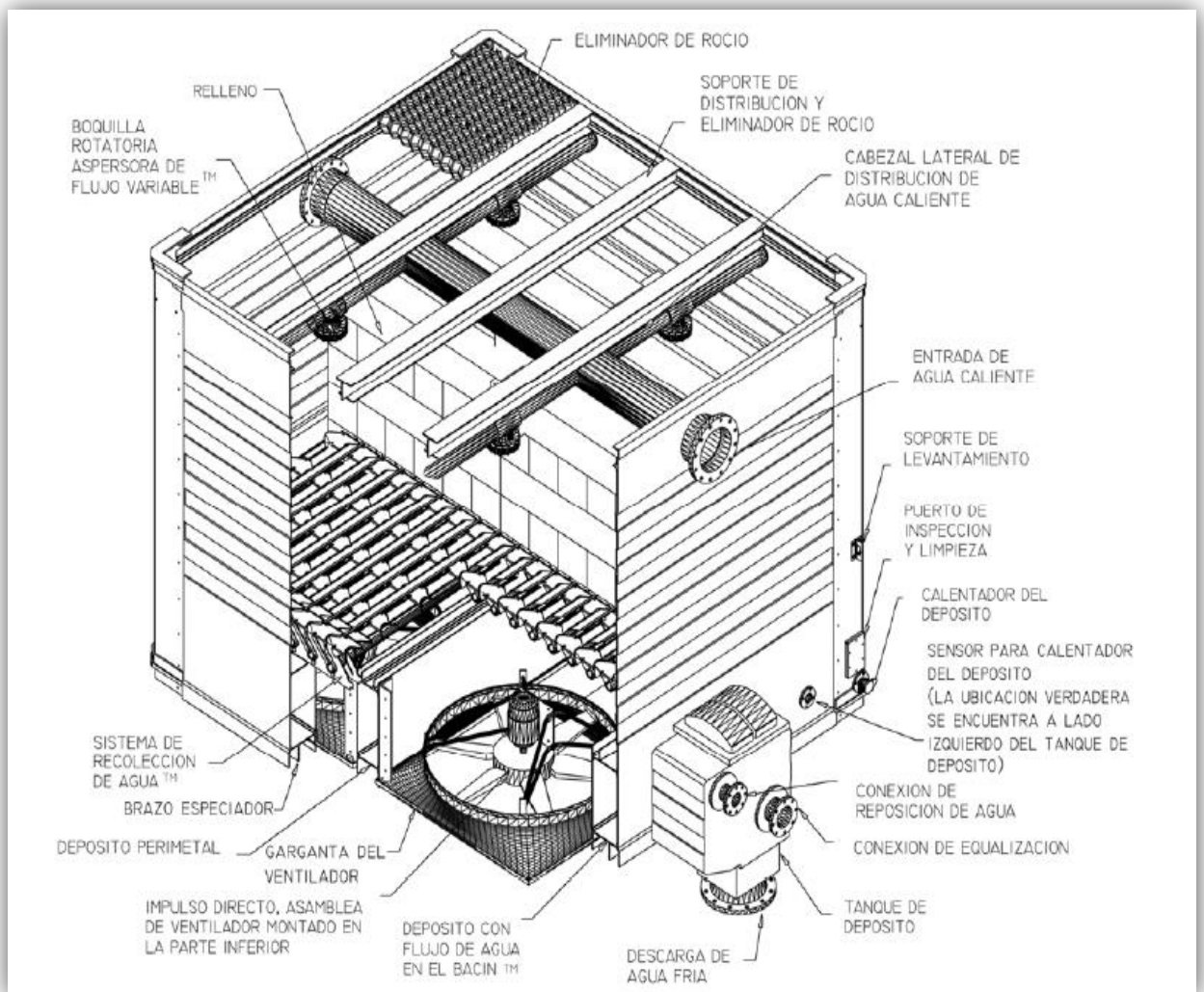
Para desarrollar este análisis de torre de enfriamiento, se realizó un análisis teórico previo para poder establecer las variables de control de una torre. También se realizó un análisis sobre los dimensionamientos de las partes que integrarían a una torre de enfriamiento, estos equipos son el ventilador, las bombas, aspersores. Todos estos equipos pueden ser necesarios en nuestro diseño de ozonificador para torres de enfriamiento. Este análisis se centrará en una torre empacada, esto es debido a que estas torres son las más usadas en la industria, así como las más propensas a tener una formación de biopelícula. También se analiza la posición de instalación del sistema ozonificador en los distintos tipos de torres.

### 5.1.1 Partes de una torre de Enfriamiento.

- **Cuerpo de la torre.-** Metal madera incorruptible hormigón
- **Rociadores:** Es la parte superior de la torre permiten que el agua ingrese a la torre en forma de gotas para aumentar su superficie de contacto.
- **Empaquetadura:** Es un aditamento interno de la torre que puede estar fabricado de metal, plástico o madera
- **Reserva.-** Esto es el fondo de la torre tanque que recoge el agua enfriada para ser recirculada o procesada.
- **Eliminadores de Acarreo:** Son estructuras que se colocan en la parte superior de la torre de enfriamiento y tiene la finalidad de evitar que las gotas pequeñas sean arrastradas por la corriente fuera del sistema.
- **Tubería de restricción del agua:** Conforme se produce la evaporación del agua es importante y necesario ir restituyéndola, para este fin se instala una tubería que mantiene la reserva constante:
- **Toma de Agua:** Esta parte de la torre de enfriamiento es importante debido a que se comparará posteriormente en un análisis, si este punto, es el punto óptimo para instalar la aplicación de una torre de enfriamiento.

En la siguiente figura se muestra un corte de una torre de enfriamiento objetivo de nuestro análisis.

**Figura 5.1. Partes de Torre de enfriamiento.<sup>15</sup>**



## 5.2 Balance Materia y de energía.

Al proceso que ocurre en el interior de una torre de enfriamiento, es transferencia de masa y se basa mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Ecuación 5.1} \quad q + L_0CT_0 = G(H_2 - H_1)$$

Donde  $q$  es la cantidad total de calor extraído del agua.

$L_0$  = Es el calor latente de vaporización del agua.

<sup>15</sup> Torre de enfriamiento MK 9000-9, Manual de instalación Tower Tech, pag 8



C = Es el calor específico del agua.

T<sub>0</sub> = Es la temperatura de ingreso del agua a la torre de enfriamiento.

G = La cantidad de aire que circula dentro de la torre de enfriamiento.

H<sub>1</sub> y H<sub>2</sub> = Entalpías del aire que entra y sale de la torre Respectivamente.

Esta ecuación se podría evaluar fácilmente, sin embargo el valor de H<sub>2</sub> no se puede calcular teóricamente, este valor es el resultado de una medición de operación o experimental. Esto es porque no podemos predecir las condiciones de salida de la torre de enfriamiento, este valor depende de la geometría de la empaquetadura interna que será objeto de nuestro estudio en el análisis para el tratamiento de la ozonificación. Este valor que implica la geometría de la empaquetadura se mide como el factor de transferencia total K<sub>xa</sub>.

Los valores de K<sub>xa</sub> dependen de la superficie de contacto interior de la empaquetadura, es decir, mientras mayor sea el área de contacto efectiva entre el aire y el agua, el factor K<sub>xa</sub> de la torre será mayor.

Los valores de K<sub>xa</sub> dependen del tipo de empaquetadura de la torre de enfriamiento, es difícil encontrar información bibliográfica, esto es debido a que esto es un factor clave de diseño que las compañías constructoras guardan celosamente.<sup>16</sup>

### 5.3 Dimensionamiento de una Torre de enfriamiento.

Para poder instalar la aplicación del sistema ozonificador en una torre de enfriamiento se necesita calcular el volumen de empaquetadura interno. Para obtener estos datos, se utilizará los datos experimentales de una torre de enfriamiento armada y se calcularán mediante el Método Carey Williamson el coeficiente de transferencia, para posteriormente, aplicar un coeficiente de transferencia mayor, y así dimensionar una empaquetadura de perfil necesario para el tratamiento con ozonificación.

Si se considera una gota de agua que cae por gravedad, a través de una corriente de aire que se está moviendo lentamente, puede suponerse que la capa límite que rodea a la gota de agua está saturada y a la misma temperatura del aire. Las ecuaciones que se derivan de esta consideración y este análisis son:

Ecuación 5.2	$\frac{Ka}{G} \int dv = \frac{CpLdT_1}{H' - Hg}$
--------------	--

Ecuación 5.3	$\frac{Ka}{G} \int dv = \frac{dHg}{H' - Hg}$
--------------	--

Donde Ka es el coeficiente global de Transferencia de Masa.

L = Flujo másico de agua por unidad de superficie.

G = Flujo Másico de aire por unidad de superficie.

<sup>16</sup> <http://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/1968/1/3955.pdf>. Cálculo y Diseño de empaquetadura y ventiladores para una torre de enfriamiento de Tiro Forzado. Jorge Antoni Iñiguez Donoso, Alfredo Barriga Rivera.



dV = Diferencial de Volumen.

dT1 = Diferencial de Temperatura de saturación.

H' = Entalpía de interface.

Hg = Entalpía del gas.

Donde H' - H representa la fuerza impulsora, que es la diferencia de entalpía necesaria para que se efectuó la transferencia, y que, en diagrama Hg vs t<sub>L</sub> está representada por la separación entre línea de saturación y de operación.

$$\text{Ecuación 5.4} \quad \frac{KaV}{L} = Cpl \int_{t_2}^{t_1} \frac{dt}{H' - Hg}$$

$$\text{Ecuación 5.5} \quad \frac{KaV}{G} = Cpl \int_{H_1}^{H_2} \frac{dHg}{H' - Hg}$$

Este método se basa en la suposición de que la diferencial de entalpía H' - Hg = ΔH varía en forma parabólica. Los tres puntos fijos de una torre de enfriamiento que definen la parábola son: el fondo y domo de la torre de enfriamiento, ΔH1 y ΔH2, así como la parte intermedia de la torre de enfriamiento ΔHm la fuerza impulsora media eficaz es f a ΔHm.

Si se simplifica la ecuación 5.4 se obtiene la siguiente expresión.

$$\text{Ecuación 5.6} \quad \frac{KaV}{L} = \frac{(t_2 - t_1)Cpl}{f\Delta Hm}$$

Donde f es el factor de corrección que se obtiene a partir del conocimiento de las fuerzas impulsoras en los extremos de la torre, la fuerza impulsora media aritmética y la grafica ΔHm/ΔH1 vs ΔHm/ΔH2 que aparece en **Anexo 6**.

Para dimensionar nuestra torre de enfriamiento, el término de volumen en la ecuación 5.4, se descompone en el producto de Área de transferencia multiplicado por la longitud de la torre dando como resultado:

$$\text{Ecuación 5.7} \quad dz = \frac{Gs}{Kxa} \int \frac{dh}{Hi - H}$$

Donde:

Dz = Describe la longitud de la columna.

Kx = Es el coeficiente de transferencia.

Se utilizó la torre de enfriamiento piloto del laboratorio de **Ingeniería Química de la Universidad Nacional Autónoma de México**, a la cual se realizó medición para determinar las variables de diseño pertinentes, con el fin de estudiar el comportamiento de estas variables en el dimensionamiento de la torre. Esto a su vez servirá para el análisis en la formación de biopelícula en el interior de la torre de enfriamiento.

La siguiente tabla muestra los valores de los datos tomados en la torre de enfriamiento.

**Tabla 5.1.**

L1(L/min)	T1°C	T2°C	Tbs1	Tbh1	Tbs2	Tbh2	T (seg)
2.22	48	25	19.5	14.5	34	29	20
2.22	48	23	20	15	27	22	20
2.22	48	22	20	15	31	24	20
2.22	47.76	21.84	19.83	14.83	30.67	25	20

La lectura de las temperaturas fue corregida calibrando la lectura del termómetro.

Se procedió a la toma de datos registrando la temperatura de bulbo húmedo y de bulbo seco con un psicrómetro y termómetro.

La temperatura T1 es del agua caliente antes de la entrada de la torre de enfriamiento.

La temperatura T2 es la temperatura del agua a la salida de la torre de enfriamiento.

La temperatura de bulbo seco 1 es la temperatura tomada del ambiente que rodea la torre.

La temperatura de bulbo húmedo 1 es la temperatura tomada del medio ambiente con el psicrómetro.

La temperatura de bulbo seco 2 es la temperatura tomada del aire que entra en la torre de enfriamiento.

La temperatura de bulbo húmedo 2 es la temperatura tomada a la salida de la torre de enfriamiento después del contacto del agua con el aire. Esta temperatura corresponde al vapor de agua y aire seco.

La lectura se tomo en intervalos de 20 segundos fijando un flujo de agua correspondiente a 2.22 Litros por minuto.

A Partir de los datos tomados en la torre de enfriamiento piloto se procede a realizar los cálculos para la determinación del dimensionamiento y las variables de control.

### 5.3.1 Memoria de cálculo en el dimensionamiento de la torre de enfriamiento.

Calculo la densidad de aire a Condiciones Estándar:

Ecuación 5.8	$\rho_{\text{Aire E}} \left( \frac{\text{g}}{\text{l}} \right) = \frac{\frac{P(1\text{atm}) \cdot 29}{760}}{0.082 \cdot (25^{\circ}\text{C} + 273.15)}$
--------------	---

Usando masa molar del aire como 29 g/mol

Calculo de la densidad del aire presente en el ambiente.

Ecuación 5.9	$\rho_{\text{Aire A}} \left( \frac{\text{g}}{\text{l}} \right) = \frac{\frac{P(\text{mmHg}) \cdot 29}{760}}{0.082 \cdot (T_{\text{bs1}} + 273.15)}$
--------------	---

Calculo de Volumen de aire a condiciones estándar.

Se fija que la entrada de aire sea de:

$$\text{Ecuación 5.10} \quad V_{(\text{estandar})} = 200 \text{ m}^3/\text{h}$$

Calculo de Volumen de aire en el ambiente.

$$\text{Ecuación 5.11} \quad V_{\text{amb}}(\text{m}^3/\text{h}) = \frac{P_{(1\text{atm})} \cdot V_{(\text{estandar})} \cdot T^{\circ}\text{C} + 273.15}{P_{\text{amb}} \cdot (T_{\text{bs1}} + 273.15)}$$

Calculo de G1. (Variable de la ecuación 4.5) Estándar

$$\text{Ecuación 5.12} \quad G_1 = V_{\text{Estandar}}(\text{m}^3/\text{h}) * \rho_{\text{Aire Estandar}}(\text{Kg}/\text{m}^3)$$

Calculo de G1 a condición Ambiente.

$$\text{Ecuación 5.13} \quad G_1 = V_{\text{amb}}(\text{m}^3/\text{h}) * \rho_{\text{Aire Ambiente}}(\text{Kg}/\text{m}^3)$$

Calculo de Gs. (Variable de la ecuación 5.7)

$$\text{Ecuación 5.14} \quad G_s = G_1(1 - y)$$

Calculo de  $y$ , para establecer la relación psicrometrica agua aire seco a condiciones ambiente.

$$\text{Ecuación 5.15} \quad Y_1 = \frac{Y(\text{KgH}_2\text{O}/\text{KgA.S})}{Y(\text{KgH}_2\text{O}/\text{KgA.S}) + 1} \quad \text{Donde Y es tomando de una carta psicrometrica en el punto 1, se realiza lo mismo para el punto 2.}$$

Calculo de L, Variable para establecer relación L/G liquido gas y determinar la línea de operación como se indica en el nomograma carta psicrometrica de humedad **anexo 4**.

Para este cálculo se ajusta a 2 puntos para determinar la curva de la torre de enfriamiento en los puntos del domo y el fondo.

$$\text{Ecuación 5.16 Punto 1} \quad L_{(\text{KgH}_2\text{O}/\text{h})} = L_1(\text{L}/\text{min}) * 60 * \rho_{\text{Agua}}(\frac{\text{Kg}}{\text{l}})$$

$$\text{Ecuación 5.17 Punto 2} \quad L_{(\text{KgH}_2\text{O}/\text{h})} = \frac{\# \text{corridas} \times 3600}{\text{tiempo (s)}}$$

Para el cálculo de la capacidad calorífica del líquido se tiene la siguiente ecuación:

$$\text{Ecuación 5.18} \quad \text{Punto 1 y punto 2} \quad Cp_l = \frac{75.4 \times 0.239}{18.016} \approx 1$$

Calculo de la capacidad del aire en el punto 1 y punto2 correspondientes a la temperatura de entrada y salida respectivamente, tanto de aire como de agua mediante las siguientes ecuaciones empíricas.

Ecuación 5.19	Punto 1	$CP_{aire} =$
		$(28.94 + (0.004147x tbs1) + (3.191x10^{-6}x tbs1^2) - (1.965x10^{-9}x tbs1))x \frac{0.239}{29}$

Ecuación 5.20	Punto 2	$CP_{aire} =$
		$(28.94 + (0.004147x tbs2) + (3.191x10^{-6}x tbs2^2) - (1.965x10^{-9}x tbs2))x \frac{0.239}{29}$

También se puede hacer una aproximación mediante el nomograma para el cálculo de la capacidad calorífica **Anexo 5**:

Para calcular la Entalpía se tienen las siguientes ecuaciones:

Ecuación 5.21	Agua	$H_L(Kcal/h) = Cp_L x T_1 ^\circ C$
---------------	------	-------------------------------------

Ecuación 5.22	Agua	$H_L(Kcal/h) = Cp_L x T_2 ^\circ C$
---------------	------	-------------------------------------

Calculo de la Capacidad calorífica de la mezcla aire /aire seco.

Ecuación 5.23	Punto 1	$CH1(Kcal/KgA.S^\circ C) = Cp_{aire} + (0.771xY1)$
---------------	---------	--

Ecuación 5.24	Punto 2	$CH2(Kcal/KgA.S^\circ C) = Cp_{aire} + (0.771xY2)$
---------------	---------	--

Calculo de la Entalpia de la Mezcla de aire/ aire seco, Los valores de las constantes están determinados por la presión atmosférica.

Ecuación 5.25	Punto 1	$H_{1g}(Kcal/KgA.S^\circ C) = (CH1 x tbs1 + (586xY1))$
---------------	---------	--

Ecuación 5.26	Punto 2	$H_{2g}(Kcal/KgA.S^\circ C) = (CH2 x tbs2 + (586xY2))$
---------------	---------	--

Para el cálculo del balance de materia se obtienen las siguientes ecuaciones.

Ecuación 5.27	$H_2O_{pérdidas} = L_1(KgH_2O/h) - L_2(KgH_2O/h)$
---------------	---

Ecuación 5.28	$H_2O_{evaporada} = Gs x (Y2 - Y1)$
---------------	-------------------------------------

Ecuación 5.29	$H_2O_{arrastré} = H_2O_{pérdida} - H_2O_{evaporada}$
---------------	---

Balance de Materia.

Ecuación 5.30	$\frac{L}{G} (KgH_2O/KgA.S) = \frac{L1}{G1}$
---------------	--

Para el cálculo del balance de energía.

Para el agua.

$$\text{Ecuación 5.31 } H_{(Kcal/h)} H_{2O \text{ pérdida}} = (L2_{(KgH2O/h)} x H1_{(Kcal/Kg^{\circ}C)}) - (L1_{(KgH2O/h)} x H2_{(Kcal/Kg^{\circ}C)})$$

$$\text{Ecuación 5.32 } H_{2O \text{ evaporada}} = GS_{(KgA.S/h)} x H_{1g} - H_{2g}$$

$$\text{Ecuación 5.33 } H_{2O \text{ arrastre}} = H_{H2O \text{ evaporada}} + H_{H2O \text{ pérdida}}$$

Calculo de la Capacidad térmica global.

$$\text{Ecuación 5.34 } Cp = H_{1g} - H_{2g}$$

$$\text{Ecuación 5.35 } \text{Rango temperaturas} = T1^{\circ}C - T2^{\circ}C$$

$$\text{Ecuación 5.36 } \text{Acercamiento} = T2^{\circ}C - Tbh1^{\circ}C$$

Se determina por método de Carey Williamson.

Para determinar la línea de operación equivalente al fondo, parte intermedia y domo de la torre de enfriamiento se establecen los siguientes 3 puntos.

$$\text{Ecuación 5.37 } \text{Punto abajo}(1) = T2^{\circ}C$$

$$\text{Ecuación 5.38 } \text{Punto Medio}(2) = \frac{T1^{\circ}C - T2^{\circ}C}{2}$$

$$\text{Ecuación 5.39 } \text{Punto Arriba}(3) = T1^{\circ}C$$

Para el cálculo de la línea de operación se tienen las siguientes ecuaciones.

**H Entalpia (Kcal/Kg).**

$$\text{Ecuación 5.40 } \text{Abajo} = H1_{(Kcal/Kg)}$$

$$\text{Ecuación 5.41 } \text{Medio} = \frac{H2 - H1}{2}$$

$$\text{Ecuación 5.42 } \text{Arriba} = H2_{(Kcal/Kg)}$$

Para el cálculo de la línea de la entalpía se tiene las siguientes ecuaciones.

**H\*(Kcal/Kg)**

$$\text{Ecuación 5.43} \quad H^*_{Abajo(1)} = 5.1613e^{(0.0566 \cdot T(^{\circ}C) \text{ punto abajo})}$$

$$\text{Ecuación 5.44} \quad H^*_{Medio(2)} = 5.1613e^{(0.0566 \cdot T(^{\circ}C) \text{ Puntomedio})}$$

$$\text{Ecuación 5.45} \quad H^*_{Arriba(3)} = 5.1613e^{(0.0566 \cdot T(^{\circ}C) \text{ Punto arriba})}$$

Para el cambio de entalpia en los tres puntos, se tienen las siguientes ecuaciones.

**$\Delta H$  Cambio de entalpía.**

$$\text{Ecuación 5.46} \quad \text{Punto abajo} = H^*_{Abajo} - H_{Abajo}$$

$$\text{Ecuación 5.47} \quad \text{PuntoMedio} = H^*_{Medio} - H_{Medio}$$

$$\text{Ecuación 5.48} \quad \text{PuntoMedio} = H^*_{Arriba} - H_{Arriba}$$

Para el cálculo de los coeficientes de transferencia, recordando que este coeficiente es para nuestra torre de enfriamiento, se tiene que:

$$\text{Ecuación 5.49} \quad H_{deG} = \frac{Gs(KgA \cdot \frac{S}{h})}{\text{Area de la torre} \cdot \text{Punto de Linea de operacion}}$$

$$\text{Ecuación 5.50} \quad N_{deG} = \frac{\text{Altura de la torre}}{H_{deG}}$$

Para el cálculo del coeficiente global de transferencia se tiene que:

$$\text{Ecuación 5.51} \quad Ka = \frac{(T1^{\circ}C - T2^{\circ}C) \cdot x \cdot Cpl(Kcal/Kg^{\circ}C) \cdot x L1(\frac{KgH2O}{h})}{fx \Delta H_{Medio} \cdot \text{Altura torre} \cdot \text{Area Torre}}$$

O

$$\text{Ecuación 5.52} \quad Ka = \frac{Gs \cdot HUT}{Axh}$$

Donde HUT se calcula de la siguiente expresión.

$$\text{Ecuación 5.53} \quad HUT = \frac{\text{Altura de la torre}}{NUT}$$

La expresión NUT es el resultado de la integración de ecuación de Diseño donde se involucra el área necesaria para lograr la transferencia de masa obteniéndose la siguiente expresión.

Ecuación 5.54

$$AreaH = \frac{|H_{propuesta} - AreaH|}{|H^* - AreaH|}$$

Las siguientes tablas muestran el resultado de la aplicación de las ecuaciones anteriores.

**Tabla 5.2** Valores estándar y ambiente de las corrientes.

Corrección de Flujo de Aire y Densidad							
Condiciones	P (mmHg)	T (°C)	V (m <sup>3</sup> /h)	$\rho_{Aire}$ (g/L)	y	G <sub>1</sub> (kg/h)	G <sub>s</sub> (kgAS/h)
Estándar TP	760	25	200	1,18534	0,009	237,07	
Ambiente	586	19,83	254,891	0,93008	0,018	237,07	235,12

**Tabla 5.3** Entalpias y capacidades caloríficas de los puntos 1 y 2.

PUNTO	$\rho_{Agua}$ (kg/L)	L (kgH <sub>2</sub> O/h)	C <sub>pL</sub> (kcal/kg°C)	H <sub>L</sub> (kcal/h)	C <sub>pAIR</sub> (kcal/kg°C)	C <sub>H</sub> (kcal/kg AS°C)	H <sub>G</sub> (kcal/kgAS)
1	0,991	132,00	1,000	47,767	0,23919	0,248445579	11,960
2	0,991	720,00	1,000	21,848	0,23958	0,269646877	31,123
□	0	-588,00	0,000	-25,919	0,00038	0,021201297	19,164

**Tabla 5.4** Balance de Materia y energía.

BALANCE DE MATERIA		BALANCE DE ENERGIA			
	(kgH <sub>2</sub> O/h)	H (kcal/h)	Cap. Térmica	Rango (°C)	
H <sub>2</sub> O Perdida	-588,00	H <sub>2</sub> O 9425,249	19,1636669	25,91	
H <sub>2</sub> O Evaporada	6,32	Aire 4489,214		Acercamiento (°C)	
H <sub>2</sub> O Arrastre	-594,32	Q PERDIDO 13914,463		7,01	
L/G (kgH <sub>2</sub> O/kgAH)	0,5568				

**Tabla 5.5:** Aplicación del método Carey Williamson para el dimensionamiento de la torre de enfriamiento.

	Línea de	Operación		
PUNTO	T (°C)	H (kcal/kg)	H* (kcal/kg)	Ka
Abajo (1)	21,84	11,95950	17,76933	2200,992
Medio (m)	34,7989	21,54134	36,99587	F
Arriba (2)	47,76	31,12317	77,02565	0,88

La integración se realiza por un método numérico, donde se hace una sumatoria de los valores obtenidos, para evaluar la integral de la ecuación 5.7. El calculo se realizo sumando 0.5 a la entalpia en cada iteración, para resolver la integral y encontrar la entalpia iterada en la interface. Este resultado es el valor NUT de la ecuación 5.53.

La siguiente tabla muestra la integración de la ecuación de diseño para encontrar el área requerida.

**Tabla 5.6** integración de la ecuación de diseño.

Integración de la ecuación de diseño				
T	H	H*	1/(H*-H)	Área
21.84250	11.95950	17.76933	0.17212	0.08606
22.51859	12.45950	18.46248	0.16658	0.08329
23.19468	12.95950	19.18268	0.16069	0.08034
23.87078	13.45950	19.93096	0.15452	0.07726

La tabla anterior fue truncada en 4 iteraciones, se tomo como criterio de paro de calculo, los cálculos iterativos la entalpia de entrada, correspondiente a la temperatura 47.76°. Para establecer la temperatura que se necesita para calcular la entalpia en la interface se tiene la siguiente ecuación:

$$\text{Ecuación 5.55} \quad T[\text{iterada}] = \frac{(H[\text{abajo}]_{\text{iterada}} - H_{\text{abajo}})(T_{\text{arriba}} - T_{\text{abajo}})}{H_{\text{arriba}} - H_{\text{abajo}}} + T_{\text{abajo}}$$

Para encontrar la entalpia iterada en la interface y así resolver la integral de la ecuación de diseño se sustituye la temperatura iterada en la ecuación 5.43

Para la construcción de la curva de equilibrio y encontrar la grafica característica de una torre de enfriamiento con una tendencia parabólica se utiliza la ecuación la ecuación 5.45.

**Tabla 5.7:** Datos para la grafica de la curva de equilibrio.

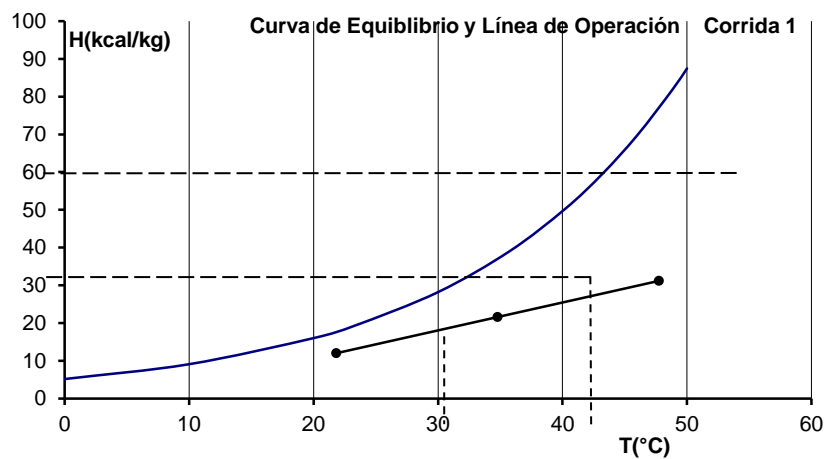
Curva de Equilibrio			
Datos	Leídos	Ajuste	
T (°C)	H (kcal/kg)	T (°C)	H (kcal/kg)
0	4	0	5,1613
10	8,4	10	9,090123421
20	16,7	20	16,00959909
23,3	20	23,3	19,2973636
30	29	30	28,19623577
35,76	40	35,76	39,0641234
40,2	50	40,2	50,22477776
43,2	60	43,2	59,51976759
46	70	46	69,74100737
48,8	80	48,8	81,71752521
50	84	50	87,46060695

Para nuestra torre de enfriamiento piloto se tienen los siguientes datos, el valor del factor de corrección es de 0.88, este es localizado en el nomograma donde se grafica  $\Delta H_m/\Delta H_1$  Vs  $\Delta H_m/\Delta H_2$  (**Anexo 6**) evaluados a  $t_1$  y  $t_2$ :



La grafica donde se da la información de la torre de enfriamiento donde se encuentra la línea de operación y la curva de equilibrio se muestra en la siguiente figura.

**Figura 5.2: Grafica Experimental de los valores medidos.**



Se determina la altura de la torre midiéndola físicamente, en el caso de nuestra torre de enfriamiento piloto, se tiene una altura de 1.27m y el área de la torre de enfriamiento es 0.3 m. Sustituyendo nuestros valores en la ecuación 5.52 obtenemos como resultado del valor del coeficiente de transferencia de masa dando como resultado:

$$Kx [=] 1494.670 \frac{Kg}{h \cdot m^3}$$

En la siguiente tabla se muestra las dimensiones de la torre de enfriamiento piloto

**Tabla 5.8. Dimensiones de la torre de enfriamiento Piloto.**

Kxa	1494.670
Área de la integral de diseño	1.44365
Volumen neto de transferencia	0.1143m <sup>3</sup>

A partir del valor del coeficiente de transferencia se puede dimensionar la capacidad del sistema de ozonificación necesario para el tratamiento de la empaquetadura de la torre de enfriamiento piloto.

Sin embargo la empaquetadura de la torre de enfriamiento piloto es de baja eficiencia, además de que se esta buscando el volumen neto de contacto entre el aire y agua en el seno de la empaquetadura.

La empaquetadura de nuestra torre de enfriamiento piloto no es del perfil que se necesita para un tratamiento con ozono; por lo tanto se propone una empaquetadura de plástico de alta eficiencia y del material que regularmente se hacen los rellenos de las torres de enfriamiento. Esta

empaquetadura, es un material con el cual se conoce por un estudio previo su coeficiente de transferencia de materia y energía.

Para dimensionar la empaquetadura de la torre de enfriamiento propuesta a ser candidata al tratamiento con ozonificador, bastará rellenar la torre con esta empaquetadura, así para conocer el volumen de contacto bastará sustituir el coeficiente de transferencia conocido en la ecuación 5.7.

El coeficiente de transferencia nos indica el grado en el que se esta transfiriendo la cantidad de masa.

Con el fin de que podamos dimensionar una torre de enfriamiento y todos los componentes, se usará el siguiente dato de coeficiente de transferencia para la empaquetadura propuesta:

$$Kxa = 4637.41 \frac{Kg}{hm^3}^{17}$$

Con el coeficiente de transferencia propuesto, se procede a calcular la nueva altura y el nuevo volumen de transferencia de nuestra torre de enfriamiento Piloto.

$$v = \frac{(47.76^{\circ}C - 21.84^{\circ}C) \left(1 \frac{Kcal}{Kg^{\circ}C}\right) \left(\frac{1KgH_2O}{h}\right)}{0.88 \left(22.75773 \frac{Kcal}{Kg}\right) \left(4637.41 \frac{Kg}{hm^3}\right)} = 0.0368m^3$$

$$v = 0.03681m^3 = 36.81l$$

A partir del volumen establecido para la empaquetadura propuesta se pretende establecer la capacidad y dimensionamiento del ozonizador mediante la siguiente memoria de cálculo.

#### 5.4 Memoria de cálculo para el dimensionamiento de un sistema ozonificador para una torre de enfriamiento.

A partir de las ecuaciones de diseño que se establecieron en el capítulo 3 y después de conocer el volumen de contacto por la empaquetadura de la torre de enfriamiento, se procede a diseñar la capacidad de producción de la lámpara ozonificadora.

Se parte de la ecuación de diseño 3.4

$$W = 4fCgEo \left[ Em - \left(\frac{Cg - Ca}{Cg}\right) Eo \right]$$

Se seleccionan los datos pertinentes.

<sup>17</sup> <http://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/1968/1/3955.pdf>

$f$  = frecuencia, en el caso de la corriente que llega a la red mas comúnmente usado.

$C_g$  = La capacitancia del dieléctrico y esta dada por la ecuación 3.5

$$C(f) = \frac{(2\pi\epsilon\epsilon_0L)}{\ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right)}$$

$C_a$  = Capacitancia del intervalo de descarga.  $C$  = Capacitancia de un capacitor en nuestro caso de geometría cilíndrica.

Recordando que:

$\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$  F siendo La constante dieléctrica absoluta.

$\epsilon = 6$  constante relativa del dieléctrico siendo vidrio 3.78 para vidrio de borosilicato y 5.6 de vidrio Pyrex.

Para el cálculo del potencial pico se tiene la siguiente ecuación según el tipo de dieléctrico:

Ecuación 5.56	$\Delta V = E_{max} \times d$
---------------	-------------------------------

Donde  $E_{Max}$  esta determinada por la resistividad del dieléctrico para el vidrio de borosilicato:

$$E_{max} = 8 \times 10^6 \text{ v/m}$$

$d$  = Espesor del dieléctrico,  $d = 5\text{mm} = 0.005\text{m}$

$$\Delta V = Em = 8 \times 10^6 \text{ v/m} \times 0.0025\text{m} = 20000\text{v} = 20\text{Kv}$$

Para calcular el potencial máximo de excitación se tiene la siguiente ecuación 3.10.

$$E_0 = Em \text{Sen}(2\pi wt)$$

Dado que:

Ecuación 5.57	$w = \frac{2\pi}{T}$
---------------	----------------------

Donde  $T$  es el periodo en el que una onda completa un ciclo:

A su vez

Ecuación 5.58	$f = \frac{1}{T}$
---------------	-------------------

Sustituyendo y arreglando la ecuación toma la siguiente forma:

Ecuación 5.59

$$E_0 = 20000 \text{Sen}(2\pi x f * t)$$

Como se dijo en la sección 3.4 el valor del voltaje  $E_0$  quedara determinado por el valor de la ecuación 3.8 y 3.9 según sea el tipo de gas de alimentación a la celda de generación de ozono, asignando como variable de control la presión del gas que pueda ejercer este en el punto en el segmento de la celda de ozonificación.

Mediante ecuación 3.1 se puede calcular la estequiometria de la reacción de producción de ozono, mediante el siguiente ejemplo se muestra la memoria de cálculo para encontrar la energía necesaria para la producción de 1 gramo de ozono.

Para 1 gramo de ozono.  $3O_2 \rightarrow 2O_3$

La masa molecular de ozono.  $\mu = 48 \frac{g}{mol}$

Calculando el número de moles contenidos en 1 gramo de ozono da como resultado:

$$\vartheta = \frac{\text{masa}}{\mu} = \frac{1g}{48 \frac{g}{mol}} = 0.02083 \text{ mol de } O_3$$

A partir de la estequiometria de la reacción se tiene que

$$0.02083 \text{ mol de } O_3 \times \frac{3 \text{ moles de } O_2}{2 \text{ moles de } O_3} = 0.031245 \text{ moles de } O_2$$

A partir de la relación del número de moléculas con el número de moles a través del número de Avogadro es:

Ecuación 5.60

$$1 \text{ mol} = 6.023 \times 10^{23} \text{ particulas}^{18}$$

Siendo nuestra entidad fundamental la molécula de oxígeno que se separa para liberar átomos de oxígeno y estos a su vez formar moléculas de ozono.

Se tiene por lo tanto que:

$$0.031245 \text{ moles de } O_2 \times \frac{6.023 \times 10^{23} \text{ moléculas de } O_2}{1 \text{ mol de } O_2} = 1.88 \times 10^{22} \text{ moléculas de } O_2$$

Dado que se requieren 7eV para la ruptura de 1 molécula de oxígeno según la ecuación 3.2, por lo tanto se requieren **1.317 x 10<sup>23</sup> eV** (electrón volts) para romper 1.88 x 10<sup>22</sup> moléculas de oxígeno y así formar 1 gramo de ozono.

<sup>18</sup> Raymond Chang Química , sexta edición ED MC GRAWHILL P.P 71

De la siguiente definición:

(Electronvolts) eV se define como la energía que un electrón o (protón) gana o pierde al moverse a través de una diferencia de potencial de 1V. Puesto que  $1V = 1J/C$  y puesto que la carga fundamental es de aproximadamente  $1.6 \times 10^{-19} C$ , el electronvolts se relaciona con el joule de la manera siguiente:

Ecuación 5.61	$1eV = 1.602176462 \times 10^{-19} C \times V = 1.6 \times 10^{-19} J^{19}$
---------------	---

A partir de la definición anterior se puede calcular la cantidad de energía en joule que se necesitó para la producción de 1 gramo de ozono.

$$1.317 \times 10^{23} eV \times \frac{1.602176462 \times 10^{-19} J}{1eV} = 21100.664 J$$

21.100 KJ equivalente a 5041.011 Calorías, o 5.041011 Kcal.

Comparando con la energía que se necesita para producir un Kilogramo de ozono que es de 721 Kcal, la cantidad teórica de producción de 1 gramo de ozono se puede considerar como aceptable.

Utilizando la siguiente ecuación podemos determinar la cantidad de energía W-h (watt- hora) que se necesita teóricamente para la producción de 1 gramo de ozono.

Ecuación 5.62	$1ev \approx 4.4505 \times 10^{23} W.h$
---------------	---

$$1.317 \times 10^{23} ev \times \frac{4.4504 \times 10^{-23}}{1ev} = 5.86 W.h$$

Considerando que los ozonificadores comunes comerciales requieren alrededor de 16.5 kW-h para producir un kilogramo de ozono, esta cantidad de producción de un gramo de ozono se también se puede considerar correcta, teniendo en cuenta que es un análisis teórico y que la producción neta de ozono se debe a diversos parámetros de diseño y operación, además de que una gran parte de la energía consumida se pierde en forma de calor. Pero este análisis es un buen acercamiento de la cantidad de potencia que se requiere para producir una cierta cantidad de ozono requerida.

A partir de la ecuación de Manley ecuación 3.4 se procede a tratarla algebraicamente para dejar términos indicados y las variables pertinentes para el diseño de nuestra lámpara ozonificadora.

Se despeja el término  $E_m$  de la ecuación 3.10 de Manley, quedando como resultado:

<sup>19</sup> Serway Beichner; Física para ciencias e ingeniería, Tomo II, MC GRAWHILL 5 Edición, P.P 771

$$Em = \frac{w}{\frac{4fCg^2Es}{Cg + Ca}} + Es$$

Sustituyendo la ecuación 3.15 para inyectar aire como gas de alimentación y sustituyendo las capacitancias de nuestra lámpara de ozonificación con geometría cilíndrica y arreglando algebraicamente la ecuación da como resultado:

Ecuación 5.63	$Em = \frac{w \left[ \ln\left(\frac{re_1}{ri_1}\right) \left[ \epsilon \ln\left(\frac{re_2}{ri_2}\right) + \ln\left(\frac{re_1}{ri_1}\right) \right] \right]}{8f\pi\epsilon_0 L \epsilon^2 \ln\left(\frac{re_2}{ri_2}\right) (26.64Pd + 1350)} + 26.64Pd + 1350$
---------------	--

Esta ecuación es el resultado del análisis de la ecuación de diseño de Manley que nos proporciona las variables a controlar, las dimensiones de nuestra lámpara generadora de ozono y la cantidad de voltaje que requerimos para generar la cantidad de ozono para nuestra aplicación deseada.

El término w que nos indica la potencia requerida para generar nuestra cantidad de ozono es determinado por la siguiente ecuación:

Ecuación 5.64	$w = \frac{Pd}{ef} \left( \frac{1000w}{1kw} \right)^{20}$
---------------	---

Esta ecuación nos indica el cálculo de la potencia requerida por la celda generadora de ozono y ésta depende de la eficiencia que se espera alcanzar con la lámpara. La eficiencia de la celda generadora real queda determinada por el tipo de gas de alimentación así como de la temperatura de operación de la lámpara, la eficiencia puede ser obtenida mediante el **Anexo A1**.

El termino Pd es la producción deseada en (g/h). Este es el cálculo de una celda generadora de ozono y se basa en la cantidad de ozono que se desea producir para cubrir a una cierta aplicación, que para esta tesis es la cantidad de agua necesaria para tratar la empaquetadura de la torre de enfriamiento.

La producción de ozono es calculada mediante la siguiente ecuación:

Ecuación 5.65	$Pd = DsCl$
---------------	-------------

Dónde:

Ds = La dosificación de ozono en (g/L) es decir la cantidad de ozono necesaria para desinfectar un litro de agua.

Esta dosificación puede encontrarse experimentalmente, mediante la estimación de la cinética de consumo de ozono en el agua, para cada caso

---

<sup>20</sup>Tesis: Diseño y construcción de un generador de ozono para aplicaciones de purificación de agua, Centro nacional de investigación y desarrollo tecnológico pág. 61.

especifico. Otra forma de estimarla es aplicando las reglas de desinfección establecidas por los microorganismos que rigen estas aplicaciones.

CI = La capacidad de desinfección del sistema (l/h), es decir la cantidad de agua que se desea desinfectar en una hora.

Parámetros que se deben de considerar en el diseño de un sistema generador de ozono:

- Sistema de enfriamiento.
- Tipo de gas a utilizar, sea Aire u oxígeno puro.
- El potencial del trabajo requerido para la generación de ozono dadas por las ecuaciones 3.8 y 3.9.
- La frecuencia de operación.
- El voltaje suministrado.
- El punto de aplicación donde será suministrado el ozono.
- Sistema de dosificación de ozono al agua, sea por burbujeo o por inyección de un tubo Venturi.

### **5.5 Estimación de la aplicación de ozono la torre de enfriamiento.**

Posteriormente de haber obtenido el dimensionamiento de la torre de enfriamiento así como el volumen donde se lleva la transferencia neta de calor en la empaquetadura, y se produce el contacto íntimo entre el aire y el agua; se debe de analizar en que punto de la torre de enfriamiento es el más adecuado para aplicar la corriente de ozono. Así mismo se debe de tener en cuenta como parámetro las condiciones en las que se encuentra la torre de enfriamiento.

Dichas condiciones son pertenecientes a los parámetros de operación así como de las condiciones físicas en las que se encuentra el relleno interno de la torre.

Otro parámetro importante a analizar es el material con el que esta construida la torre de enfriamiento para evaluar si la torre es candidata a una aplicación de ozono.

El tratamiento con Ozono está **forzosamente** determinado por el tiempo de dosificación, este tiempo está en función del volumen que se desea ozonificar así como del tipo de bacteria que se desea desinfectar.

El ozono tiene la versatilidad de ser aplicado tanto en el agua o en el aire, ambos componentes para la torre de enfriamiento, sin embargo la configuración de la torre será el parámetro mas importante a considerar para esta aplicación:

**Torres de tiro natural atmosféricas:** de flujo cruzado y de flujo forzado. Debido a la configuración de la torre de enfriamiento, el ozono debe ser aplicado directamente en el agua. Esta aplicación mantendrá la empaquetadura limpia de microorganismos debido a que el agua que cae libre de bacterias por la torre de enfriamiento además de que arrastrará moléculas de ozono que van eliminando bacterias que se hayan depositado en la empaquetadura al interior la torre de enfriamiento.

**Torres de tiro mecánico a contraflujo:** Para este caso especial el ozono puede liberarse en el aire que proviene del ventilador situado en la parte inferior de la torre de enfriamiento.

Sin embargo en este punto de aplicación debe de tener un estricto control en la manipulación de ozono, debido a que no debe escapar ozono al ambiente. Para esta aplicación se debe de colocar un sistema de destrucción de ozono en la salida de la torre de enfriamiento. Otro mecanismo de control que se debe de tener en cuenta para que se pueda aplicar ozono en la línea de aire es el siguiente; la concentración de ozono no debe de ser mayor a **0.11 ppm (partes por millón)** por metro cubico en un promedio de 1 hora o 0.08 ppm promedio, en un lapso de 8 horas,<sup>21</sup> esta cantidad no debe de estar presente en los alrededores de la torre de enfriamiento donde exista la presencia de personas que puedan estar expuestas. Esto esta dictaminado por la norma oficial mexicana donde se establece los límites máximos permisibles para una persona que esta en contacto directo con el ozono.

Con base a lo anterior se puede realizar una estimación de la aplicación directa de ozono tomando todas las consideraciones de diseño y las restricciones que implica la instalación de un ozonificador en una torre de enfriamiento.

Para el caso de nuestra torre de enfriamiento planteada se considera que se debe de tratar un volumen neto de la torre de  $0.0368 \text{ m}^3$ , este volumen es el volumen neto de contacto entre el agua y el aire, y por ende el volumen que es susceptible de proliferación de bacterias. Estas bacterias estarán adheridas a la empaquetadura que ocupan este volumen. La aplicación por lo tanto de ozono para este volumen esta en función del tiempo de aplicación así como de la concentración necesaria para lograr la eliminación de las bacterias.

Mediante la memoria de cálculo de la sección 5.5 se establece la cantidad de ozono que se requiere para la desinfección del volumen de  $0.0368 \text{ m}^3$  o 36.8L. Aplicado en el aire se debe cumplir que la concentración debe ser menor a 0.11ppm o  $216 \mu\text{g}$  (microgramos)/ $\text{m}^3$  en el aire.

La aplicación idónea para este tratamiento radica en la incursión de ozono en el servicio de agua de la torre de enfriamiento.

Ahora bien la pregunta idónea es: ¿Cuánto ozono se debe suministrar para tratar estos 38.8L de agua? Existe una regla general de desinfección de agua, con la que nos puede dar una estimación para el tratamiento de agua con ozono. Este parámetro es llamado  $C \times T$ , que es el producto de la concentración de ozono en el agua por tiempo de dosificación.<sup>22</sup>

Por ejemplo: Si se tiene un volumen de 1 litro de agua que se desea tratar y se mantiene una concentración de 0.3 ppm durante un tiempo de 4 minutos, esto nos dará como resultado  $0.3 \times 4 = 1.2$ ; este parámetro nos indica que la desinfección no será del todo adecuada para ciertas especies de bacterias. Por el contrario si mantenemos una concentración de 0.5 ppm durante un tiempo de 4 minutos esto nos dará  $0.5 \times 4 = 2$ , el volumen de agua estará desinfectado para bacterias resistentes. Esto quiere decir que las bacterias resistentes con un valor  $C \times T$  por arriba de 1.2 habrán sido destruidas. La Teoría de este producto se expone en el **Anexo 2**.

<sup>21</sup> <http://www.sma.df.gob.mx/sma/links/download/archivos/nom-020-ssa1-1993.pdf> Norma oficial Mexicana NOM-020SSA1-1993.

<sup>22</sup> <http://fgingeneria.com.ar/downloads/publicaciones/es/el-abc-ozono.pdf>



El agua que se desea tratar también debe de ser analizada, dependiendo del perfil de agua que ingrese a la torre de enfriamiento, se deberá de establecer la concentración y el tiempo de aplicación para la eliminación de los microorganismos que afectan a la empaquetadura. Como referencia se tiene la siguiente tabla:

**Tabla 5.9 Referencia de parámetro CxT para microorganismos<sup>23</sup>.**

<b>Especie</b>	<b>Concentración ppm</b>	<b>Tiempo min</b>	<b>CxT</b>
<b>Salmonella</b>	<b>0.48</b>	<b>3.44</b>	<b>1.65</b>
<b>Listeria</b>	<b>0.5</b>	<b>3.6</b>	<b>1.8</b>
<b>Shigella sonnei</b>	<b>0.5</b>	<b>1.75</b>	<b>0.87</b>
<b>Shigella sonnei</b>	<b>0.88</b>	<b>1.35</b>	<b>1.18</b>
<b>Escherichia coli</b>	<b>0.5</b>	<b>1.13</b>	<b>0.56</b>
<b>Escherichia coli</b>	<b>0.98</b>	<b>0.67</b>	<b>1.1</b>
<b>Pseudomona</b>	<b>0.4</b>	<b>8.33</b>	<b>3.3</b>
<b>Pseudomona</b>	<b>0.6</b>	<b>4</b>	<b>2.4</b>
<b>Legionella</b>	<b>0.3</b>	<b>1</b>	<b>0.3</b>

Los datos anteriores nos indican que si el agua que deseamos tratar en nuestra torre de enfriamiento o equipo industrial contiene Legionella, será necesario aplicar una concentración de 0.3 ppm durante un tiempo de 1 minuto en un volumen de 1 litro de agua para exterminar la Legionella de este volumen de agua.

En base a estos datos se tiene que el volumen de la torre calculada anteriormente es de 36.81 litros en la parte neta de transferencia en la empaquetadura, por lo tanto este es el volumen a tratar. Cabe aclarar que estos 36.81 litros es el volumen de control que pasa en el interior de la torre, no es un volumen de agua estático, por lo tanto la cantidad de ozono que debe de arrastrar el agua para cubrir esta zona debe ser la cantidad que se requeriría para tratar los 36.8 litros de agua corriente. Donde se transfiere el calor, también debe de ser un flujo que nos entregue la concentración de ozono requerida para tratar este volumen de empaquetadura.

**Se eligió una Base de producción de ozono de 200 mg/h** (*miligramos de ozono en una hora, la elección fue en base a que pudimos contar con la experiencia de fabricantes*) y confirmado por el valor  $C \times T = 0.652$ , aplicando un tiempo de 3 minutos por litro, con base en esto la concentración final a la que salga el ozono se determinará del flujo de gas vehículo y el tipo de gas vehículo que se introduzca para la conversión de ozono en la lámpara ozonificadora. El ozonificador comercial que se utilizó fue de marca Biozon®, el cual nos fue proporcionado datos técnicos, además de poder tener datos

<sup>23</sup> <http://www.mongarco.cl/doc.tecnicos/Generalidades%20del%20Ozono.pdf>

experimentales. Este ozonificador se considera como el punto de partida para la realización de esta tesis y del análisis del diseño de ozonificación para sistemas industriales.

El resultado de esta concentración entrará en contacto con 0.073L/s (2.22L/min) que es el flujo de agua con que se está trabajando la torre de enfriamiento.

De la producción de ozono, se determina la cantidad de ozono que libera en un segundo:

$$200 \frac{mg}{h} \times \frac{1h}{3600s} = 0.055 \frac{mg}{s}$$

Si dividimos la producción de ozono de nuestra lámpara ozonificadora entre un caudal de gas vehículo y suponiendo una conversión de reacción del ozono al 100% (todo el gas que entra a la lámpara ozonificadora se convierte en ozono) encontraremos una concentración de ozono. En **primera instancia** se elige flujo de gas vehículo en misma proporción que el flujo de agua, 0.37L/s, para tener una relación 1 a 1 entre los dos flujos, agua y mezcla de aire ozono inyectado a la tubería donde pasa la corriente de agua.

$$\frac{0.055 \frac{mg}{s}}{0.037 \frac{L}{s}} = 1.486 \frac{mg}{L}$$

Siguiendo el protocolo desarrollado en la sección 5.4 para el diseño de nuestra lámpara ozonificadora.

Requerimos 200 mg de Ozono en base de una hora, (se debe recordar que no se deberá aplicar toda la cantidad de ozono en una hora, si no que se deberá aplicar por periodos de tiempo cortos), en una lámpara de ozonificación se toma como base 1 hora para ajustar a la ecuación de diseño. Las lámparas comerciales de ozonificación se cotizan en producción de ozono por hora.

$$200mg \times \frac{1g}{1000mg} = 0.2gO_3$$

Calculando la cantidad de moles presentes en 0.2g O<sub>3</sub>, dividimos entre la masa molecular de ozono.

$$\frac{0.2gO_3}{48 \frac{g}{mol}} = 4.166 \times 10^{-3} molO_3$$

De la estequiometría de la reacción representada en la ecuación 3.1.

$$4.166 \times 10^{-3} \text{ mol } O_3 \times \frac{3 \text{ mol } O_2}{2 \text{ mol } O_3} = 6.25 \times 10^{-3} \text{ mol } O_2$$

Se calcula el número de moléculas presentes en  $6.25 \times 10^{-3} \text{ mol } O_2$ .

$$6.25 \times 10^{-3} \text{ mol } O_2 \times \frac{6.023 \times 10^{23} \text{ moléculas } O_2}{1 \text{ mol } O_2} = 3.76 \times 10^{21} \text{ moléculas } O_2$$

Este dato nos indica que durante una hora (1h)  $3.76 \times 10^{21}$  moléculas de oxígeno se romperán para darnos 200 mg de ozono.

Dado que se requiere 7 eV para transformar una molécula de oxígeno en ozono, por lo tanto para transformar  $1.32 \times 10^{18} O_2$  se requiere:

$$3.76 \times 10^{21} \text{ moléculas } O_2 \times 7 \text{ eV} = 2.635 \times 10^{22} \text{ eV}$$

Transformando la cantidad de electronvolts y se transforma en joule tomando la ecuación 5.62.

$$2.635 \times 10^{22} \text{ eV} \times \frac{1.602176462 \times 10^{-19} \text{ J}}{1 \text{ eV}} = 4221.83 \text{ J}$$

Equivalente a 1008.60 Calorías.

Convirtiendo  $2.635 \times 10^{22} \text{ eV}$  nos da como resultado:

$$2.635 \times 10^{22} \text{ eV} \times \frac{4.4504 \times 10^{-23}}{1 \text{ eV}} = 1.0525196 \text{ W} \cdot \text{h}$$

Tomando en cuenta que esta producción está calculada para suministrar esta potencia o cantidad de energía durante 1 hora; por lo tanto requerimos 1.0525196 w para producir 200 mg de ozono durante una hora.

Este análisis teórico fue realizado sin considerar la presión del gas o el dimensionamiento de la lámpara ozonificadora. El dato técnico de este ozonificador comercial nos muestra que tiene un consumo de 17 watts en su funcionamiento, por lo tanto el equipo solo necesita el 6.2% para producir ozono mientras que el 93.8% se gasta en forma de calor.

### 5.5.1 Estimación de la aplicación de ozono en la torre de enfriamiento usando aire como gas vehículo.

Se decide, en este punto cómo se va a introducir el oxígeno en nuestra lámpara ozonificadora, se concluye que será mediante la inyección de aire por razones económicas y de operación óptima. Por lo tanto se realiza el siguiente análisis para estimar la cantidad de ozono que se estará liberando al interior de la torre de enfriamiento.

La composición del oxígeno en el aire es de 20.946% <sup>24</sup> por lo tanto se tiene que:

$$\left(200 \frac{mg}{h} \times \frac{1h}{60min}\right) * 0.20946 = 0.6982 \frac{mg}{min}$$

Esta es la cantidad de ozono que puede producir nuestro ozonificador por minuto a partir de aire; si se hace fluir el aire con un flujo continuo fijado en 0.037L/s o 2.22L/min se tiene que:

$$Ds = \frac{0.6982 \frac{mg}{min}}{2.22 \frac{L}{min}} = 0.3145 \frac{mg}{L}$$

Que pertenece a la dosificación Ds.

**Con la producción de ozono señalada y con el flujo de aire que entra a la lámpara ozonificadora así como la determinación de convertir el oxígeno presente en el aire, se estima que en un minuto hay 0.3145 mg para tratar por litro de aire**, de esta forma habrá 0.3145 mg presentes por litro de agua a tratar dentro de la torre de enfriamiento, además de que este parámetro se basa en la solubilidad de ozono en agua.

La experiencia de los fabricantes nos dice que, **un ozonificador que produce 220 mg/h** y que provee una concentración de 0.346 mg/L a un flujo de **2.22 L/min**, puede tratar: 1 litro de agua en 1 minuto, 3 litros de agua en 3 minutos, 10 litros de agua en 6 minutos y 20 litros de agua en 8 minutos. Estos datos son comprobables al ozonificador comercial Marca Biozon® mediante un análisis de laboratorio, mismo que es congruente con análisis teórico. A partir de estos datos se procede a estimar el tiempo de aplicación de nuestra lámpara de ozono a diferentes producciones manteniendo la misma cantidad de flujo de aire.<sup>25</sup>

Así mismo se debe determinar el perfil de agua así como del volumen que se va a tratar. Partiendo de un perfil de agua con Legionella 0.3.

**Tabla 5.10: Aplicación de ozono en torre de enfriamiento con un flujo de aire de 2.22 l/min en un volumen de 1 litro.**

Producción de Ozono mg/h	Concentración	PPM	Tiempo (min)	CxT	Tiempo Total de Tratamiento
220 mg/h	0.346 mg/L	0.24	1.5 min	0.36	55,215 min
200 mg/h	0.3145 mg/L	0.21	1,5 min	0.315	55,215min
400 mg/h	0.629 mg/L	0.43	0.7 min (42s)	0.301	25,767 min
100 mg/h	0.157 mg/L	0.108	3min	0.1	110,43 min

<sup>24</sup> <http://es.wikipedia.org/wiki/Aire>

<sup>25</sup> <http://www.basktek.com.mx/>

Mediante la tabla anterior se puede analizar que, mientras más producción de ozono presente la lámpara generadora de ozono, menor tiempo de aplicación se deberá tener al ozonificar la cantidad de agua establecida para la torre de enfriamiento. Así pues, se puede jugar con la producción de ozono de los sistemas de desinfección y se tendrá como resultado una variante de tiempo. En nuestro análisis anterior se observa que la producción más conveniente para trabajar es de 400 mg/h de ozono que es el menor tiempo de operación. La tabla anterior fue estimada para el perfil de agua con la bacteria de Legionella como principal contaminante o formador de biopelícula.

Sin embargo el agua que sea parte del proceso de enfriamiento puede tener una concentración de bacterias más resistentes como el caso de **Escherichia coli con un CxT de 1.1**; para este caso solo será necesario incrementar el tiempo de aplicación de ozono. Así de esta forma tendríamos que para una producción de 400 mg/h de ozono, se necesitaría un tiempo de ozonificación de 92 min. Para este caso es recomendable usar como protección un destructor de ozono en la parte superior de la torre de enfriamiento, o en su caso, en las salidas de vapor por arrastre.

Ahora bien esta concentración de ozono fue tomada a partir de un flujo constante de gas vehículo de 2.22 l/min para igualar el flujo de agua que entra a la torre de enfriamiento; sin embargo este flujo nos arroja una concentración que al multiplicar por el tiempo de ozonificación dosificada, nos da un resultado de 25.767 min, esto no es congruente con el flujo de agua, por que el paso de los 36,81 litros de agua en el interior de la torre de enfriamiento a un flujo de 2.22 l /min, serán cubiertos en un tiempo de 16,58 min, por lo tanto el tiempo calculado será insuficiente para tratar los 36.81 litros totales al interior de la torre de enfriamiento. Ante esta discordancia se debe de ajustar el flujo para elevar la concentración de ozono. Este ajuste reducirá el tiempo de dosificación en el parámetro CxT, y por lo tanto disminuirá el tiempo de aplicación del flujo total de agua que deseamos tratar.

**Así ajustando se tiene que se necesitaría un flujo de 1.2 L / min para obtener una concentración de 0.8043 ppm, esta concentración será liberada en 36.81 litros de agua durante 16.56 min.**

La memoria de cálculo es la siguiente:

Un flujo de 1.2 L/ min

Calculando la cantidad de ozono con aire como gas vehículo se tiene que:

$$\left(400 \frac{mg}{h} \times \frac{1h}{60min}\right) * 0.20946 = 1.3964 \frac{mg}{min}$$

Producción de la lámpara ozonificadora. 400 mg /h  $\approx$  1.4 mg /min (Trabajando con aire).

Dividiendo entre el flujo de aire:

$$\frac{1.4 \frac{mg}{min}}{1.2 \frac{L}{min}} = 1.163 \frac{mg}{L} = 0.00163 \frac{\mu g}{L}$$

Dividiendo entre la densidad del ozono, tomado a presión y temperatura ambiente.

$$\frac{0.00163 \frac{\mu g}{L}}{0.001446662 \frac{\mu g}{L}} = 0.803$$

Este valor es dado la concentración de ozono en un millón de partes a partir de su densidad.

$$[ppm_{O_3}] = 0.803$$

El valor CxT:

$$0.803ppm \times 0.45s = 0.3619$$

El valor 0.45s fue ajustado para tratar un litro de agua, por lo tanto con una concentración de 0.803 ppm, tardara 0.45 s para desinfectar para Legionella.

$$36.81L \times 0.45 = 16.5645$$

Para tratar nuestro volumen de 36.81 L, el sistema ozonificador podrá desinfectar para Legionella en 16.56 min, el tiempo necesario en el que el volumen de agua cubrirá el volumen de la empaquetadura.

Habiendo fijado una producción de la lámpara ozonificadora en 400 mg / h de ozono, se procede a calcular la cantidad de energía que se necesita para nuestra aplicación en la torre de enfriamiento.

$$400mg \times \frac{1g}{1000mg} = 0.4gO_3$$

Calculando la cantidad de moles presentes 0.4g O<sub>3</sub>, dividimos entre la masa molecular de ozono.

$$\frac{0.4gO_3}{48 \frac{g}{mol}} = 8.33 \times 10^{-3}molO_3$$

De la estequiometria de la reacción representada en la ecuación 3.1.

$$8.33 \times 10^{-3}molO_3 \times \frac{3molO_2}{2molO_3} = 0.012495molO_2$$

Se calcula el número de moléculas presentes en 0.012495 molO<sub>2</sub>.

$$0.012495 \text{ molO}_2 \times \frac{6.023 \times 10^{23} \text{ moléculasO}_2}{1 \text{ molO}_2} = 7.525 \times 10^{21} \text{ moléculasO}_2$$

Dado que se requiere 7 eV para transformar una molécula de oxígeno en ozono, por lo tanto para transformar  $1.32 \times 10^{18}$  O<sub>2</sub> se requiere:

$$7.525 \times 10^{21} \text{ moléculasO}_2 \times 7 \text{ eV} = 5.268 \times 10^{22} \text{ eV}$$

Convirtiendo esta cantidad de electronvolts en watts hora se tiene que:

$$7.525 \times 10^{22} \text{ eV} \times \frac{4.4504 \times 10^{-23}}{1 \text{ eV}} = 3.35 \text{ w. h}$$

Transformando la cantidad de electronvolts y se transforma en joule tomando la ecuación 5.62.

$$5.268 \times 10^{22} \text{ eV} \times \frac{1.602176462 \times 10^{-19} \text{ J}}{1 \text{ eV}} = 8443.67 \text{ j}$$

Equivalente a 2017.21 Calorías.

Para lograr que nuestra lámpara ozonificadora pueda generar el ozono requerido, es necesario estimar la cantidad de voltaje que se necesita para que se genere la descarga corona.

Esto se logra con las siguientes dimensiones de lámpara de ozonificación:

Tubo Externo de vidrio: 1 in.

Tubo Interno de Acero: ¾ in.

Longitud de lámpara 0.15 m.

Intervalo de descarga: 2.175 mm

Con la ecuación modificada de Manley para un diseño geométrico cilíndrico se calcula el voltaje de operación de la lámpara ozonificadora. Para ello primeramente se procede a calcular la potencia de la lámpara mediante la ecuación 5.65 utilizando la eficiencia para aire a condición ambiente presentada en el **Anexo 1**.

$$w = \frac{Pd}{ef} \left( \frac{1000 \text{ w}}{1 \text{ kw}} \right)$$

Donde la eficacia Máxima es:

$$ef = 34.58 \frac{g}{kw - h}$$



La producción estimada de nuestra lámpara es de 0.4 g/h.  
La potencia es por lo tanto:

$$w = \frac{0.4 \frac{g}{h}}{34.58 \frac{g}{kw-h}} \left( \frac{1000w}{1kw} \right) = 11.56 \text{ watts}$$

Esta potencia es la que se requerirá para sustituir en la ecuación 5.65 así mismo también tomando las dimensiones requeridas:

$$Em = \frac{w \left[ \text{Ln} \left( \frac{re_1}{ri_1} \right) \left[ \in \text{Ln} \left( \frac{re_2}{ri_2} \right) + \text{Ln} \left( \frac{re_1}{re_1} \right) \right] \right]}{8f\pi \epsilon_0 L \epsilon^2 \text{Ln} \left( \frac{re_2}{ri_2} \right) (26.64Pdg + 1350)} + 26.64Pdg + 1350$$

*Em*

$$= \frac{11.56 \left[ \text{Ln} \left( \frac{0.00635}{0.019} \right) \left[ 5.6 \text{Ln} \left( \frac{0.0101}{0.009525} \right) + \text{Ln} \left( \frac{0.00635}{0.0101} \right) \right] \right]}{8(1000)\pi(8.85 \times 10^{-12})0.156.5^2 \text{Ln} \left( \frac{0.0101}{0.009525} \right) (26.64P(0.002175) + 1350) + 26.64P(0.002175) + 1350}$$

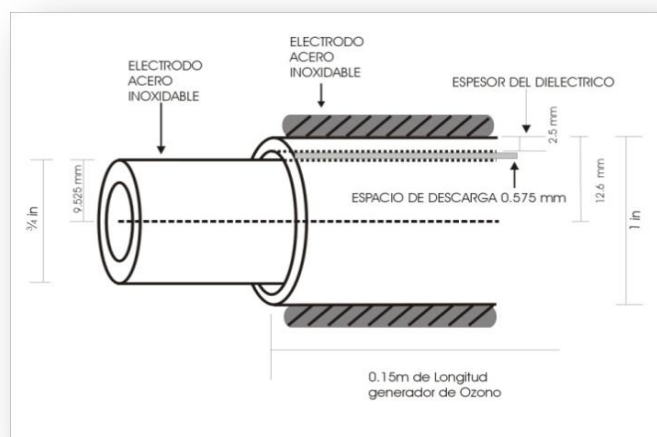
Así nuestra ecuación de diseño, solo queda en función de la presión a la que entra el gas vehículo.

Sustituyendo varias presiones a la que puede entrar el gas se tiene la siguiente lista de voltajes:

**Tabla 5.11.** Lista de voltajes según la presión del gas vehículo.

Presión	Presión	Unidades	Voltaje	Unidades
0.3atm	3.45E+04	Pascales	3,351.67	Volts
0.4atm	40530	Pascales	3,702.14	Volts
0.5atm	50662.5	Pascales	4,288.48	Volts
0.6atm	60795	Pascales	4,875.08	Volts
0.7atm	70927.5	Pascales	5,461.82	Volts
0.8atm	81060	Pascales	6,048.65	Volts
0.9 atm	91192.5	Pascales	6,635.54	Volts
1 atm	1.01E+05	Pascales	7,222.47	Volts
2 atm	202650	Pascales	13,092.70	Volts
3 atm	303975	Pascales	18,963.42	Volts

**Figura 5.3 Dimensiones de la lámpara de ozonificación Diseñada.**



A partir de la presión de operación se puede formular un protocolo a seguir para la dosificación de ozono en la torre de enfriamiento así como del rango de presiones que se debe de aplicar para no dar un sobre voltaje. Mediante la tabla 16, se puede ver que si se aplica una presión entre 0.3 atm y 0.5 atm el intervalo de voltaje estará dado entre 3571 volts y 4289 volts.

Otro punto importante a señalar es que el voltaje calculado a la presión de entrada del gas, no debe de sobre pasar el voltaje pico del dieléctrico de otra forma el tubo de vidrio corre el riesgo de fracturarse.

**Tabla 5.12: Dimensiones y características finales del sistema ozonificador.**

Dimensiones y especificaciones.	
Geometría	Cilíndrica
Tipo de gas vehículo.	Aire
Longitud	0.15 metros.
Diámetro tubo de vidrio	1 pulgada
Diámetro tubo acero	3/4 pulgada
Espacio de descarga.	2,175 mm
Material dieléctrico	Vidrio borosilicato
Voltaje	3351.67 ~4288.48 volts
Frecuencia de operación.	1 k HZ
Eficacia máxima	34.58 g/kW-h
Eficiencia máxima $\eta$	2.88%
Producción	400 mg/h
Potencia Teórica	11.56 Watts
Volumen de desinfección.	36.81 litros
Tiempo de operación.	16.56 min
Presión de operación	0.3 atm y 0.5 atm
Voltaje pico de dieléctrico	20000 volts

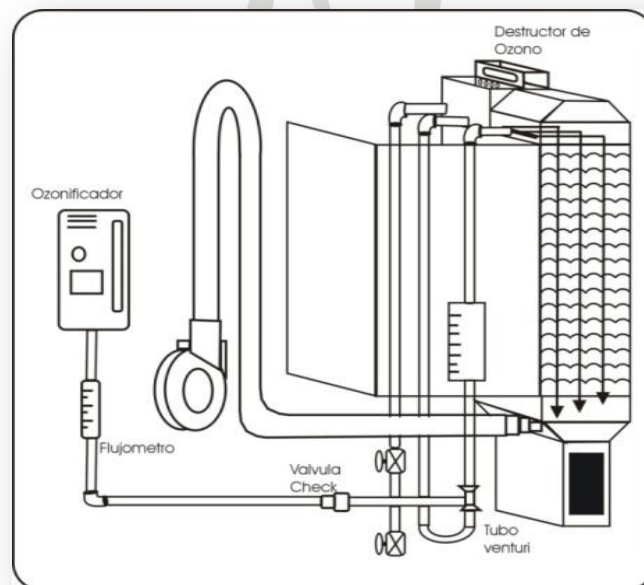
## 5.6 Instalación de equipo ozonificador en la torre de enfriamiento.

La forma mas optima para instalar un ozonificador en una torre de enfriamiento que se instale en la línea de agua es mediante un tubo Venturi conectado a la línea de agua y a la línea de ozonificación como se muestra en la figura 5.4.

El sistema ozonificador, se conecta a la linea del agua mediante un tubo venturi ademas de una valvula check. El tubo venturi garantiza la inyeccion de ozono en la corriente de agua, y la valvula check garantiza que no haya flujo de agua hacia el ozonificador. Para el caso de nuestra torre de enfriamiento tambien se puede instalar el ozonificador en la parte superior de la torre de enfriamiento mediante un burbujeador, sin embargo esto no es ideal debido al arreglo de la torre de enfriamiento en el que el reservorio de agua está a la interperie; pero en el caso de las torres de enfriamiento en el que el reservorio esta aislado del ambiente, es necesario que el ozonificador este instalado en la linea de agua. Para muchas configuraciones puede estar instalado en los rociadores de las torres de enfriamiento.

Para la salida de vapor de agua en la parte superior de la torre de enfriamiento se debe de instalar un destructor de ozono, para evitar que el ozono sea liberado al medio ambiente, de esta forma se debe garantizar que el ozono que sea introducido en la torre de enfriamiento se mantenga unicamente en el interior de la torre de enfriamiento.

**Figura 5.4 Diseño preliminar de la instalación de la torre de enfriamiento Ozonificada.**



Los materiales de la tubería con la cual se introduce el ozono al interior de la torre de enfriamiento de preferencia debe de ser de PVC, Teflon®, Viton® Vidrio, silicón, Tygon, caucho. Este tipo de materiales tienen la ventaja de ser fácilmente manejables, además de que reducen en gran medida el costo de instalación de un ozonificador en una línea de servicio de agua o para cualquier equipo industrial. Para el caso de las tuberías se debe de utilizar un material

resistente al ozono, en este caso se utilizara material de PVC<sup>26</sup>, y en el caso de la valvula Check se utilizara de PDVF (Fluoruro de polivinilo) con diafragama de Viton®<sup>27</sup> de las dimensiones pertinentes para ajustar a la linea de agua mediante el venturi. Para el caso del tubo Venturi se utiliza uno de material PDVF con las dimensiones para lograr la conexión en la linea del agua. El tubo Venturi logrará la inyección del ozono en la linea del servicio de agua. La valvula Check es un dispositivo de seguridad para evitar que el agua llegue a la lampara ozonificadora.

Para el caso en general de las torres de enfriamiento, el ozono puede inyectarse en los aspersores, así de esta forma el ozono se aplica en forma de spray (agua- aire- Ozono) en el interior de la torre de enfriamiento. La ventaja de este arreglo radica en el control independiente que existe entre la operación de la torre de enfriamiento y la operación del sistema ozonificador.

Otro factor que se debe de considerar en el momento de inyectar ozono en el interior de la tubería de la linea de agua, son las velocidades de flujo tanto del ozono como de la tubería de agua, esto es debido a que es un flujo a 2 fases, y no debe de exceder velocidades de ariete o golpeteo para no dañar la tubería de la torre de enfriamiento, aunque son casos extremos, son factores que no deben dejarse de lado.

## **5.6 Destruidores de Ozono.**

Existen en el mercado muchos dispositivos de destructores de ozono, que su función principal es destruir el ozono que no es utilizado en los procesos de tratamiento de aire o de agua en las diferentes aplicaciones industriales o domesticas. Así mismo también los diferentes destructores de ozono pueden variar en precio como en tecnología para destruir ozono.

Dentro de estos dispositivos se encuentran los cartuchos de carbón activado, los intercambiadores de calor que destruyen el ozono térmicamente, las lámparas de luz ultravioleta que convierten el ozono nuevamente en oxígeno molecular incluso hay destructores catalíticos de ozono. La correcta selección de ellos implica la reducción del costo del sistema ozonificador para los equipos industriales.

La información de los sistemas destructores de ozono indica que el mecanismo más económico para la destrucción de ozono, es el destructor catalítico de ozono. Este sistema se basa en tipo de reactor de lecho empacado con una mezcla de MnO<sub>2</sub>, sin embargo este sistema de destrucción de ozono es aplicable para ambientes en los que hay una atmosfera libre de humedad; Para el caso de nuestra torre de enfriamiento esto no es aplicable por que la salida de la torre de enfriamiento esta saturada de humedad. Esta humedad provocaría una saturación de agua en el catalizador y por lo tanto reduciría el tiempo de vida del catalizador del destructor de ozono. Para solucionar este problema los sistemas destructores combinan el sistema de catálisis con el sistema térmico para el destructor de ozono. El sistema consiste en colocar en la cámara catalítica una resistencia térmica, ésta eleva la temperatura y vaporizando la humedad expulsándola fuera del reactor. Además de que este

<sup>26</sup> <http://www.aniq.org.mx/provinilo/pvc.asp>

<sup>27</sup> <http://spanish.alibaba.com/product-gs/pvdf-3-16-ozone-resistant-spring-check-valve-kh-csp1-321030251.html>

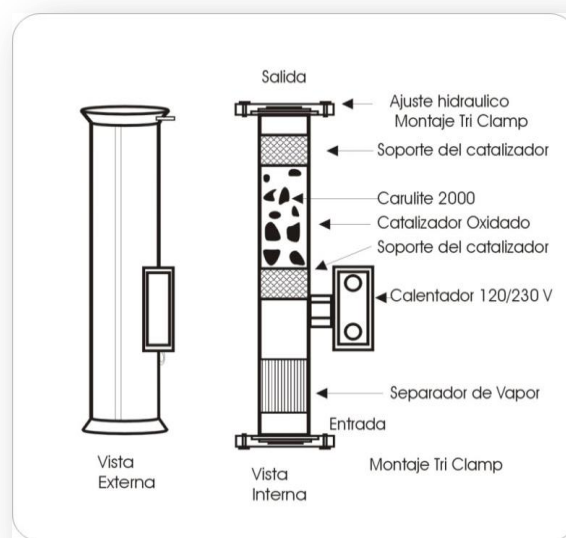
sistema de destrucción cuenta con una bomba de vacío para extraer la humedad y el oxígeno fuera del dispositivo. Este tipo de sistema es el más indicado para no tener ozono residual en el ambiente.

Por lo tanto los mecanismos de control para no liberar el exceso de ozono al ambiente son: El cálculo y operación correcta del sistema ozonificador, la correcta aplicación de un sistema destructor de ozono, así como los tiempos de operación del ozonificador. En el caso de nuestra torre de enfriamiento se opera intermitentemente.

Al no ser una dosificación de ozono constante en la torre de enfriamiento, esto asegura que se puede extender la vida del destructor de ozono.

En la siguiente figura se muestra el diseño comercial del dispositivo destructor de ozono.

**Figura 5.5 Sistema de destrucción de ozono<sup>28</sup>.**



El sistema destructor de ozono se deberá diseñar seleccionar y montar en la parte superior de la torre de enfriamiento, de tal forma que cuando se deba operar simultáneamente con el generador ozonificador, toda la masa de aire y ozono pasen por este reactor. Cuando el sistema destructor no sea operado y solo sea operada la torre de enfriamiento, la masa de agua y de aire a la salida de la torre, no pase por el destructor. Esto se lograría idealmente diseñando la torre de enfriamiento con los sistemas de ozonificación y destrucción de ozono (Torres con auto mantenimiento) en las bases iniciales del diseño. Para el caso nuestra torre de enfriamiento se puede mantener el destructor de ozono montado en la parte superior de la torre, o en algún sistema prediseñado de purga de aire, ya sea en la parte superior de la torre o en la parte inferior.

Cabe señalar que; por el perfil que nuestra torre de enfriamiento piloto tiene, el destructor de ozono puede ser opcional, la torre de enfriamiento en este caso se utilizó para el análisis del volumen de la empaquetadura y el volumen de contacto entre el agua y el aire, el reservorio de agua y la salida del vapor de agua está a temperatura ambiente, además de que en este análisis se supone que el agua

<sup>28</sup> <http://purfresh.com/library/brochures/espanol/DS-OD900-ESP-0909.pdf>

y la empaquetadura no esta sobresaturada de microorganismos, con el que se exija una gran concentración de ozono, en caso contrario (como el que comúnmente se usa en la industria) en el que si se exija una concentración alta de ozono, si será necesario un destructor de ozono. Se señala aun así este accesorio ya que no esta exento de ser parte integral del equipo ozonificador.

El Catalizador para el destructor, Carulite 200® se utiliza para destruir eficazmente el ozono emitido de diversas emisiones, la conversión del ozono Toxico a Oxígeno.

Las características del catalizador Carulite 200 son:

Partículas de medida disponibles.

- 4x8 malla granular (4.8mm x 2.4mm)
- 8x4 malla granular (2.4 mm x 1.4mm)
- Otras medidas sobre pedido.

Datos Físico Químicos.

Formula: Dióxido de manganeso/ catalizador de Dióxido de cobre. Tiene una apariencia negro marrón oscuro granulado Densidad 0.8, 0.9 g/cc de superficie  $\geq 00 \text{ m}^2 / \text{g}$ , Perdida de  $\leq 1\%$  en peso.

Tiene aplicaciones en:

- Gases residuales de potabilización de agua.
- Gases residuales de tratamiento de agua residual.
- Emisiones de tratamiento de efecto corona en equipos.
- Emisiones en los equipos de oficina
- Emisiones en los procesos químicos.

Este producto cuando se adquiere es enviado en presentación de 7 galones en bidones de polietileno, el peso del producto de los 7 galones es de 20 Kg.

Las medidas de seguridad para la manipulación de este producto son: se debe manejar con gafas protectoras y con guantes de goma o de plástico, no es un producto peligroso pero deben mantenerse las medidas de seguridad mínimas para el manejo de sustancias peligrosas.<sup>29</sup>

El destructor es fabricado en acero inoxidable y los modelos pueden manejar hasta 30 pies cúbicos por minuto de aire ozono con concentraciones de ozono del 10%. Un equipo de calefacción aumenta la temperatura del gas para evitar que se acumule vapor dentro del catalizador. El tiempo de reacción es de un quinto del tiempo de reacción requerido para la reacción térmica, mientras los requisitos de energía son mínimos.

El gas ozonificado debe de entrar por debajo de la unidad de destrucción de ozono, éste pasa por un separador de neblina y el equipo de calefacción para luego atravesar por el catalizador. El catalizador se mantiene fijo por mallas que están ubicadas en la parte superior e inferior del dispositivo.

---

<sup>29</sup> <http://www.caruscorporation.com/content.cfm/carulite-200>

Los tornillos que se encuentran en la entrada y la salida de la unidad son del tipo tri-clamp o de tipo FNTP. La unidad puede ser montada verticalmente en la pared ocupando herramientas de un solo soporte estructural y requiere un espacio de 1" de espacio libre. El destructor puede ser montado directamente encima del tanque, del cuerpo de la torre de enfriamiento o en un lugar seleccionado para la succión y destrucción de ozono.

El dispositivo destructor incluye su calefactor de 110V / 220 VAC y una caja de empalme eléctrico para la conexión de tubería y de cables. El calefactor opera constantemente y la temperatura máxima de superficie de la unidad del destructor puede llegar hasta 150° F (65°C) dependiendo también de la temperatura ambiental y del flujo dentro de la unidad.

Las marcas comerciales de este dispositivo y del catalizador son Purfresh® series 900 y Carus® respectivamente.

Cabe resaltar que este dispositivo puede ser utilizado para nuestro caso planteado, donde se está dando mantenimiento a la empaquetadura, pero también puede ser aplicado para el caso de prevención de biopelícula, para este caso el tanto el sistema ozonificador y el sistema de destrucción de ozono pueden ser aplicados desde el tanque de almacenamiento de agua.

### **5.8 Sistema de deshumidificación del ozonificador.**

El sistema ozonificador, el interior de la lámpara diseñada debe de estar libre de humedad y debe de operarse con enfriamiento ya que existen efectos que disminuyen la producción de ozono.

Es necesario controlar y modificar el contenido del vapor de agua en el aire, la operación de deshumidificación es muy usual en el aire acondicionado y en muchos procesos industriales, como el caso de nuestra ozonificación, así como en el secado de algunos productos. El contenido de vapor de agua en el aire atmosférico es muy pequeño, algunos decimos de gramo por kilogramo de aire, sin embargo, debido al muy alto calor de vaporización, el contenido de calor latente en el aire acondicionado es del mismo orden que el del calor sensible. La importancia relativa de la carga latente se incrementa con la ventilación en los edificios, es decir la cantidad de aire exterior introducida al edificio con fines de ventilación. Se requieren altas cantidades de aire de ventilación para obtener mejores condiciones de comodidad para los ocupantes de un edificio, si como lo dictan las normas internacionales más recientes como ASHRAE 62/89. Para el caso de nuestro ozonificador estas condiciones deberán ser las más óptimas para el proceso de producción de ozono, ya que con esto se puede maximizar según lo calculado la producción de ozono y así evitar las pérdidas de calor.

La deshumidificación es el proceso de retirar el vapor de agua contenida en el aire, llamada también humedad. Existen diferentes procesos para remover la humedad del aire, estos son: por enfriamiento, hasta alcanzar una temperatura por debajo del punto de rocío, por el incremento de la presión total, lo cual causa la condensación, y por último poner en contacto con un desecante con el aire, con lo cual la humedad del aire migra hacia el desecante, impulsado por la diferencia en las presiones de vapor entre el aire y el desecante.

La deshumidificación con desecantes no es un proceso de enfriamiento propiamente dicho, se considera que es opuesto a un enfriamiento evaporativo.



Antes de describir el proceso es conveniente definir ciertos conceptos que permitan entender, sin confusiones, el proceso de deshumidificación por desecantes.

Un desecante es una sustancia química que tiene una gran afinidad por la humedad, es decir, es capaz de extraer o liberar vapor de agua del aire, en cantidades relativamente grandes con relación a su peso y volumen. El proceso físico que permite la retención o liberación de la humedad es la diferencia en la presión de vapor entre la superficie del desecante y el aire ambiente. Los desecantes pueden ser clasificados como adsorbentes, las cuales absorben la humedad sin experimentar cambios químicos o físicos, o absorbentes las cuales absorben la humedad acompañado por cambios físicos o químicos. Los desecantes pueden ser sólidos o líquidos. Muchos adsorbentes son líquidos y muchos adsorbentes son sólidos. Varios tipos de desecantes sólidos son ampliamente usados en sistemas de enfriamiento por desecantes; por ejemplo la sílica gel, cloruro de litio y malla molecular. La sílica gel son desecantes sólidos y adsorbentes y contienen numerosos poros y capilares en la cual el agua es condensada y contenida. La sílica gel tiene una alta capacidad de absorber la humedad y puede regenerarse si se somete a una alta temperatura. Es de bajo costo y disponible en tamaños desde 3/16 pulgadas

Los absorbentes son desecantes que cuando retienen o liberan humedad experimentan cambios químicos. Los adsorbentes son desecantes que cuando retienen o liberan humedad lo hacen sin estar acompañados de cambios químicos, el único cambio es la adición de la masa de vapor de agua al desecante.

La deshumidificación del aire con desecantes ocurre cuando la presión de vapor de la superficie del desecante es inferior a la del aire ambiente.

Cuando el vapor de agua es absorbido la presión de vapor en el desecante se incrementa hasta experimentar el equilibrio. Este se logra cuando la presión de vapor en el desecante como en el aire son iguales. Para poder re usar el desecante es necesario regenerarlo, es decir, quitarle la humedad.

Se logra la regeneración del desecante calentándolo para que incremente su presión de vapor, seguida por el contacto con una corriente de aire que tiene una presión de vapor de agua más baja.

Los adsorbentes son materiales sólidos con una gran área de superficie por unidad de masa un simple gramo puede llegar a tener más de 4600 m<sup>2</sup> de área de superficie. Estructuralmente los adsorbentes tienen un parecido con una esponja rígida.

Los adsorbentes atraen la humedad debido al campo eléctrico en la superficie del desecante. Este campo no es uniforme en su fuerza o carga, así atrae las moléculas de agua que tienen una carga neta opuesta sobre sitios específicos de la superficie del desecante.

El comportamiento de la adsorción de los sólidos depende de los siguientes factores: el área total de su superficie, el volumen total de sus capilares y el rango en el diámetro de sus capilares.

Dentro de los sólidos adsorbentes están: el gel sílice, las zeolitas, las zeolitas sintéticas, la alúmina, el carbón activado y los polímeros sintéticos.

Ante estas consideraciones, se debe de asegurar la entrada de aire seco en el espacio de descarga del sistema ozonificador.

Se desea diseñar una columna de adsorbente de sílica gel a la entrada de aire de la lámpara ozonificadora<sup>30</sup>.

### 5.8.1 Sílica gel como agente deshumidificador.

Sílica Gel es dióxido de silicio hecho a partir de silicato sódico, existen presentaciones granular y esférica. La razón por la cual se le llama gel es porque en su proceso de fabricación se tiene que elevar la temperatura de dióxido de silicio a modo que se forma un gel uniforme, pero cuando se enfría se forman pequeñas esferas o gránulos que es lo que conocemos como sílica gel. La sílica gel no es cristalina, insoluble en agua (ni en ningún otro solvente), incolora, no flamable, ni tóxica, químicamente estable, reacciona solo con el álcali y con el ácido fluorhídrico, pero aun así las bolsas traen la leyenda No Comer y tírese. La única sílica gel que es toxica es la que tiene indicador de saturación azul, porque contiene cloruro de cobalto, el cual se torna rosa cuando se satura. El gel de sílice es el adsorbente con más capacidad de adsorción conocido actualmente. Adsorbe hasta un 40% su peso debido a que tiene gran porosidad. Se fabrican en diferentes tamaños de esferas y poros. Su porosidad es de 800 a 850 m<sup>2</sup>/gr, según el tamaño del poro se divide la sílica gel en poro fino o poro macro y tienen una capacidad de adsorción de la humedad relativa diferente, así que para escoger la sílica gel adecuado se debe saber cual será su aplicación. Es comúnmente utilizada para adsorber la humedad en espacios cerrados como cajas y embalajes. Se puede regenerar si se calienta a 180°C por 16 horas y se puede reutilizar las veces que lo permita su estructura física (hasta que se desgasta) pero se debe tomar en cuenta los contaminantes y sustancias tóxicas que se han adsorbido para pensar en reutilizar la sílica o no reutilizarse.

La sílica gel tiene propiedades únicas por su composición química que son: funcionamiento térmico estable, alta adsorción, estructura física estable, resistencia al rompimiento alta, regeneración, etc.<sup>31</sup>

La selección del desecante apropiado y la presentación de este para una aplicación específica puede llegar ser algo complejo. Para los desecantes sólidos usados en adsorción de humedad (deshidratación) se analizan las siguientes características:

- Alta capacidad de adsorción en equilibrio: Esto reduce la cantidad de **desecante** a utilizar, teniendo en cuenta el uso de torres más pequeñas con los gastos de inversión menores y la entrada de calor reducida para la regeneración.
- Alta selectividad: minimiza la eliminación indeseada de elementos y reduce los gastos generales de funcionamiento.
- Económico, no corrosivo, no tóxico, químicamente inerte, alta densidad y sin ningún cambio significativo en el volumen de adsorción del agua.
- Fácil regeneración: la temperatura de regeneración relativamente baja reduce al mínimo las necesidades globales de energía y gastos de operación.
- Que tenga baja caída de presión.

<sup>30</sup> [http://www.riraas.net/documentacion/CD\\_03/PONENCIA07.pdf](http://www.riraas.net/documentacion/CD_03/PONENCIA07.pdf)

<sup>31</sup> [http://www.silicagel.com.mx/gel\\_de\\_silice.aspx](http://www.silicagel.com.mx/gel_de_silice.aspx)

- Alta resistencia al aplastamiento, resistencia al desgaste, estos factores disminuyen la necesidad total de mantenimiento mediante reducción de la frecuencia de cambio del **desecante** y minimiza las pérdidas relacionadas con el tiempo muerto en la producción.
- El punto de rocío del agua requerido a la salida y el recobro simultáneo de líquidos.

Propiedades del gel sílice.

Diámetro del Poro (Angstroms): 10 a 90.

Densidad Aparente (lb/ft<sup>3</sup>): 45.

Poder Calorífico (BTU / Lb °F): 0.22.

Máxima Temperatura de entrada: 120.

Mínima Temperatura de Rocío (°F): -60.

Temperatura de Regeneración (°F): 300 a 500.<sup>32</sup>

El diseño de nuestra columna de deshumidificación, tendrá la siguiente función: Un compresor de aire aspirará aire húmedo, este entrara por la parte inferior de la columna con desecante (que para este diseño se eligió sílica gel), el aire seco saldrá por la parte superior de la torre, para pasar a una segunda columna de deshumidificación para finalmente entrar en el sistema de ozonificación para su posterior conversión del porcentaje de oxígeno presente en el aire en ozono. El diseño de esta columna se basa en el relleno de sílica gel que se debe de colocar en el interior de la columna para lograr la mayor efectividad de deshumidificación<sup>33</sup>.

Iniciamos este análisis de diseño de deshumidificador determinando la cantidad de agua presente por metro cubico de aire, para obtener este dato hacemos referencia a la gráfica de humedad vs punto de rocío **ANEXO 7**.

De la tabla 5 se tiene que la temperatura de bulbo seco es de 19.83 °C y la temperatura de bulbo húmedo es de 14.83 °C. A partir de estos datos se puede calcular la humedad relativa para posteriormente calcular la temperatura del punto de rocío y así de esta forma estimar el contenido de agua en gramos por cada metro cubico de aire, con este dato se podrá diseñar nuestra columna de adsorción de agua de sílica gel.

### **Humedad Relativa<sup>34</sup>**

Es la humedad presente relativa (con respecto) a la máxima humedad posible a la misma temperatura ambiente (bulbo seco). Se define como la razón de: la presión de vapor de agua, presente en ese momento con respecto a la presión de vapor en saturación (de agua) a la misma temperatura. Se expresa como porcentaje.

Ecuación 5.66

$$HR = \frac{e(T)}{e_s(T)} \times 100$$

<sup>32</sup> <http://www.silicagel.com.mx/desecantes.aspx>

<sup>33</sup> <http://www.gunt.de/networks/gunt/sites/s1/mmcontent/produktbilder/08354000/Datenblatt/08354000%204.pdf>

<sup>34</sup> <http://www.metas.com.mx/guiametas/La-Guia-MetAs-03-09.pdf>

Dónde:

HR = humedad relativa en %,

e(T) = presión parcial real del vapor de agua en aire húmedo, en Pa,

es(T) = presión parcial de vapor de agua en aire húmedo saturado, en Pa.

### Presión parcial de vapor saturado

Expresa el hecho de que a una temperatura dada, existe un máximo en la cantidad de vapor de agua que puede estar presente, en otras palabras es la máxima presión parcial es(T) que puede ejercer el vapor de agua a una temperatura (bulbo seco) particular (t ó T).

Ecuación 5.67	$e_s(T) = 1Pa \times e^{(A \cdot T^2 + B \cdot T + C + \frac{D}{T})}$
---------------	---

Donde:

es(T) = presión parcial de vapor de agua en aire húmedo saturado en Pa, a la temperatura de bulbo seco T

e = 2,718 281 828 46 = base de logaritmo natural (neperiano) o número de Euler.

A = 1,237 884 7x 10<sup>-5</sup>

B = -1,912 131 6x 10<sup>-2</sup>

C = 33,937 110 47

D = -6,343 164 5x 10<sup>3</sup>

T = temperatura ambiente de bulbo seco en K = t (°C) + 273,15.

### Presión parcial real de vapor de agua

De acuerdo con la ecuación de Ferrel, la cual es utilizada en el cálculo de la humedad relativa con el psicrómetro de giro.

Ecuación 5.68	$e(T) = e_s(Tw) - P \times (T - Tw) \times (\gamma + \varphi \cdot Tw)$
---------------	---

O bien mediante la ecuación experimental de Carrier:

Ecuación 5.69	$e(T) = e_s(Tw) - \frac{[P - e_s(Tw)] \cdot (T - Tw)}{\theta + X \cdot Tw}$
---------------	---

Donde:

e(T) = presión parcial real de vapor de agua en aire húmedo en Pa, a la temperatura de bulbo seco t ó T

es(Tw) = presión parcial de vapor de agua en aire húmedo saturado en Pa, a la temperatura de bulbo húmedo

Tw ó tw

P = presión atmosférica local en Pa

Tw = temperatura de bulbo húmedo en K = tw (°C) + 273,15

ψ (psi) = 4,53x 10<sup>-4</sup> K<sup>-1</sup> (Ferrel)

$$\begin{aligned}\phi (fi) &= 7,59 \times 10^{-7} \text{ K}^{-2} && \text{(Ferrel)} \\ \theta (\text{theta}) &= 1\,940 && \text{(Carrier)} \\ \chi (ji) &= -1,44 && \text{(Carrier)}.\end{aligned}$$

Sustituyendo el valor de la temperatura de bulbo Seco la ecuación 5.57 se tiene:

$$e_s(T) = 1Pa \times e^{(1,237\,884\,7 \times 10^{-5} \cdot 292,98^2 + (-1,9121316 \times 10^{-2} \cdot 292,98) + 33,93711047 + \frac{-6,3431645 \times 10^3}{292,98})}$$

$$e_s(T) = 2314,79Pa$$

Sustituyendo el valor de la temperatura de bulbo húmedo en la ecuación 5.57 se tiene que:

$$e_s(Tw) = 1Pa \times e^{(1,237\,884\,7 \times 10^{-5} \cdot 287,98^2 + (-1,9121316 \times 10^{-2} \cdot 287,98) + 33,93711047 + \frac{-6,3431645 \times 10^3}{287,98})}$$

$$e_s(Tw) = 1687,19Pa$$

Sustituyendo los resultados anteriores en la ecuación de Carrier se tiene que:

$$e(T) = 1687,19 - \frac{[78126,9264 - 1687,19] \cdot (292,98 - 287,98)}{1940 + (-1,44 \cdot 287,98)}$$

$$e(T) = 1485$$

Sustituyendo los resultados de las ecuaciones anteriores en la ecuación 5.56 se tiene que **la humedad relativa es:**

$$HR = \frac{1485,98}{2314,79} \times 100$$

$$HR = 64,19\%$$

Para calcular el punto de rocío se tiene la siguiente ecuación<sup>35</sup>:

Ecuación 5.70	$Pr = \sqrt[8]{\frac{Hr}{100}} \cdot [112 + (0,09 \times T)] + (0,1 \times T) - 112$
---------------	--

Donde:

Pr = Punto de rocío.

<sup>35</sup> [http://www.miliarium.com/Paginas/Prontu/Arquitectura\\_Sostenible/Clima/Calculo\\_Punto\\_Rocio.asp](http://www.miliarium.com/Paginas/Prontu/Arquitectura_Sostenible/Clima/Calculo_Punto_Rocio.asp)

T = temperatura en ° Celsius.

H = humedad relativa.

Sustituyendo los valores calculados de humedad relativa y de temperatura de bulbo seco se tiene que la temperatura en el punto de rocío es:

$$Pr = \sqrt[8]{\frac{64.19}{100}} \cdot [112 + (0.9 \times 19.83)] + (0.1 \times 19.83) - 112$$

$$Pr = 18.76^{\circ}C$$

Partiendo de la temperatura en el punto de rocío y se encontrar mediante la figura 20 la cantidad de agua; extrapolando en la curva se tiene que:

Para el punto de rocío de 285.98 K hay 11 g/ m<sup>3</sup> de contenido de agua.

En la tabla 5 nos indica que estamos introduciendo un flujo de aire de 1.2 L/min, esto es equivalente a 0.0012 m<sup>3</sup>/ min. Por lo tanto el total de aire que se introducirá en el espacio de descarga del sistema ozonificador será:

$$\frac{0.00122m^3}{min} \times 16.51min = 0.019872m^3$$

Mediante la norma de especificación para la cantidad de desecante requerido para la absorción de humedad en paquetes, es la norma EEUU (MIL-D-3464E), se hará uso de estas especificaciones para estimar la cantidad de desecante que deseamos poner en la columna deshumidificadora.

Esta norma indica que una unidad desecante equivalente a 1 onza de desecante (28.34 gramos de desecante) es capaz de adsorber 3 gramos de agua a una humedad Relativa del 20 % y capaz de adsorber 6 gramos de agua a una humedad superior al 40% a 25°C.

De estos datos, se hace referencia al **Anexo 8** en esta tabla nos indica la cantidad de unidades desecantes para un volumen de paquete, que en nuestro caso es un volumen de aire circulante.

Dado que nuestra columna deshumidificadora será un contenedor cilíndrico por el cual se hará fluir todo el aire, ocuparemos el volumen total de aire para estimar el número de unidades necesarias para adsorber la humedad.

La cantidad de aire total expresada en ft<sup>3</sup> es:

$$0.019872m^3 = 0.70177 ft^3$$

De este volumen y refiriéndonos a la última columna del anexo 8 se tienen que: se necesitarán 2 unidades para extraer la humedad del aire de un volumen de 0.62507 ft<sup>3</sup>, sin embargo recordando que cada unidad puede extraer 6 gramos de agua, pero refiriéndonos a la cantidad de agua por metro cubico, y teniendo presente 11g/m<sup>3</sup> o 0.31172 g/ft<sup>3</sup>, esto nos indica que podemos reducir la cantidad de unidades a tan solo una unidad, debido a que en 0.62507 ft<sup>3</sup> hay

presentes una cantidad de 0.19536 gramos de agua. Sin embargo para fines prácticos, estableceremos en 12 unidades completas para extraer la cantidad de agua presente, esto equivale a una cantidad de desecante de 340 gramos de desecante de sílica gel azul. Para esta cantidad de desecante de sílica gel se establece que se podrá utilizar esta columna 1740.37 veces antes de la saturación del desecante y de la regeneración aplicando el flujo de aire requerido para nuestra aplicación.

Hay que señalar que el desecante no estará absorbiendo solo la humedad de la cantidad de aire que pasa por la columna, si no que puede absorber la humedad que hay en los alrededores y que logra infiltrarse en la columna.

Otro factor que influye en la columna de deshumidificación es el área que entra en contacto entre el aire y el desecante.

De los datos del desecante de la sílica gel se tiene que:

Densidad Aparente (lb/ft<sup>3</sup>): 45 = 0.721g/cm<sup>3</sup>.

Donde la densidad aparente esta definida como<sup>36</sup>:

Ecuación 5.71	$D_b = \frac{\text{Masa de solido seco}}{\text{Volumen total de solido}}$
---------------	---

Para obtener el volumen total del solido, bastará despejar la variable de volumen de la ecuación 5.71, y sustituir la masa del solido seco nuevo que en nuestro caso es el sílica gel, y la densidad aparente dando como resultado:

$$\text{Volumen total del solido} = \frac{\text{Masa de solido seco}}{D_b} = \frac{340g}{0.721 \frac{g}{cm^3}} = 471.56cm^3$$

Partiendo de que las torres de absorción de humedad tendrán una configuración geométrica cilíndrica, se procede a calcular el volumen de este cilindro, fijando el diámetro de esta columna en 2.0 in o 5.08 cm.

Según la ecuación para el cálculo del volumen de un cilindro es:

Ecuación 5.72	$V = \pi r^2 h$
---------------	-----------------

Despejando la altura de la ecuación 5.72 se tiene que:

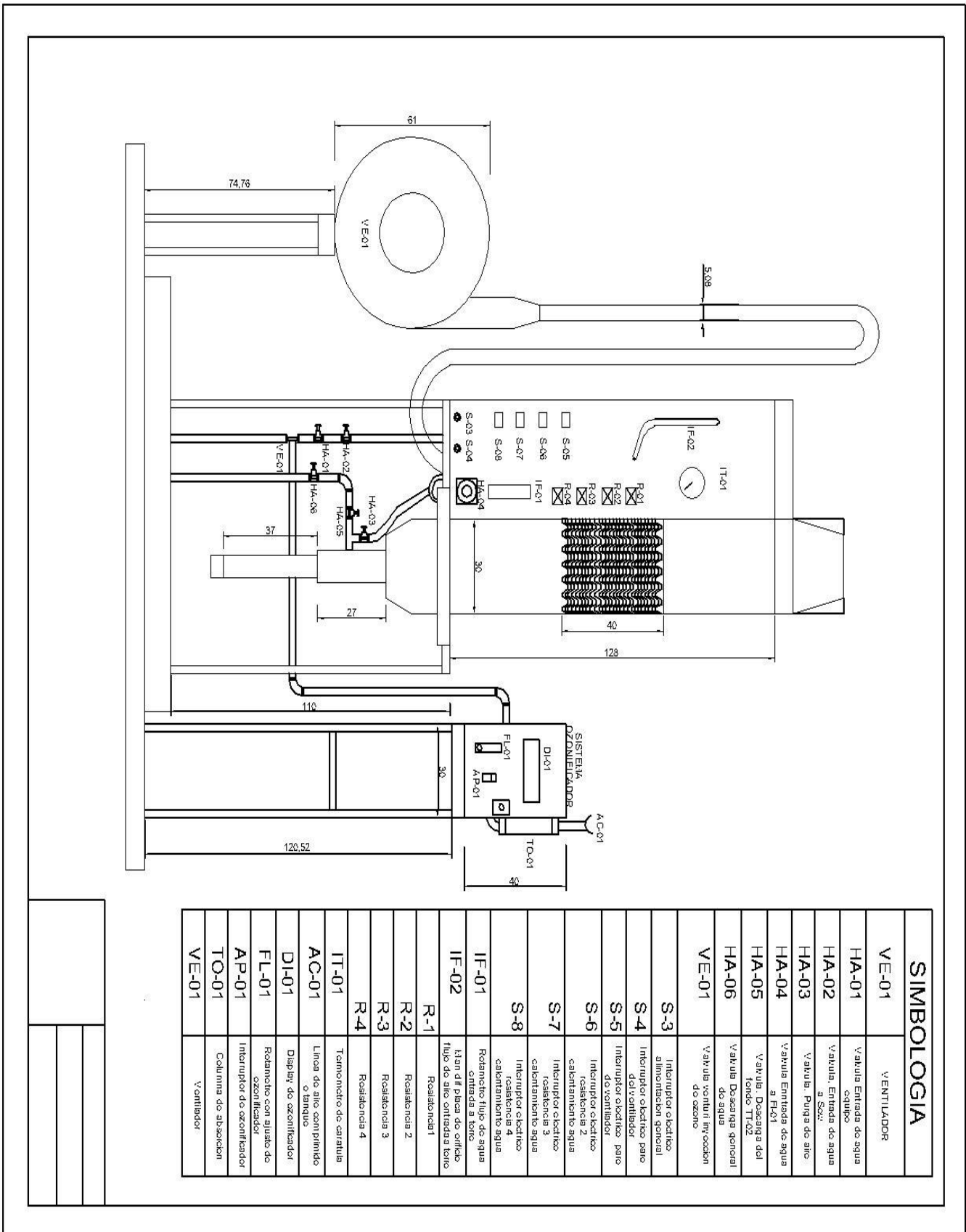
$$h = \frac{V}{\pi r^2} = \frac{471.56 cm^3}{\pi (2.54 cm)^2} = 23.26cm$$

Se puede observar que la altura de la columna es reducida sin embargo es el calculo de diseño para 1740.37 veces de uso, esta estimación está sobre diseñada para tener cantidad extra de desecante para los periodos en donde el ozonificador no sea usado. La siguiente figura muestra el panorama general de la conexión e instalación del sistema ozonificador en la torre de enfriamiento.

<sup>36</sup>

[http://mazinger.sisib.uchile.cl/repositorio/ap/ciencias\\_agronomicas/c200211151639edafo\\_propfis1.pdf](http://mazinger.sisib.uchile.cl/repositorio/ap/ciencias_agronomicas/c200211151639edafo_propfis1.pdf)

**Figura 5.6 Sistema de inyección de Aire al ozonificador (DFP Diagrama de flujo de proceso).**





Como se puede ver en la figura, se necesita un compresor que alimente aire a la columna de absorción. Este compresor debe de superar la caída de presión que pueda proveer la columna, esto para que el aire llegue al sistema ozonificador.

Otra alternativa para sustituir el compresor, radica en tener cilindros de aire comprimido, esta compresión debe de superar la caída de presión que proporcione la columna de absorción de humedad.

Para el caso de nuestro ozonificador se decide que se utilizará una línea de aire comprimido, aunque se puede sustituir por un tanque, en dado caso que la planta no cuente con compresor general que abastezca a más equipos industriales.

### **5. Protocolo Experimental del tratamiento de una torre de enfriamiento con sistemas ozonificador.**

Hasta ahora hemos diseñado un sistema de ozonificación comenzando por el diseño de la lámpara ozonificadora. Este es un diseño que puede ser metodizado en su fabricación y su instalación. Sin embargo también se puede hacer uso de los sistemas que venden en el mercado de ozonificadores, así como de los componentes que integran para la construcción de un ozonificador. Estos sistemas son de diversas índoles y cada fabricante tiene sus patentes y sus variables de control. El diseño propuesto en esta tesis se decidió controlar todas las variables en las bases de diseño. Sin embargo cuando se busca lámparas ozonificadoras, se encuentra uno con diversos modelos y diferentes características. La característica de venta principal, es la producción de ozono por hora, en la sección 5.4 podemos visualizar por que la producción de ozono esta basada en este tiempo, y es por que a partir de la ecuación de diseño con base de una hora, miden la cantidad de voltaje necesaria para producir la energía para generar la cantidad de ozono requerida.

El protocolo de diseño para poder realizar un tratamiento de ozono en una torre de enfriamiento es el siguiente.

- Determinar las características de entrada y salida de agua y de aire a la torre de enfriamiento.
- Determinar que tipo de torre de enfriamiento es, (flujo cruzado, contraflujo etc.)
- Determinar el tipo de material de la torre de enfriamiento.
- Determinar que tipo de empaquetadura que tiene la torre de enfriamiento.
- Determinar el perfil de agua de servicio que esta entrando en la torre de enfriamiento, y determinar la bacteria principal en la biopelícula.
- Calcular el volumen de una torre de enfriamiento en la empaquetadura y del volumen neto de transferencia de masa.
- Calcular y encontrar donde se aplicará el ozono, en el aire o en el agua.
- Con el flujo de agua determinar que cantidad de mezcla agua-ozono se deberá aplicar para tratar el volumen calculado anteriormente.
- Calcular la cantidad de ozono requerido, para dimensionar la lámpara ozonificadora.

- Calcular la cantidad de energía que se debe suministrar a la lámpara ozonificadora para generar la producción de ozono requerida para el tratamiento requerido, oxígeno o aire.
- Determinar el voltaje necesario para lograr el arco ozonificador, si este voltaje sobrepasa el voltaje pico del dieléctrico, seleccionar un dieléctrico de mayor grosor.
- Determinar la potencia con la que la lámpara ozonificadora trabajará.
- Determinar que tipo de gas vehículo para la inyección de ozono a la torre de enfriamiento.
- Determinar la presión a la que trabajara la lámpara ozonificadora.
- Calcular y diseñar una columna de absorción de humedad, partiendo del flujo de aire.
- Estimar la cantidad de tiempo de aplicación del ozonificador.
- Modular y regular el flujo de aire para conseguir la concentración de ozono requerida según el volumen calculado de agua.
- Aplicar el ozono en la torre de enfriamiento.



### **6.1 Medición de ozono para la calibración del sistema ozonificador.**

Una vez instalado el sistema ozonificador en nuestra torre de enfriamiento o equipo industrial es necesario que el ozono producido no supere los límites permisibles que nos indica la norma ambiental. Para esto existe un método analítico para la medición de concentración de ozono producido, así mismo existen aparatos de medición de ozono ambiental.

Se propone un método de calibración de la fuente ozono mediante la siguiente metodología.

#### **6.1.1 Metodología<sup>37</sup>.**

La oxidación de una solución neutra amortiguada de yoduro de potasio con relación a otra solución libre de yodo ha sido la base de un número de técnicas de tipo manual e instrumental para la determinación y calibración de muestreadores y analizadores de ozono en el aire ambiente (Saltzman y Gilbert 1959). El método utilizado, será calibrado, usando disoluciones de ozono generadas por nuestro sistema ozonificador mediante efecto corona y un flujo de aire Zero burbujeado, o aire seco a una solución de yoduro de potasio. La comparación de esta calibración con una obtenida usando una solución estándar de anisaldehído muestra que la producción de ozono después de la producción es de 95 % (Bravo y Lodge 1960) este método puede ser considerado como virtualmente absoluto. La absorbancia molar del producto coloreado es de 350 000 en una longitud máxima de absorción (352 nm). En un flujo continuo de 8 L/min, así mismo una parte por billón (ppm) puede ser detectada razonablemente.

En la actualidad varias propiedades del ozono han permitido ser utilizada como pruebas analíticas de tipo específico. De las cuales se han desarrollado las técnicas modernas de tipo automático y continuo, tales como la utilización de un fotómetro ultravioleta de luz filtrada de largo de banda, el cual compara la absorción del aire en el ancho de la banda, el cual compara la absorción del aire en el ancho de banda en donde se encuentra la longitud de onda de mayor absorbancia de ozono (352 nm). La determinación de catalizador apropiado (McCully et al, 1959). El método que designado de referencia por la agencia de seguridad ambiental de los Estados Unidos (US-EPA) es a partir de la determinación instrumental por quimioluminiscencia en fase gaseosa entre el etileno y ozono en el aire ambiente de la muestra. La ozonólisis es una reacción tipo del ozono, en esta reacción, una doble cadena de etilalqueno es generada a partir de la reacción tipo del ozono en esta reacción con el ozono, generando la liberación de energía luminosa que es detectado por un tubo fotomultiplicador de acuerdo a lo establecido por Lambert y Beer, en donde la energía liberada es directamente proporcional a la concentración de ozono contenido en la muestra de aire.

---

<sup>37</sup> Evaluación de la calidad del aire en el interior de un edificio en la zona metropolitana de la Ciudad de México / tesis que para obtener el grado de Maestro en Ingeniería Ambiental. Rodolfo Sosa Echeverría.

### 6.1.2 Calibración Primaria.

#### Reactivos utilizados.

**Yoduro de potasio.** ASC grado Reactivo. Nota: Algunas fuentes de yodo y de yoduro de potasio grado ASC reactivo han sido reportadas con algún tipo de impurezas las cuales reducen la capacidad absorbente del reactivo. Estas impurezas pueden crear demandas significativas de yodo.

El KI usado podría no tener significancia con la demanda de Iodo. Para determinar esta especificación se puede encontrar, que graficando la absorbancia  $I_2$  versus el total de  $\mu\text{g}$  de  $\text{O}_3$  seleccionando como curva de calibración los puntos siguientes de la curva: Se determina cinco valores obtenidos de 0.5, 1, 2, 3, 4 ml de  $I_2$ . No se incluye el cero como punto. Se dibuja la curva utilizando un análisis de regresión lineal. Si el intercepto es significativamente diferente de cero, el KI tiene una demanda de  $I_2$  y puede ser descartada. Típicamente la intersección podrá ser en el rango + 0.2 a - 0.2  $\mu\text{g}$   $\text{O}_3$ .

- Fosfato Monobásico de hidrogeno ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ) ACS grado reactivo.
- Fosfato dibásico de Sodio ( $\text{Na}_2\text{HPO}_4$ ) ASC grado reactivo.
- Trióxido de arsénico ( $\text{As}_2\text{O}_3$ ) Estándar primario
- Hidróxido de Sodio. ( $\text{NaOH}$ )
- Acido Sulfúrico. ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ )
- Almidón Soluble (para yodimetria) ACS grado Reactivo
- Yoduro de Mercurio ( $\text{HgI}_2$ )
- Yodo resublimado. ( $\text{I}_2$ )
- Bicarbonato de Sodio ( $\text{NaHCO}_3$ )

**Fuente de aire Zero.** Se requiere de un cilindro de acero inoxidable o aluminio tratado para con aire comprimido extra seco grado ZERO (UN1002), libre de  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{O}_3$ , de vapor de agua, humedad e hidrocarburos reactivos que pueden predecir interferencia en la generación de ozono o en la solución de 1% de NBKI (solución amortiguadora neutral de yoduro de potasio) La entrada de aire requerido para obtener el flujo deberá ser pasado por un filtro de sílica gel (que ya se diseño con anterioridad) para su secado, para tratar las posibles muestras de  $\text{NO}$  y  $\text{NO}_2$  el flujo de aire deberá ser pasado por un filtro de carbón activado (6-14 mallas) y un tamiz molecular (6-16 mallas tipo 4 A) para remover toda traza de  $\text{NO}_2$  y vapor de agua. Observar que la fuente de aire ZERO, o tanque comprimido el cual deberá ser purificado como se describe anteriormente.

**Agua purificada.** Usar en todos los reactivos agua destilada y desionizada. Para destilar o desionizar el agua en todos los aparatos de destilación de vidrio, añadir un cristal de permanganato de potasio y un cristal de hidróxido de bario y redestilar.

**Reactivo Absorbente.** Disolver 13.6 g de fosfato monobásico de hidrogeno ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ) 14.2 g fosfato dibásico de sodio ( $\text{Na}_2\text{HPO}_4$ ) o 35.8 g de sal

dodecahidratada de fosfato dibásico de sodio ( $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ ) o 26.8 g de sal heptahidratada y 10.0 g de yoduro de potasio (KI) en agua purificada y diluida a 1000 ml. El pH deberá ser  $6.8 \pm 0.2$ . La solución es estable por varias semanas si es almacenada en un recipiente de vidrio ámbar en un lugar frío y oscuro.

**Solución Estándar** de trióxido de arsénico (0.05 N). Usar estándar grado primario de trióxido de arsénico ( $\text{As}_2\text{O}_3$ ). Secar una hora a  $105^\circ\text{C}$  inmediatamente antes de usar. Pesar precisamente 2.4g de trióxido de arsénico. Disolver en 25 ml, 1 N de hidróxido de sodio en un frasco. Precaución: Estándar seguro que todo el trióxido de arsénico sea disuelto. Agregar 25ml 1N de ácido sulfúrico. Enfriar y transferir a un matraz volumétrico de 1000 ml y diluir hasta el aforo.

Nota: La solución podrá ser neutral, no alcalina.

**Solución Indicadora de almidón.** (2%) triturar 0.4 g de almidón soluble en aproximadamente 2 mg de yoduro de mercurio (conservador) con un poco de agua caliente a punto de ebullición.

Agregar la pasta 200 ml de agua caliente. Continuar calentando hasta que la solución sea clara. Esperar que enfríe y transferir a un frasco de vidrio con tapón.

**Estandarización.** Agregar cuidadosamente con una pipeta volumétrica 20 ml de solución estándar de trióxido de arsénico dentro de un vaso Erlenmeyer de 300 ml. Acidificar ligeramente con ácido sulfúrico de concentración 1:10, Neutralizar con bicarbonato de sodio sólido y agregar cerca de 2 g de exceso. Titular con la solución estándar de yodo como indicador. Saturar la solución con bióxido de carbono cerca al fin del punto para añadir 1 ml de 1:10 de ácido sulfúrico. Continuar con la titulación hasta la primera aparición de un color azul el cual persiste por 30 segundos.

Ecuación 6.1	$\text{Normalidad } I_2 = \frac{\text{ml } \text{As}_2\text{O}_3 \times \text{Normalidad } \text{As}_2\text{O}_3}{\text{ml } I_2}$
--------------	--

Estándar diluido de yodo. Inmediatamente antes de usar, agregar 1 ml de la solución estándar de yodo dentro de un matraz volumétrico de 100 ml y aforar el volumen con el reactivo absorbente.

**Procedimiento de Calibración primario.** (1% de solución neutra amortiguadora de yodo de potasio, NBKI)

Curva de Calibración KI. Se deberá preparar una curva de absorbancia de varias soluciones de yodo contra equivalentes de ozono calculado como sigue:

En una serie de matraces volumétricos de 25 ml, verter 0.5, 1, 2, 3 y 4 ml de la solución diluida del estándar de yodo. Diluir hasta aforar a 25 ml con el reactivo absorbente. Mezclar directamente y leer inmediatamente la absorbancia de la muestra a 352 nm contra el reactivo absorbente que nunca haya sido expuesto

como referencia. Las muestras deberán ser calculadas individualmente y leídas antes que pasen tres minutos.

Total en  $\mu\text{g O}_3 = (N) (96) (v)$

N = Normalidad  $\text{I}_2$  meq /ml.

$V_1$  = Volumen del estándar de  $\text{I}_2$  en ml (0.5, 1, 2, 3, 4)

Graficar la absorbancia contra el total de  $\mu\text{g O}_3$ .

**Calibración primaria.** (Para nuestro medidor y generador de ozono). Conectar nuestro sistema ozonificador diseñado.

**Generación de atmosfera de prueba.** Ensamblar el sistema ozonificador. La concentración de ozono producida por el generador puede variar por el flujo de aire que suministra al sistema ozonificador.

**Muestreo y análisis de atmosferas de prueba.** Ensamblar un tren de muestreo de KI, se deberán usar burbujeadores de vidrio envueltos con papel aluminio para que no permita el paso de la luz, las tuberías de alimentación deberá ser de tygon. Para la calibración primaria del instrumento, el tubo distribuidor o manifold puede muestrear simultáneamente la solución de KI del tren de muestreo y del instrumento a ser calibrado. Checar que el ensamble del sistema no tenga fugas. Registrar la respuesta de salida analógica del instrumento en milivolts, en cada flujo que entra al sistema ozonificador. Establecer las concentraciones para el análisis, usando la solución neutral amortiguadora de yoduro de potasio.

**Blanco.** Con la lámpara del ozonificador de ozono apagada, limpiar el sistema por varios minutos para remover el ozono residual. Añadir 10 ml del reactivo absorbente dentro de cada absorbedor. Abrir el flujo de aire del sistema de generación de ozono a través del tren de muestreo de 0.2 a 1 litro /minuto durante 10 minutos. Inmediatamente transferir expuesta a una celda de cuarzo limpia de 1 cm. Determinar la absorbancia de cada una de las celdas muestra a 352 nm contra el reactivo absorbente no expuesto como referencia. Adicionar las absorbancias de las dos soluciones para obtener la absorbancia total. Leer el total de  $\mu\text{g de O}_3$  de la curva de calibración. Calcular el volumen total de aire muestreado corregido a las condiciones de 25° C y 760 mm de Hg como sigue:

Ecuación 6.2

$$V_r = V \times \frac{P}{760} \times \frac{298}{t+273} \times 10^{-3}$$

Donde:

$V_r$  = Volumen del aire en condiciones de referencia  $\text{m}^3$ .

V = Volumen del aire en condiciones de muestreo en litros.

P = Presión barométrica en condiciones de muestreo mm de Hg.

t = Temperatura en condiciones de muestreo °C.

$10^{-3}$  Conversión de litros a  $\text{m}^3$ .

Calcular la concentración de ozono como sigue:

Ecuación 6.3	$ppm O_3 = \frac{\mu g O_3 \times 5.10 \times 10^{-4}}{VR}$
--------------	---

**6.1.3 Curva de calibración del instrumento.** La respuesta del tubo fotomultiplicador del instrumento (Analizador Beckman Quimioluminiscente de O<sub>3</sub> Mod 950 A) Es proporcional a la salida del voltaje o lectura en ppm (eje-y) y por las atmosferas de prueba contra las concentraciones de ozono determinadas por el método de la solución neutra amortiguadora de yoduro de potasio NBKI en ppm (eje-x).

**6.1.4 Curva de calibración del calibrador del generador.** La salida de ozono del generador es una función de la cantidad de energía suministrada a la lámpara de ozonificación así como del flujo de aire que se le inyecta. Las concentraciones reproducibles pueden ser generadas bajo las mismas condiciones de operación, si se calibra de forma adecuada y simple. Graficar los flujos de la lámpara de ozonificación por las atmosferas de prueba determinadas (eje-y) por el método de la solución neutra amortiguadora de yoduro de potasio NBKI en ppm (eje-x)

Cálculos. Si un registrador grafico es utilizado (Beckman mod 1008 rango de 0 – 100 m-volt) previamente debe ser realineado en cero y valor máximo de la escala al rango de 1 – 100 m-volt, utilizando de voltaje regulado, así se podrá leer directamente la concentración de ozono representado en la caratula del analizador, la lectura podrá ser convertida a concentraciones de ozono usando la curva de calibración del instrumento. La conversión entre ppm y  $\mu g/m^3$  de valores para ozono puede ser realizada por la ecuación 6.4.

### 6.1.5 Cálculos.

Con los valores obtenidos de la curva de patrón proceda a determinar la pendiente (m) y la ordenada al origen (b) empleando para ello la ecuación de la línea recta, y el coeficiente de correlación (r).

Con las lecturas obtenidas de la solución de absorción contenida en las botellas de gas proceder a determinar la concentración de ozono contenido en. Aire sintético, y en el generador de ozono.

Ecuación 6.4	$CO_3 = \frac{(Abs)_v \times m(273 + T_{gas})}{xV(273 + T_{atm})}$
--------------	--

Donde:

O<sub>3</sub> = Control en  $\mu g/m^3$ .

ABS = Lectura de absorbancia de la muestra.

v = Volumen empleado en la solución de absorción (25ml)

K= Valor de la pendiente de la curva de calibración.

X =Alícuota empleada en la lectura espectrofotométrica.



V = Volumen de la muestra de aire burbujeado en la solución de absorción en  $m^3$ .

T amb = Temperatura de la atmosfera en grados centígrados.

T gas = Temperatura del medidor de gas en grados centígrados.

#### **6.1.6 Procedimiento general de calibración de transferencia.**

Se puede reproducir concentraciones conocidas de ozono basadas en la curva de calibración del generador de ozono, determinadas por el método de solución neutra amortiguadora de yoduro de potasio NBKI. En todas las veces el flujo de aire que pasa a través del generador de ozono tendrá que ser mayor que el total del flujo requerido por el sistema de muestreo. La muestra de las atmosferas de prueba debe de ser enviada al manifold distribuidor y al instrumento (Analizador Beckman Quimioluminiscente de  $O_3$  Mod 950 A) o instrumentos a ser calibrados (Analizador Thermo environment de fotometría ultravioleta para  $O_3$  modelo 49)

La respuesta del registrador en milivolts (ppm o ppb) de ozono corresponderá a la representada en cada flujo de aire que pasa por lámpara del generador de ozono  $O_3$ . Graficar el voltaje o las ppm de ozono de la curva de calibración del generador de ozono.

#### **6.1.7 Procedimiento general de chequeo de ZERO SPAN. (Opcional)**

Chequeo de Zero. Fluya una muestra de aire Zero durante 10 minutos para obtener una lectura estable. Observar en la caratula del analizador automático la lectura en cero. Si es requerido su ajuste, realizar las correcciones necesarias para el control de ganancia de la señal de Zero del analizador y después pruebe la posición de función SPAN.

Nota: El analizador Beckman es un modelo anterior, ya no se fabrica; este análisis fue realizado por el instituto de ciencias de la atmosfera de la Universidad Nacional Autónoma de México, si se desea reproducir el análisis, pedir datos técnicos a Beckman sobre nuevos modelos de analizadores.

#### **6.1.8 Materiales para la calibración de un sistema ozonificador:**

Lista de reactivos.

- Agua bidestilada.
- Acido Clorhídrico.
- Bromuro de potasio
- Fosfato acido de potasio.
- Hidrogenofosfato disodico.
- Permanganato de potasio
- Yoduro de potasio

Material de vidrio.

Celdas de espectrofotometría de 10 nm y/o 50 nm.

- Matraz aforado de 1000 ml.



- Matraz aforado de 500 ml.
- Matraz aforado de 100 ml.
- Matraz aforado de 25 ml.
- Perilla de 3 válvulas.
- Pipeta volumétrica de 1 ml.
- Pipeta volumétrica de 2 ml.
- Pipeta volumétrica de 5 ml.
- Pipeta volumétrica de 8 ml.
- Pipeta volumétrica de 10 ml.
- Pipeta volumétrica de 20 ml.

Instrumentos y equipos de medición.

- Bomba.
- Balanza analítica
- Calibrador de gas para ozono, dióxido de azufre y dióxido de nitrógeno.
- Campana de extracción.
- Cronometro
- Flujometro
- Espectrofotómetro de luz ultravioleta y visible.
- Manómetro para el cilindro de gas de aire sintético.
- Medidor de gases
- Termómetro de -10 a 100 grados centígrados.

Material de conexión

- Férulas
- Manguera de látex
- Tubo de teflón ¼".
- Tubo de teflón 1/8".

Material auxiliar.




- Etiquetas.
- Pañuelos desechables.
- Papel milimétrico.

## 6.2 Determinación de ozono en el ambiente.

Es importante señalar que se debe de tener un mecanismo de determinación de ozono presente en los alrededores de la torre de enfriamiento. Hay métodos e instrumentos óptimos para la medición de la concentración de ozono ambiental.

La siguiente tabla se muestra algunos instrumentos medidores de ozono portátiles.

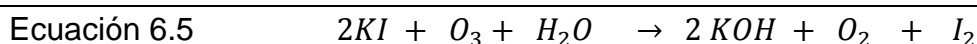
**Tabla 6.1 Tabla de medidores de ozono.**

Nombre medidor	Marca	Modelo	Imagen
<b>Tetra 5</b>	PCE Instrument	<b>ATEX II 2G EEx iad IIC T4</b>	
<b>Monitor y regulador de ozono.</b>	LENNTECH.	OS-3	
<b>Medidor controlador Ozono aire</b>	OXITRES	RS485	

Estos son algunos ejemplos de instrumentos especializados para la determinación de ozono ambiental en el aire; estos equipos tienen un rango de medición de 0.1 ppm hasta 100 ppm.

Existen métodos manuales para la determinación de ozono ambiental, el protocolo de determinación es el siguiente.

El ozono es una sustancia que reacciona fácilmente con el yoduro de potasio (KI). La reacción que ocurre es la siguiente en presencia del agua.



Cuando ocurre esta reacción se libera hidróxido de potasio (KOH), yodo ( $I_2$ ) y oxígeno ( $O_2$ ). El yodo reacciona con el almidón coloreándose a púrpura, lo anterior permite identificar la presencia de  $O_3$ .

Parte A.

- Materiales y equipo.
- 2 Vasos de precipitados de 250 ml
- Papel filtro.
- 1 Agitador de varilla de vidrio.
- 1 Espátula
- 1 Vidrio de reloj.
- 1 Brocha de  $\frac{1}{4}$
- 2 Bolsas de plástico sellable.
- 1 Charola (para secado)

## 1 Carta Psicrometrica.

- Reactivos

Agua destilada.

Almidón.

Yoduro de potasio.

$\text{KMnO}_4$

- Equipo.

Psicrómetro de bulbo húmedo.

Estufa de secado.

Parrilla eléctrica.

Balanza digital.

Desarrollo del método experimental.

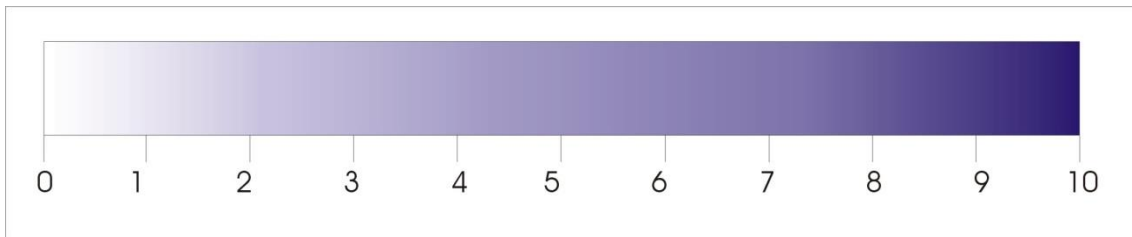
### ➤ **Preparación del detector de ozono ambiental.**

Usando la información anterior se puede elaborar un detector de ozono, útil para cuando no se tiene un instrumento medidor de ozono como los descritos anteriormente, o cuando no se tiene un sistema completo de medición de ozono tipo analizador Beckman como el expuesto en la sección de calibración de un ozonificador; este detector de ozono se construye mediante almidón mezclado con yoduro de potasio KI y recubriendo de papel con la mezcla, con este detector se puede realizar un muestreo para guardar para su posterior análisis.

- ✓ Se deberá pesar 5 g de almidón en polvo.
- ✓ Disolver el almidón en 10 ml de agua fría.
- ✓ Calentar 90 ml de agua destilada hasta la ebullición.
- ✓ Quitar el agua de la fuente de calor y adicionar el almidón, mezclar con un agitador hasta la disolución total del almidón.
- ✓ Enfriar la solución
- ✓ Pesar 1g de KI, 1g de  $\text{K}_2\text{CO}_3$  y disolver en la solución de almidón.
- ✓ Cortar entre 16 y 20 tiras de 1cm x 5 cm de papel filtro.
- ✓ Identifique y enumere las tiras de papel cortadas. (Evitar tintas que sean solubles en agua para no manchar el detector)
- ✓ Con una brocha, aplicar la solución de almidón/KI/  $\text{K}_2\text{CO}_3$  en las tiras de papel filtro.
- ✓ Secar las tiras de papel filtro en una estufa de 80°C durante 4 minutos. Sacar las tiras de la estufa hasta y almacenarlas hasta que se utilicen.
- **Exposición del detector.**
- ✓ Exponer la tira (detector puntual), en la zona de interés a medir en el ambiente, no directo al sol (ya que interfiere en la reacción). Colocar dos tiras de papel, una de ellas se deberá exponer durante todo el tiempo en el que se realiza el levantamiento de muestra (detector continuo), la segunda tira será utilizada como control sin exponer se quedara adentro de nuestra bolsa.
- ✓ Cambiarla tira cada 30 minutos y almacenarla en la bolsa para evitar que la reacción continúe.
- ✓ Medir con el psicrómetro la temperatura de bulbo seco y temperatura de bulbo húmedo y determinar la humedad ambiental con la carta psicrometrica (todos los datos serán registrados).
- **Obtención de concentraciones de ozono.**

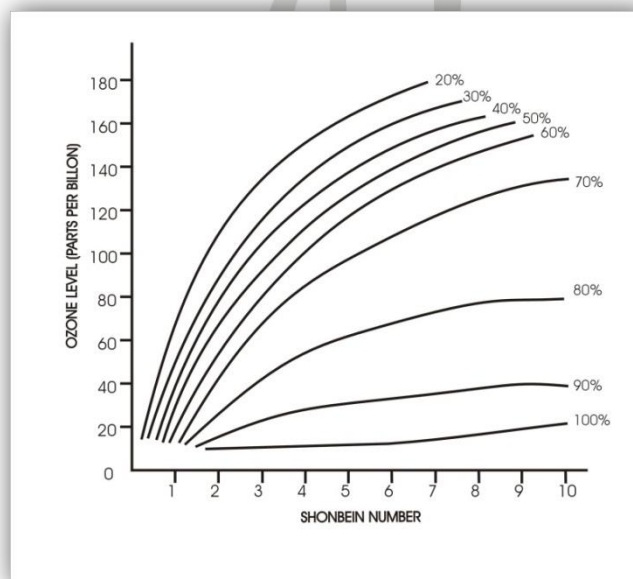
Después de la exposición del detector compare el color con la escala siguiente construida con una serie de disoluciones  $\text{KMnO}_4$ :

**Figura 6.1 Estimación de la escala colorimétrica para el calculo de la concentración de ozono en aire.**



Ubicando el color del detector sobre la escala podrá determinar el número de Schönbein. El número de Schönbein es una medida de que tan oscuro el detector se ha convertido. Emplear este número y el por ciento de humedad para estimar el nivel del ozono en el lugar donde se ubico el detector. Se puede estimar el nivel de ozono empleando la escala de la grafica siguiente:

**Figura 6.2 Grafica para estimar el numero se Schömbein y la concentración de ozono**



Repetir el levantamiento del muestreo según un protocolo para determinar una hora optima para el tratamiento de nuestra torre de enfriamiento. Obtener la concentración de ozono.

- **Curva de calibración.**
- ✓ Solución de KI al 1%.
- ✓ Solución de KI al 2.5 %

- ✓ Solución de la calibración: 316 de  $\text{KMnO}_4$  se deposita en un matraz de 1000 ml y se afora con agua destilada, se pipetea 1 ml de la solución y se afora a 100 ml de agua destilada (solución patrón).<sup>38</sup>
- ✓ Para la curva se utilizan matraces aforados de 50 ml. En cada Matraz se deposita 20 ml de la solución patrón de KI al 2.5 % y se adiciona diferente volumen de  $\text{KMnO}_4$  (1ml de la solución corresponde a 1.44  $\mu\text{g}$ ) aforando a 50 ml con agua destilada como se presenta en la siguiente tabla.
- ✓ Emplear la solución de KI al 1 % como blanco.

**Tabla 6.2. Relación de solución patrón y contenido equivalente de ozono.**

Solución patrón de $\text{KMnO}_4$ ml	Solución patrón de KI 2.5 ml	Agua destilada	Contenido equivalente $\mu\text{g}$	$\text{O}_3$
1	20	29	1.44	
2	20	28	2.88	
5	20	25	7.20	
10	20	20	14.4	
20	20	10	28.8	

- ✓ La absorbancia se mide en el espectrofotómetro a 366 nm y se obtiene la curva de calibración: Absorbancia vs concentración.
  - ✓ Materiales y equipo.
  - ✓ Tubos de ensayo
  - ✓ Reactivos.
- Alcohol etílico.
- ✓ Equipo
- Espectrofotómetro UV visible.

➤ **Cuantificación del ozono.**

Cada detector se introduce en un vial o tubo de ensayo con 10 ml de alcohol etílico o metílico por 15 min.

Después de este tiempo se retira y se mide la absorbancia de la solución para obtener la concentración de ozono.

Existen varios métodos e instrumentos para la medición de la concentración apropiada, lo importante al seleccionar un método o algún instrumento de medida es tener una estimación de cuanto ozono puede estar presente en la zona a muestrear, esto se debe a que los instrumentos tienen un rango de medición, y en el caso de los métodos manuales se debe tener en cuenta el rango de medición del instrumento fotométrico, para este caso se debe idear una técnica para disolver la muestra en volúmenes conocidos de solución para el posterior análisis en el instrumento fotométrico.

<sup>38</sup> Practica de laboratorio de protección ambiental, evaluación de la exposición a ozono ambiental, Laboratorio de Ingeniería química UNAM

### 7.1 Normatividad para el tratamiento de agua.

Para la torre de enfriamiento en nuestro caso, es necesario trabajar con normas aplicables al control de calidad en el aire y en el agua de la ciudad de México.

Estas normas deberán estar vigentes y el uso del sistema ozonificador no deberá sobrepasar los límites que estas impongan.

En esta tesis se enuncian las normas que se aplicarán de alguna forma en la operación de nuestro sistema ozonificador, en algunos casos, las normas ayudaran a estimular la calidad de nuestra operación, en otros casos según la norma, nos impondrá un limite por el cual no se deba exceder la producción de ozono en nuestro sistema de tratamiento. Así mismo se analizara dicha norma para entender el campo de aplicación del sistema de ozonificación en la torre de enfriamiento. Así también el teniendo en cuenta, si el agua que sale de la torre de enfriamiento es de desecho, poder darle este tratamiento de ozonificación para no depositar agua que no cumpla con los estándares propuestos por las normas oficiales mexicanas.

- Norma oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 “Salud ambiental, agua para uso y consumo Humano –Límites permisibles de la calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización”<sup>39</sup>.

Esta norma Mexicana es una norma que va muy ligada con el campo de aplicación de los sistema de ozonificación, puesto que los sistemas de ozonificación en una operación conjunta con sistemas de filtración y osmosis, pueden encargarse de generar agua que cumpla con los estándares de calidad que señala la norma 127, esto es claro en función del perfil de agua a tratar. Muchas empresas que desean producir agua potable consideran al sistema de ozonificación como una pieza más del tren integral para el tratamiento de agua con fines de consumo humano.

- Norma oficial Mexicana NOM-001- Ecol-1996. Que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.

El objetivo de esta norma oficial mexicana es establecer los límites máximos permisibles de contaminantes (que pueden ser los causantes del deterioro de las torres de enfriamiento o de los diversos equipos industriales) y que se descargan en aguas de carácter de bien nacional. Esta norma señala también que es de observancia obligatoria para los responsables de dichas descargas. Esta norma no se aplica a las descargas de aguas provenientes para drenajes separados de aguas pluviales.

Referencias a otras normas encargadas de estandarizar el agua para diferentes

Norma Mexicana NMX-AA-003 Aguas residuales- Muestreo.

Esta norma se encarga de proporcionar las siguientes definiciones:

---

<sup>39</sup> Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994.

### **7.1.1 Aguas Residuales.**

Las aguas de composición variada provenientes de las descargas de usos municipales industriales, comerciales de servicios, agrícolas, pecuarios, domésticos, incluyendo fraccionamientos y en general de cualquier otro uso, así como la mezcla de ellas.

### **7.1.2 Carga contaminante.**

Cantidad de contaminante expresada en unidades de masa por unidad de tiempo, aportada en una descarga de aguas residuales.

### **7.1.3 Condiciones particulares de descarga.**

El conjunto de parámetros **físicos químicos y biológicos** y de sus niveles máximos permitidos en las descargas de agua residual, determinados por la comisión nacional del agua para el responsable o grupo de responsables de la descarga o para un cuerpo receptor específico, con el fin de preservar y controlar la calidad de agua conforme a la ley de Aguas Nacionales y sus Reglamento.

### **7.1.4 Contaminantes Básicos.**

Son aquellos compuestos y parámetros que se representan en las descargas de aguas residuales y que pueden ser removidos o estabilizados mediante tratamientos convencionales. En lo que corresponda a esta norma oficial mexicana solo se considera los siguientes grasa y aceites, materia flotante, sólidos sedimentables, sólidos suspendidos totales, demanda bioquímica de oxígeno, nitrógeno total (suma de las concentraciones de nitrógeno Kjendahl de nitratos, expresada como mg/litro de nitrógeno), fósforo total de temperatura y pH.

### **7.1.5 Contaminantes patógenos parasitarios.**

Son aquellos microorganismos, quistes y huevos de parásitos que pueden estar presentes en las aguas residuales y que representan un riesgo a la salud humana, flora o fauna. En lo que corresponde a esta norma oficial mexicana solo se consideran los coliformes fecales y los huevos de helminto.

### **7.1.6 Cuerpo receptor.**

Son las corrientes, depósitos de agua, presas, cauces, zonas marinas o bienes nacionales donde se descarga aguas residuales, así como los terrenos en donde se infiltran o se inyectan dichas aguas cuando puedan contaminar el suelo acuífero.

### **7.1.7 Descarga**

Acción de verter, infiltrar, depositar o inyectar aguas residuales a un cuerpo receptor en forma continua, intermitente o fortuita, cuando esté es un bien del dominio público de la nación.

### **7.1.8 Embalse artificial.**

Vaso de formación artificial que se origina por la construcción de un bordo o cortina y que es alimentado por uno o varios ríos o aguas subterránea o pluvial.

### 7.1.9 Embalse natural.

Vaso de formación natural que es alimentado por uno o varios ríos de agua o pluvial.

### 7.1.10 Limite máximo permisible.

Valor o rango asignado a un parámetro, el cual no debe de ser excedido en la descarga de aguas residuales.

### 7.1.11 Muestra compuesta.

La que resulta de mezclar el número de muestras simples, según la tabla 7.1, para conformar la muestra compuesta, el volumen de cada una de las muestras simples deberá ser proporcional al caudal de la descarga en el momento de su toma.

**Tabla 7.1: Frecuencia de muestreo según la norma NOM-001-Ecol-1993**

FRECUENCIA DE MUESTREO			
HORAS POR DÍA QUE OPERA EL PROCESO GENERADOR DE LA DESCARGA	NUMERO DE MUESTRAS SIMPLES	INTERVALO ENTRE TOMA DE MUESTRAS SIMPLES (HORAS)	
		MINIMO	MAXIMO
Menor que 4	Mínimo 2	N.E.	N.E.
De 4 a 8	4	1	2
Mayor que 8 y hasta 12	4	2	3
Mayor que 12 y hasta 18	6	2	3
Mayor que 18 y hasta 24	6	3	4

N.E.= No especificado

### 7.1.12 Muestra simple.

La que se tome en el punto de descarga, de manera continua, en día normal de operación que refleje cuantitativamente y cualitativamente el o los procesos mas representativos de las actividades que generan la descarga, durante el tiempo necesario para completar cuando menos un volumen suficiente para que se lleve a cabo los análisis necesarios para conocer su composición (en nuestro caso el perfil de agua con la que se trabaja ya sea la torre de enfriamiento o de los diversos equipos industriales) aforando el caudal descargando en el sitio en el momento del muestreo.

El volumen de cada muestra simple necesario para formar la muestra compuesta se determina mediante la siguiente ecuación:

Ecuación 7.1	$VMSi = VMC \times \left(\frac{Qi}{Qt}\right)$
--------------	--



Donde

VMS<sub>i</sub> = Volumen de cada muestra simple "i" en litros.

VMC = volumen de la muestra compuesta necesaria para realizar la totalidad de los análisis de laboratorio requeridos, litros.

Q<sub>i</sub> = Caudal medido en la descarga en el momento de tomar la muestra simple en litros por segundo.

Q<sub>t</sub> = S Q<sub>i</sub> Q<sub>n</sub>, litros por segundo.

#### **7.1.13 Parámetro.**

Variable que se utiliza como referencia para determinar la calidad física, química y biológica del agua.

#### **7.1.14 Promedio Diario. (P.D)**

Es el valor que resulta del análisis de una muestra compuesta. En el caso del parámetro de grasas y aceites, es el promedio ponderado en función del caudal, y la media geométrica para las coliformes fecales, de los valores que resulten del análisis de cada una de las muestras simples tomadas para formar la muestra compuesta. Las unidades de pH no deberán de estar fuera del rango permisible, en ninguna de las muestras simples.

#### **7.1.15 Promedio Mensual (P.M)**

Es el valor que resulte de calcular el promedio ponderado en función del caudal, de los valores que resulten del análisis de al menos dos muestras compuestas (promedio diario).

#### **7.1.16 Tratamiento convencional.**

Son los procesos de tratamiento mediante los cuales se remueven o estabilizan los contaminantes básicos presentes en las aguas residuales.

#### **7.1.17 Uso publico Urbano.**

La utilización de agua nacional para centros de población o asentamientos humanos, destinada para el uso y consumo humano, previa potabilización.

- **Especificaciones.**

Las especificaciones de contaminantes básicos, metales pesados y cianuros para las descargas de aguas residuales a aguas y bienes nacionales, no debe exceder el valor indicado en las tabla 7.1 de la norma oficial mexicana ECOL 01. El rango permisible del potencial del potencial hidrogeno (pH) es de 5 a 10 unidades

Para determinar la contaminación por patógenos se tomará como indicador a los coliformes fecales. El limite máximo permisible para la descargas de aguas residuales vertidas a aguas y bienes nacionales, así como descargas vertidas al suelo (uso en riego agrícola) es de 1000 y 2000 como numero mas probable (NMP) de coliformes fecales por cada 100 ml para el promedio mensual y diario, respectivamente.

Para determinar la contaminación por parásitos se tomará como indicador los huevos de helminto. El límite máximo permisible para las descargas vertidas a suelo (uso en riego agrícola), es de un huevo de helminto por litro para riego no restringido, y de cinco huevos por litro restringido, lo cual se llevará a cabo de acuerdo a la técnica establecida en el anexo 1 de la norma **NOM-001-Ecol-1993**.

Al responsable de la descarga de aguas residuales que antes de la entrada en vigor de esta norma oficial Mexicana se le hayan fijado condiciones particulares de descarga, podrá optar por cumplir los límites máximos permisibles establecidos en esta norma, previo aviso a la comisión nacional del agua.

Los responsables de las descargas de aguas residuales vertidas a aguas y bienes nacionales deben cumplir con la presente norma oficial Mexicana de acuerdo con lo siguiente:

Las descargas municipales tendrán como plazo limite las fechas de cumplimiento establecidas en la norma vigente, El cumplimiento es gradual y progresivo, con forme a los rangos de población y vivienda, correspondiente a la publicación del instituto Nacional de Estadística, Geografía.

Las descargas no municipales tendrán como plazo limite hasta las fechas de cumplimiento establecidas en la norma oficial vigente. El cumplimiento es gradual y progresivo, dependiendo de la mayor dependiendo de la mayor carga contaminante, expresada como demanda bioquímica de oxígeno<sub>5</sub> (DBO<sub>5</sub>) o solidos totales (SST), según las cargas del agua residual, manifestada en la solicitud de permiso de descarga, presentada a la Comisión Nacional del Agua.

Los responsables de las descargas de aguas municipales y no municipales, cuya concentración de contaminantes en cualquiera de los parámetros básicos que rebasen los límites máximos permisibles, señalados en la tabla 7.1, multiplicada por cinco, para cuerpos receptores tipo B (ríos, uso publico urbano), quedan obligados a presentar un programa de las acciones u obras a realizar para el control de la calidad del agua de sus cargas a la Comisión Nacional del Agua, en un plazo no mayor de 180 días naturales, a partir de la publicación en el Diario Oficial de la Federación.

Los demás responsables de las descargas de aguas residuales municipales y no municipales, que rebasen los límites máximos permisibles, quedan obligados a presentar un programa de las acciones u obras a realizar para el control de la calidad de sus descargas a la Comisión Nacional del Agua en los plazos establecidos en la norma oficial Vigente.

Lo anterior, sin perjuicio del pago de los derechos a que se refiere la ley de Derechos y a las multas y sanciones que establecen las leyes y reglamentos en la materia.

**Tabla 7.2: Periodicidad de reportes para la Demanda Bioquímica de oxígeno.**

<b>Demanda</b>	<b>Solidos</b>	<b>Frecuencia</b>	<b>Frecuencia</b>
<b>bioquímica de oxígeno</b>	<b>Suspendidos totales</b>	<b>de muestreo</b>	<b>De</b>
<b>(toneladas/día)</b>	<b>(toneladas/día)</b>	<b>y análisis</b>	<b>Reporte.</b>
<b>Mayor de 3.0</b>	<b>mayor de 3.0</b>	<b>Mensual</b>	<b>Trimestral</b>
<b>de 1.2 a 3.0</b>	<b>de 1.2</b>	<b>Trimestral</b>	<b>Semestral</b>
<b>menor de 1.2</b>	<b>menor de 1.2</b>	<b>Semestral</b>	<b>Anual</b>

El responsable de la descarga estará exento de analizar de algunos o varios de los parámetros que señalan en la presente Norma Oficial Mexicana, cuando demuestre que, por las características del proceso productivo o el uso que le dé el agua, no genera o concentra los contaminantes a exentar, manifestándolo ante la Comisión Nacional del agua, por escrito y bajo protesta de decir verdad. La autoridad podrá verificar la veracidad de lo manifestado por el usuario. En caso de falsedad, el responsable quedará sujeto a lo dispuesto en los ordenamientos legales aplicables.

En el caso de que el agua de abastecimiento registre alguna concentración promedio mensual de los parámetros referidos anteriormente de la presente Norma Oficial Mexicana, la suma de esta concentración al límite máximo permisible promedio mensual, es el valor que el responsable de la descarga está obligado a cumplir siempre y cuando lo notifique por escrito a la comisión Nacional del Agua, para que ésta dictamine lo procedente.

Cuando se presenten aguas pluviales en los sistemas de drenaje y alcantarillado combinado, el responsable de la descarga tiene obligación de operar su planta de tratamiento y cumplir con los límites máximos permisibles de esta norma Oficial Mexicana, o en su caso con sus condiciones particulares de descarga, y podrá a través de una obra de desvío derivar el caudal excedente. El responsable de la descarga tiene la obligación de reportar a la Comisión Nacional del Agua el caudal derivado.

El responsable de la descarga de aguas residuales que, como consecuencia de implementar un programa de uso eficiente y/o reciclaje del agua en sus procesos productivos, concentre los contaminantes en su descarga, 7y en consecuencia rebase los límites máximos permisibles establecidos en la presente Norma, deberá solicitar ante la comisión Nacional del Agua se analice su caso particular, a fin de que quede ésta le fije condiciones particulares de descarga.

### **Verificación.**

- La comisión Nacional del agua llevará a cabo muestreos y análisis de descargas de aguas residuales, de manera o aleatoria, con objeto de verificar el cumplimiento de los límites máximos permisibles establecidos para los parámetros señalados en la presente norma oficial mexicana.

### **Grado de concordancia con normas y recomendaciones internacionales.**

- No hay normas equivalentes, las disposiciones de carácter interno que existan en otros países no reúnen los elementos y preceptos de orden técnico y jurídico que en esta norma oficial mexicana se integran y complementan de manera coherente, con base en los fundamentos técnicos y científicos reconocidos internacionalmente<sup>40</sup>.

**Al realizar el análisis de la norma oficial, se puede observar que puede ser o no ser aplicable al tratamiento de torres de enfriamiento con sistemas de ozonificación, esto va a depender fundamentalmente del destino que tenga la salida de agua de la torre de enfriamiento, así como de los procesos siguientes a la torre de enfriamiento.** Así mismo también estará en función del uso de agua de proceso que tenga el agua enfriada o de proceso. En esta tesis se asume que los periodos de mantenimiento de la torre de enfriamiento, se llevaran a cabo en periodos que no interfieren con el proceso de enfriamiento y que el proceso de mantenimiento y de limpieza de la torre, el agua que resulte de este proceso, será ya sea almacenada o desechada al drenaje y que cumplan con las normas establecidas anteriormente.

La principal norma que estará ligada al tratamiento con ozono para torres de enfriamiento es la siguiente:

Norma oficial Mexicana NOM-036-ECOL-1993, Que establece los métodos de medición para determinar la concentración de ozono en el aire ambiente y los procedimientos para la calibración de los equipos de medición.

Esta norma contempla al ozono (producto principal de nuestro tratamiento) como un contaminante, esta norma nos indica la concentración permisible, que una persona puede tolerar en un intervalo promedio de tiempo.

Para el éxito de nuestro tratamiento de ozonificación para torres de enfriamiento y equipos industriales, radica en que el ozono no escape al ambiente; si no que mediante el diseño correcto de la lámpara de ozonificación, el cálculo correcto del volumen de líquido a tratar estimado a partir de las dimensiones de los equipos, la regulación de los flujos de aire y agua, así como de los sistemas destructores de ozono, la adecuada protocolización de operación del sistema de ozonificación, tengan como objetivo que no sobrepase una concentración de ozono de 0.11ppm en promedio de 1 hora en los alrededores de los equipos.

---

<sup>40</sup> Norma Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1996

En el capítulo 6 de esta tesis, se planteó los métodos adecuados para lograr la medición y calibración de nuestro sistema ozonificador, en la norma oficial mexicana NOM-036-ECOL-1993 se establece la técnica oficial para la determinación de la concentración de ozono en el ambiente el cual se describirá:

## **7.2 Campo de Aplicación.**

Esta Norma oficial Mexicana es de observancia obligatoria en la operación de los equipos, estaciones o sistemas de monitoreo de la calidad de aire con fines de difusión o información al público cuando los resultados tengan validez oficial.

### **7.2.1 Referencias**

NMX-AA-23 Terminología.

### **7.2.2 Definiciones.**

- **Aire Ambiente**

Atmosfera en espacio Abierto.

- **Aire Cero.**

Es un proceso de depuración por métodos artificiales.

- **Condiciones de referencia.**

La temperatura y presión barométrica a que se deben corregir los resultados de los muestreos y de análisis de un contaminante en el aire. Estas correcciones son: Temperatura 298 K (25°C) y presión barométrica 101 kPa (760 mm de Hg).

- **Equipo de Calibración.**

El dispositivo o conjunto de dispositivos que permites establecer el patrón de referencia contra el que se comparará la operación del equipo de medición.

- **Equipo de medición**

El conjunto de dispositivos instrumentales necesarios para medir la concentración de un contaminante.

- **Estación de Monitoreo.**

El conjunto de elementos teóricos diseñados para medir la concentración de contaminantes en el aire en forma simultanea, con el fin de evaluar la calidad del aire en una determinada.

- **Método de referencia.**

El procedimiento de análisis y medición para determinar la concentración de un contaminante en el aire ambiente, señalado como tal en un norma oficial mexicana para producir resultados similares a los que se obtienen con el método de referencia susceptible de aplicarse en situación de éste.

- **Sistema de monitoreo.**

El conjunto de estaciones de monitoreo.

**Símbolos.**

**Notación**

Símbolo	Concepto,
A1	Determinación de la concentración original.
A2	Determinación de la concentración diluida.
C	Concentración de ozono en atm.
C	Concentración de ozono en ppm
E	Error de linealidad en por ciento.
Fo	Velocidad de flujo a través del generador de ozono en l/min.
Fd	Velocidad de flujo de aire diluyente en l/min.
Fz	Velocidad de flujo de aire cero en l/min.
Ó	Coeficiente de absorción de ozono a 254 nm = $308 \pm 4 \text{ atm}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ a 273K (25°C) y a 101.325 kPa(760 torr).
I	Intensidad de luz a través de aire con ozono.
Io	Intensidad de luz a través de aire cero.
l	Longitud de la trayectoria óptica en cm.
L	Factor de corrección debido a la pérdida de ozono (1- fracción de ozono perdida).
LSR	Límite superior del rango del analizador de ozono en ppm.
[O <sub>3</sub> ]dil	Concentración diluida de ozono en ppm.
[O <sub>3</sub> ]sal	Concentración de ozono en ppm.
P	Presión de la muestra en kPa (torr)
R	Razón de la dilución = flujo de la concentración original dividido entre el flujo total.
T	Temperatura de muestre en K.
Z	Respuesta del registro con aire cero en por ciento de la escala.

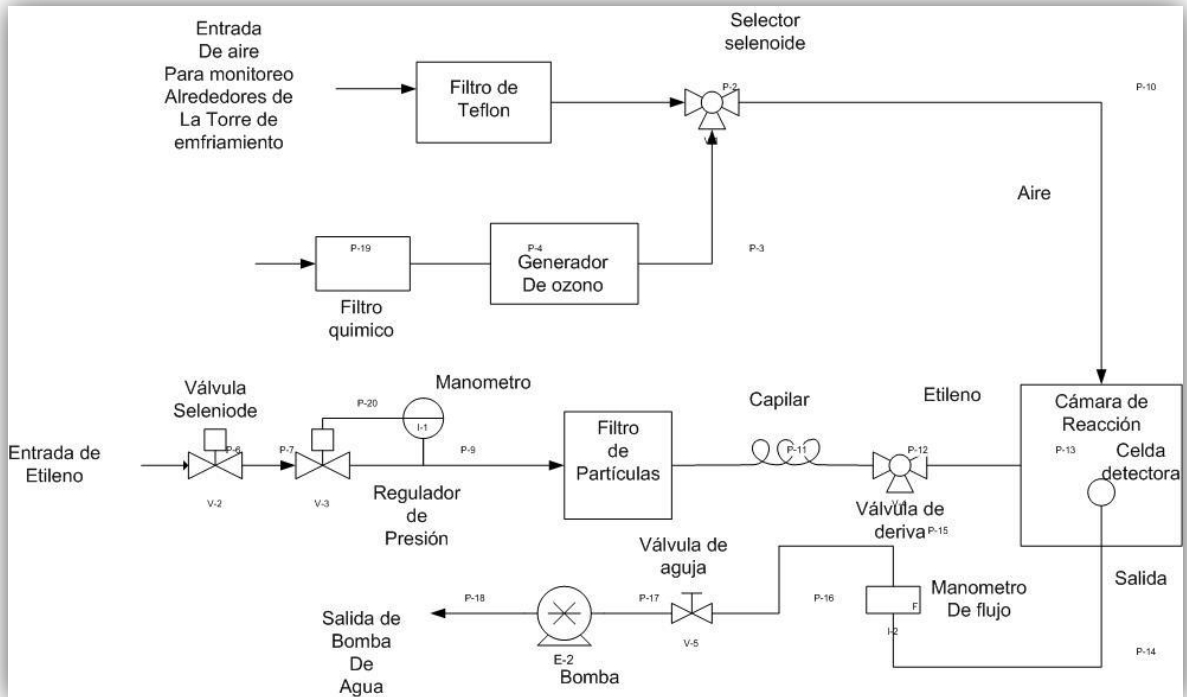
**Unidades.**

Símbolo	Unidad.
Atm	Atmosferas
K	Grados Kelvin
L/min	Litros por minuto.
Mm de Hg	Milímetros de mercurio.
Nm	Nanómetros.
Pa	Pascales.
Ppm	Partes por millón.

**Método de referencia.**

El método de referencia para determinar la concentración de ozono en el aire por luminiscencia química es como se muestra en la figura 7.1.

**Figura 7.1. Diagrama para un monitor para la detección de ozono.**



### 7.2.3 Principio y descripción del método de referencia.

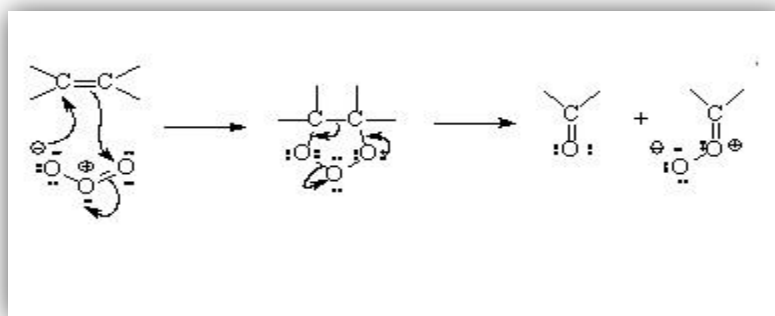
El método de referencia se basa en la capacidad que tiene el ozono de emitir luz al reaccionar con etileno.

En este método se hace entrar simultáneamente aire y etileno a la cámara de mezclado del analizador. Ahí, el ozono presente en el aire reaccionan con el etileno emitiendo una luz, que se detecta a través de un tubo fotomultiplicador, La fotocorriente resultante se amplifica y puede leerse directamente o mostrarse en un registrador, de acuerdo con la cinética de la reacción que se describe enseguida.

El ozono se combina con el etileno para formar una molécula de ozónido a través de la siguiente ecuación.

Posteriormente el ozónido se disocia en un ácido orgánico (ácido fórmico) y un formaldehído activado.

**Figura 7.2: Ecuación de la formación de ozónido mecanismo de reacción propuesto.**





El formaldehído activado disipa su exceso de energía liberando fotones. La celda de reacción de la cámara de mezclado está aislada de la luz, de tal manera que se asegure solo la luz resultante de la reacción etileno-Ozono sea registrada por el tubo fotomultiplicador.

El diseño de la celda es tal, que la reacción se lleva a cabo muy cerca de la ventana, por lo que se puede decir que la totalidad de la luz resultante incide en el tubo fotomultiplicador. La ventana es una pieza de plexiglás transparente que sella un extremo de la celda de reacción, permitiendo así que la luz sea transmitida al detector.

La energía luminosa emitida por la reacción ozono-etileno es convertida a una señal eléctrica por el tubo fotomultiplicador, amplificada posteriormente y utilizada para exteriorizar la lectura de la concentración.

La celda de reacción de la cámara de mezclado está aislada de la luz de tal manera que se asegure que solo la luz resultante de la reacción etileno ozono sea registrada por el tubo fotomultiplicador. El diseño de la celda es tal que la reacción se lleva a cabo muy cerca de la ventana por lo que se puede decir que la totalidad de la luz resultante incide en el tubo fotomultiplicador. La ventana es una pieza de plexiglás transparente que sella un extremo de la celda de reacción, permitiendo así que la luz sea transmitida al detector.

La energía luminosa emitida por la reacción ozono etileno es convertida en una señal eléctrica de la concentración por el tubo fotomultiplicador, amplificada posteriormente y utilizada para exteriorizar la lectura de la concentración.

#### **7.2.4 Equipo de Medición.**

Para la aplicación del método de referencia se requiere de un analizador para ozono que maneje la técnica de luminiscencia química. Los principales componentes del analizador son los siguientes.

Controladores de flujo de etileno y de la muestra.

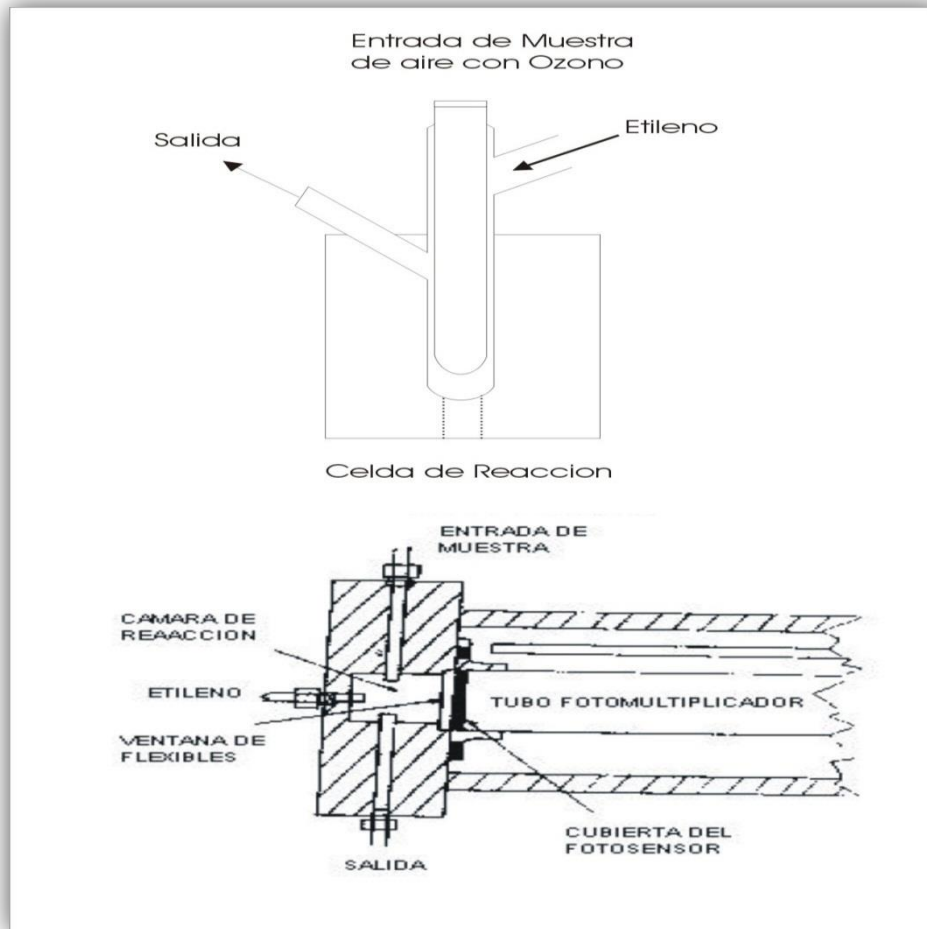
Dispositivos que regulan la velocidad de los fluidos a través de del sistema neumático del analizador.

#### **7.2.5 Celda de reacción.**

Recipiente sellado en el cual se mezclan dos o más compuestos para provocar una reacción véase la figura siguiente:



**Figura 7.3. Detector Fotomultiplicador y celda de reacción del sistema de detección de ozono.**



### **7.2.6 Sistema electrónico de detección y procesamiento de la señal.**

Serie de componentes electrónicos que reciben, amplifican y procesan la señal resultante de la reacción para convertirla en señal analógica que permita registrar mediante dispositivos especiales la lecturas de a concentración de ozono.

El etileno debe de ser al 99.99 % de pureza.

### **7.2.7 Calibración del equipo de Medición.**

El Método para la calibración del analizador de ozono en el aire ambiente, aplicable tanto al método de referencia como al equivalente es el de fotometría ultravioleta y se basa en el principio fotométrico de la absorción de la luz en el rango de la radiación ultravioleta por el ozono.

La concentración se determina cuando el fenómeno de absorción se acopla con los principios fotométricos de la Ley de Lambert-Beer que establece que si hay una luz monocromática y pasa a través de un medio la intensidad con que abandone dicho medio depende exponencialmente de tres factores, el coeficiente de absorción de la moléculas en el medio, de su concentración y de la distancia que la luz tenga que viajar.

Esta determinación requiere del conocimiento de la absorción de (O) del ozono a 254 nm, la longitud de la trayectoria óptica (l) a través de la muestra y la transmitancia de la muestra a una longitud de onda a 254nm.

Si todos estos factores son conocidos, la única variable que necesita ser determinada es la concentración, para lo cual se utiliza la siguiente ecuación:

Ecuación 7.2	$C = \frac{10^4}{\alpha l} \ln \frac{I}{I_0}$
--------------	---

Donde

C = Concentración en ppm.

O = Coeficiente de absorción de ozono a 254 nm. =  $308 \pm 4 \text{ atm}^{-1} \text{ cm}^{-1}$  a 273.15 K (0°C) y a 101.325 kPa (760 torr).

L = Longitud de la trayectoria óptica en cm.

I = Intensidad de la luz a través de aire con ozono.

I<sub>0</sub> = Intensidad de la luz a través de aire cero.

El fotómetro mide la transmitancia de la muestra y electrónicamente calcula la concentración de ozono, por medio de un microprocesador.

Para producir diversas concentraciones dentro del rango requerido, en la práctica se usa un generador estable ozono.

Las concentraciones calculadas de ozono deben ser corregidas por las pérdidas de este gas que pueden ocurrir en el fotómetro, así como por la temperatura y la presión de la muestra.

### 7.2.8 Método de calibración.

El principio del método de fotometría ultravioleta se basa en la generación de concentración de ozono en un sistema de diluciones.

La concentración de ozono en una celda de absorción, se determina a partir de la medición de la cantidad en la región de 254 nm, que es absorbida por la muestra. Para determinar esto, es necesario conocer los siguientes factores:

El coeficiente de absorción del O<sub>3</sub> a 254nm nm (O).

La longitud del trayecto óptico a través de la muestra (l).

La transmitancia a una longitud de onda de 254 nm.

La temperatura (T) y presión (P) de la muestra.

La relación de estas dos lecturas (I/I<sub>0</sub>) denominada transmitancia, está directamente relacionada con la concentración de ozono en la muestra, por medio de la ley de absorción de Lambert-Beer en la que:

Ecuación 7.3

$$\text{Transmitancia} = \frac{I}{I_0} = e^{-acl}$$

Donde:

O = Coeficiente de absorción del ozono =  $308 \pm 4 \text{ atm}^{-1} \text{ cm}^{-1}$  a 254 nm a 0°C y 760 torr.

L = Longitud de la trayectoria óptica en cm.

c = Concentración de ozono en atm.

I = Intensidad de la luz a través de aire con ozono.

I<sub>0</sub> = Intensidad de la luz a través de aire cero.

En la práctica un generador de ozono se utiliza para producir concentraciones de ozono en el rango requerido. Cada concentración de ozono se determina por la transmitancia  $I/I_0$  de la muestra a 254 nm, con un fotómetro cuya longitud de la celda sea l y se calcula con la siguiente ecuación 7.3.

La concentración debe ser corregida por pérdidas del ozono que puedan ocurrir en el fotómetro y por la presión y temperatura de la muestra.

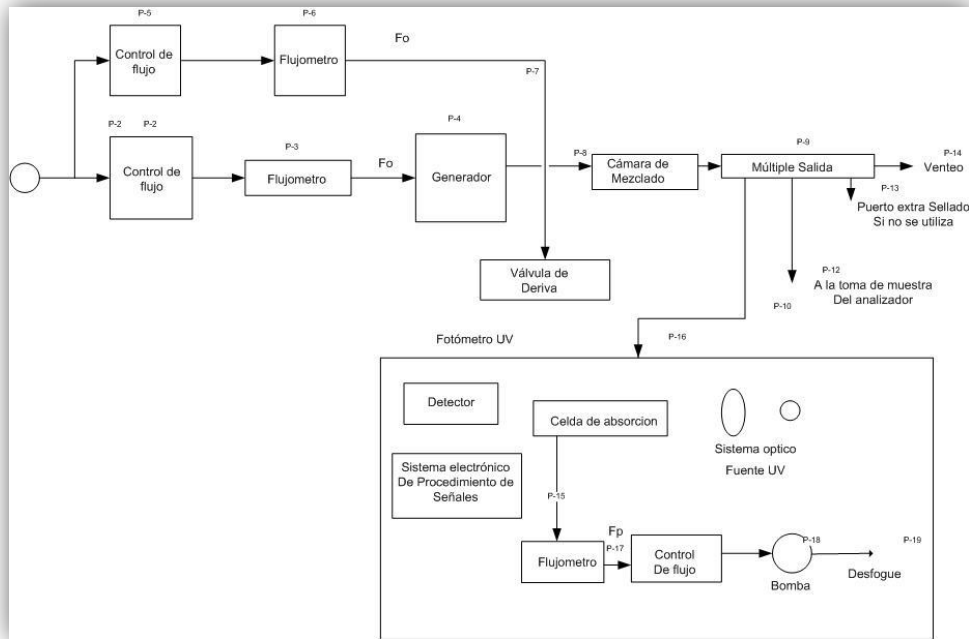
Aplicabilidad. Este procedimiento es aplicable para la calibración de analizadores de ozono en el aire ambiente, ya sea en forma directa o por medio de un patrón de transferencia certificado por este método.

### 7.2.9 Componentes y Características de los equipo de calibración.

La configuración del equipo debe considerar una concentración estable de ozono a la salida del sistema, así como permitir que el fotómetro mida exactamente la concentración de salida con la precisión que le ha sido especificada. En la figura 7.4 se muestra una configuración que se usa con frecuencia y sirve para ilustrar el procedimiento de calibración. Todas las conexiones entre los componentes en el sistema de calibración que estén colocadas después del generador de ozono, deben ser de vidrio, teflón® o de otro material inerte. Los patrones de transferencia que contengan su propia fuente de ozono, pueden remplazar al generador de ozono y muy posiblemente a otros componentes para su certificación.

Los principales componentes de los equipos de calibración que se refieren anteriormente se muestran en la figura 7.4 y deben reunir las siguientes características.

**Figura 7.4: Secuencia del Fotómetro UV.**



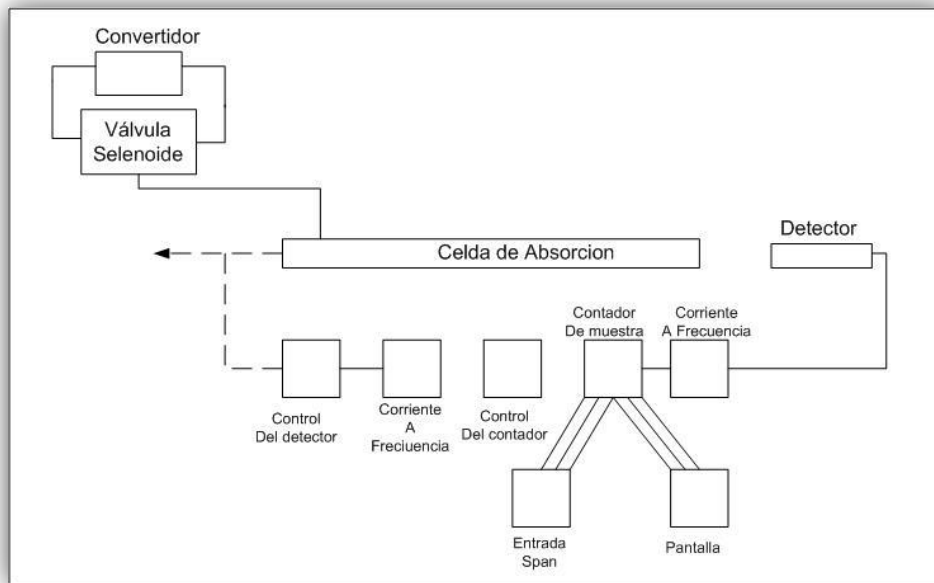
### 7.2.10 Fotómetro de la luz ultravioleta.

El fotómetro consta de una lámpara de mercurio de baja presión, un sistema óptico de enfoque (opcional) una celda de absorción, de un detector y un subsistema electrónico para procesamiento de la señal como se muestra en la figura 7.5. Debe tener la capacidad de medir la transmitancia entre la intensidad de la luz a través de aire con ozono y la intensidad de la luz a través de aire cero ( $I/I_0$ ), para una longitud de onda de 254 nm, con la suficiente precisión para que la desviación estándar de la medición de la concentración no sea mayor a 0.005 ppm o el 3 % del valor. Debido a que la lámpara de mercurio irradia energía luminosa en varias longitudes de onda, el dispositivo debe de incorporar un medio que garantice que no se genere ozono dentro de la celda, debe ser conocida con un 99.5 % de certeza. Además, tanto la celda como sus conectores, deben estar diseñados para minimizar la pérdida de ozono debido al contacto con las paredes de la celda y conductos de gas.

### 7.2.11 Controladores de flujo de aire.

Dispositivos capaces de regular el flujo de aire, según se requiere para mantener la estabilidad de salida así como de cumplir con las especificaciones de precisión para el fotómetro.

**Figura 7.5. Diagrama simplificado de un fotómetro ultravioleta**



### 7.2.12 Generador de ozono.

Dispositivo de generar niveles estables de ozono en todo el rango de la concentración requerida.

Múltiple salida.

Éste componente del sistema debe de ser de vidrio, teflón o cualquier otro material inerte y debe de tener un diámetro suficiente para asegurar que la caída de presión sea mínima en la conexión del fotómetro, así como en otros puertos de salida. El sistema debe de contar con un desfogue diseñado para asegurar que la presión en el múltiple de salida, sea mayor que la atmosférica, para evitar la entrada ambiente.

Válvulas de dos vías.

Válvula manual o automática o cualquier otro medio para cambiar el flujo de aire cero o con ozono que entra al fotómetro.

Termómetro.

Debe de tener una exactitud de  $\pm 1$  °C.

Barómetro u otro indicador de presión.

Debe de tener una exactitud de  $\pm 2$  torr.

Aire cero.

## Procedimiento de calibración.

### 7.3 Operación General.

El fotómetro de calibración debe de usarse únicamente como patrón de calibración y debe de utilizarse con aire cero o gases de calibración y no usarse para muestreos de aire ambiente. Dicho fotómetro debe de manejarse fijo en un laboratorio limpio y protegido de golpes, operarse adecuadamente y utilizarse como un patrón común para todas las calibraciones de campo, mediante los patrones de transferencia.

En la preparación del equipo de calibración se seguirá las siguientes etapas.

Llevar a cabo todos los pasos para su instalación y ajuste descritos en el manual del fabricante.

Verificar entre otros aspectos su integridad y limpieza, velocidades de flujo apropiados y que no presenten fugas. Efectuar el mantenimiento o el remplazo de los filtros y de los limpiadores del aire cero o de otros materiales de consumo, según sea necesario.

Verificar que el fabricante del fotómetro establezca que el error por linealidad sea inferior a 3% o probar la linealidad por dilución como sigue: generar y ensayar una concentración de ozono que este cercana al limite superior del rango (0.5 a 1.0 ppm); diluir exactamente esa concentración con aire cero y volver a probarla. Repetir la operación con varias relaciones de dilución; comparar el ensayo de la concentración original con el de la concentración diluida, dividida entre la relación de dilución como sigue:

Ecuación 7.4	$E = \frac{A_1 \frac{A_2}{R}}{A_1} \times 100$
--------------	--

Donde:

E = Error linealidad en por ciento.

A<sub>1</sub> = Determinación de la concentración original.

A<sub>2</sub> = Determinación de la concentración diluida.

R = Razón de la dilución = flujo de la concentración original dividido entre el flujo total.

El error de linealidad debe de ser inferior a 5%. Debido a que la exactitud de las velocidades de flujo medidas tendrá efecto sobre el error de linealidad, cuando se mide de esta manera, la prueba no es necesariamente decisiva.

Cuando sea posible, el fotómetro debe de compararse, ya sea directamente o vía patrones de transferencia con el fotómetro de calibración usado por otras dependencias o laboratorios.

Una parte del ozono puede perderse por contacto con las paredes de la celda del fotómetro y con otros componentes del sistema de manejo de los gases. La magnitud de estas pérdidas pueden determinarse y ser usada para corregir la concentración de ozono calculada; la pérdida no debe exceder el 5 %.

Cuando comience a usar el fotómetro, las etapas enunciadas en este punto, deben seguirse con frecuencia, registrando todos los resultados o indicaciones cuantitativas en un registro cronológico, ya sea en forma tabulada o graficada. A medida que se va estableciendo el registro de estabilidad del fotómetro, puede irse reduciendo la frecuencia de estos pasos, de acuerdo con la estabilidad documentada del fotómetro.

Para la determinación de la concentración de ozono, se deben seguir las siguientes indicaciones.

Dejar que el sistema del fotómetro se estabilice, en todas sus funciones.

Verificar que la velocidad de flujo a través de la celda de absorción del fotómetro  $F$ , permita que la celda se lave en un tiempo razonablemente corto (2 l/min es un flujo típico). La precisión de las mediciones está inversamente relacionada con el tiempo que se requiere para el lavado, ya que el error derivado del fotómetro aumenta con el tiempo.

Asegurarse que la velocidad de flujo dentro del múltiple de salida sea, cuando menos, 1 litro/minuto mayor que la suma de los flujos requeridos por el fotómetro y por cualquier otro dispositivo conectado al múltiple.

Asegurarse que la velocidad de flujo del aire cero ( $F_z$ ) sea cuando menos 1 L/min mayor que la velocidad de flujo requerida por el fotómetro.

Accionar la válvula de dos vías con el aire cero fluyendo en el múltiple de salida, de tal manera que el fotómetro muestre primero el aire del múltiple o sea  $F_z$ . Las dos lecturas del fotómetro deben ser iguales ( $I=I_0$ ). En este paso el generador de ozono debe de estar desactivado.

En algunos fotómetros comerciales, la operación de la válvula de dos vías y otras de las operaciones indicadas pueden ser realizadas automáticamente por el fotómetro.

Ajustar el generador de ozono para producir la concentración que se necesite. Accionar la válvula de dos vías para permitir que el fotómetro muestre la concentración de ozono hasta que la celda de absorción haya sido lavada perfectamente y registrar el valor estable medido de  $I_0$ .

Accionar la válvula de dos vías, para permitir que el fotómetro muestre aire cero hasta que la celda de absorción se haya lavado perfectamente y registrar el valor estable medido de  $I_0$ .



Registrar la temperatura y la presión de la muestra en la ceda de absorción del fotómetro.

Calcular la concentración de ozono, según la siguiente formula (el Promedio de varias mediciones proporciona mayor precisión):

Ecuación 7.5	$[O_3]_{sal} = \left(-\frac{1}{\alpha} \ln \frac{I}{I_0}\right) \left(\frac{T}{273}\right) \left(\frac{101.325}{P}\right) \left(\frac{10^6}{L}\right)$
--------------	--

Donde:

$[O_3]_{sal}$  = Concentración de ozono en ppm.

$\alpha$  = Coeficiente de absorción de ozono a 254 nm =  $308 \text{ atm}^{-1} \text{ cm}^{-1}$  a 273.15 K (°C) y a 101.325 kPa (760 torr).

L = Longitud del trayecto óptico en cm.

T = Temperatura de muestreo en K.

P = Presión de la temperatura de la muestra en kPa.

L = Factor de corrección debido a la pérdida de ozono (1- fracción de ozono perdida).

$I_0$  = Intensidad de luz a través de aire cero.

I = Intensidad de la luz a través de aire con ozono.

Obtener varias concentraciones de ozono como sea necesario repitiendo los pasos anteriores.

Certificación de patrones de transferencia. Un patrón de transferencia se certifica relacionando la salida del patrón a uno o más, conforme se determina en la sección anterior. La exactitud del procedimiento varía dependiendo de la naturaleza y diseño del patrón de transferencia.

La calibración de los analizadores por el método de fotometría ultravioleta, debe hacerse utilizando patrones de ozono obtenidos en la forma que se indica en el punto anterior o por medio de un patrón de transferencia certificado. Esta calibración se debe de llevar a cabo de la siguiente manera:

Dejar de pasar suficiente tiempo para que el analizador y el fotómetro o el patrón de transferencia, adquieran la temperatura adecuada de operación y se estabilicen.

Dejar que el analizador muestree el aire cero hasta que se obtenga una respuesta estable y ajustar a cero el control del analizador. Se recomienda pasar el ajuste del cero del analizador hasta +5% de la escala para facilitar la observación de una desviación negativa del cero. Registrar la respuesta estable del aire cero como Z.

Generar una concentración de ozono de aproximadamente 80% del límite superior del rango deseado (LSR) del analizador. Permitir que el analizador muestree esta concentración hasta que se obtenga una respuesta estable.

Ajustar el control del rango del analizador para obtener una respuesta conveniente del registrador como se indica a continuación.

$$\text{Ecuación 7.6} \quad \text{Respuesta del registrador} = \left( \frac{[O_3]_{sal}}{LSR} \right) \times 100 + Z$$

Donde:

LSR = Limite superior del rango del analizador en ppm.

Z = Respuesta del registrador con el aire cero en por ciento de la escala.

Registrar la concentración de ozono y la respuesta correspondiente del analizador. Si es necesario un ajuste importante del control del rango, verificar los ajustes del cero y del rango, repitiendo los pasos anteriores.

Generar varias concentraciones patrones de ozono, se recomienda cuando menos otras cinco dentro del rango de la escala del analizador por ajuste de la fuente o por la dilución de la concentración generada. En este caso se requieren mediciones exactas de flujo. El sistema de calibración dinámica puede ser modificado para permitir la medición del aire de dilución después del generador. También se requiere de una cámara de mezclado de entre el generador y el múltiple de salida. La velocidad de flujo a través del generador ( $F_0$ ) y la velocidad de flujo del aire de dilución ( $F_d$ ) se miden con un patrón de flujo o de volumen confiable. Cada concentración de ozono generada por la dilución se calcula mediante la siguiente ecuación.

$$\text{Ecuación 7.7} \quad [O_3]_{dil} = [O_3]_{sal} \left( \frac{F_0}{F_0 + F_d} \right)$$

Donde:

$[O_3]_{dil}$  = Concentración diluida de ozono en ppm.

$[O_3]_{sal}$  = Ozono sin diluir en ppm.

$F_0$  = Velocidad de flujo a través del generador de ozono en l/min.

$F_d$  = Velocidad de flujo del aire diluyente en l / min.

Registrar para cada concentración patrón de ozono la correspondiente respuesta del analizador.

Graficar las respuestas del analizador contra las concentraciones correspondientes de ozono y trazar la curva de calibración del analizador o bien calcular el factor de respuesta correspondiente.

### 7.3.1 Método Equivalente.

El método equivalente para determinar la concentración de ozono en el aire ambiente, es el de fotometría en la región de radiación ultravioleta (anexo 4)

Este método se basa en el principio fotométrico de la absorción de luz en el rango de la radiación ultravioleta por el ozono. Este principio también es aplicable al método de calibración del equipo de medición.

### **7.3.2 Calculo del Reporte.**

La medición se hace en forma continua mediante el uso de procesos automatizados.

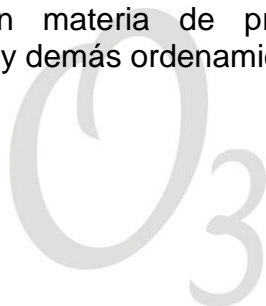
Para reportar los valores al público se calculan las concentraciones en partes por millón en promedios por minuto y a partir de estos, se calculan los promedios horarios reportándose el valor máximo que se haya representado en el día.

### **7.3.4 Vigilancia.**

La secretaria de desarrollo social por conducto de la procuraduría de protección Ambiental es la autoridad competente para vigilar el cumplimiento de la presente norma oficial Mexicana.

### **7.3.5 Sanciones.**

El incumplimiento de la presente Norma oficial Mexicana será sancionado a lo dispuesto por la Ley General del Equilibrio Ecológico y La protección al ambiente, su reglamento en materia de prevención y control de la contaminación de la atmosfera y demás ordenamientos jurídicos aplicables.



### 8.1 Reglas heurísticas para la aplicación de un sistema ozonificador a una torre de enfriamiento

- Utilizar Solo gabinetes de tipo NEMA Proporcionado por la norma eléctrica.
- Una vez puesto en funcionamiento el ozonificador, nunca tocar con la mano descubierta la lámpara de ozonificación, debido a que la lámpara aun puede tener corriente eléctrica almacenada, debido al principio de la conductancia.
- Evitar que la humedad entre en el sistema ozonificador debido a que la lámpara circula alto voltaje, con esto servirá algún corto.
- Para mayor eficiencia del sistema ozonificador, introducir siempre aire seco o aire Zero a la lámpara de ozonificación.
- Si no se diseño un sistema ozonificador para tratar un volumen determinado de agua, y este se encuentra en un sobre diseño, se debe de introducir un sistema de destrucción de ozono.
- Colocar el transformador de corriente eléctrica así como la circuitería electrónica a más de 30 cm de distancia de la lámpara de ozonificación.
- Las tuberías que trabajaran con el sistema de ozonificación deberán de ser de pvc, plástico o resistente al ozono como el tygon o silicón.
- La concentración real siempre deberá ser menor que la concentración nominal especificada.
- El generador deberá ser calibrado cada 3 meses.
- Se deberá hacer evaluaciones periódicas de ozono ambiental en la ubicación física del ozonificador, cuando menos cada 3 días después de su utilización durante 5 evaluaciones subsecuentes.
- La concentración de ozono ambiental nunca deberá exceder de 0.11 ppm.
- No se podrá utilizar el sistema de ozonificación en líneas de servicio para torres de enfriamiento atmosféricas.
  
- Para especificar un ozonificador para una torre de enfriamiento, se deberá especificar el perfil de agua, la dimensión de la torre de enfriamiento en su empaquetadura, caudal de agua, y material de construcción de la torre de enfriamiento.

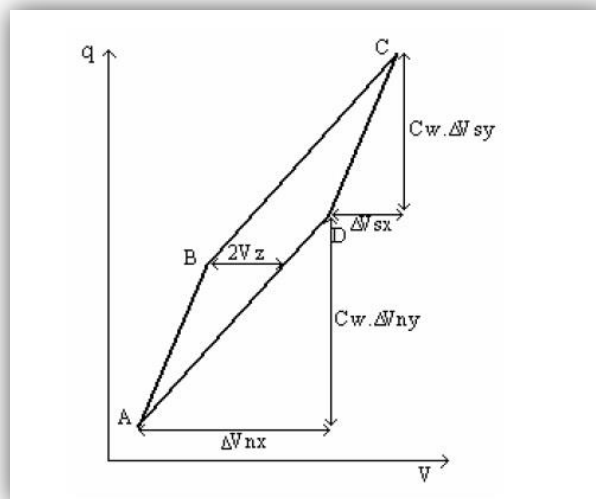
**9.1 Componente eléctrico del sistema ozonificador para la torre de enfriamiento.**

**9.1.1 La figura de Lissajous en una celda generadora de ozono.**

La figura de Lissajous que se obtiene de graficar el valor del voltaje de alimentación y la carga que circula por nuestra celda generadora de ozono, constituye nuestra herramienta mas útil para conocer las características eléctricas para nuestro generador de ozono.

La figura de Lissajous (carga contra voltaje) da lugar a la formación de un paralelogramo como a continuación se muestra:

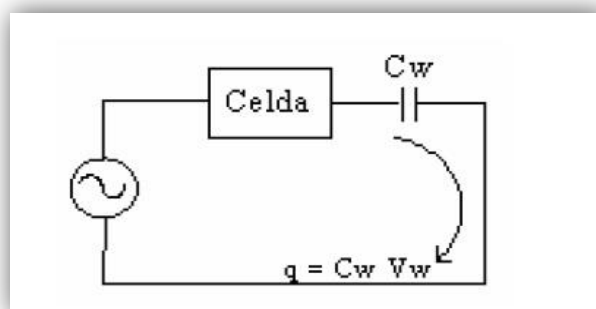
**Figura 9.1 Grafica de Lissajous.**



La información que se obtienen de esta figura de Lissajous es la siguiente: tiempo de duración de microdescargas, capacitancias de la celda debida al gas de alimentación  $C_a$ , capacitación de la celda debido a la barrera dieléctrica  $C_d$ , voltaje de mantenimiento de las microdescargas  $V_z$  y la potencia consumida.

Para obtener la carga instantánea que circula por la celda se conecta un capacitor auxiliar  $C_w$ , en serie con ella, de esta forma la carga instantánea  $q$ , es igual a  $C_w$  veces el voltaje a través del capacitor auxiliar.

**Figura 9.2 Conexión del capacitor.**



### **9.2.1 Tiempo de duración de las Microdescargas.**

En el capítulo 3 se explicó que el efecto corona está compuesto de una serie de microdescargas. Estas descargas solo ocurren durante ciertos intervalos de un ciclo de la señal senoidal. Los intervalos en que ocurren estas microdescargas se identifican en la figura de Lissajous, con los lados AB y CD del paralelogramo, de manera similar los lados AD y BC corresponden a los intervalos en que no existen microdescargas. Con la ayuda de un osciloscopio se puede determinar el tiempo que corresponde a cada lado del paralelogramo, la suma de estos tiempos es igual al periodo de la señal de alimentación.

### **9.2 Teoría de los componentes Básicos del circuito eléctrico electrónico.**

En la década de los setentas, las fuentes de poder para generadores de ozono trabajaban a bajas frecuencias (50 a 60 Hz) y los niveles de voltaje que se requerían eran de varios miles de Volts (5000 a 6000 Volts). Este tipo de fuentes eran bastante voluminosas, y por los niveles de voltaje de operación, se requería de un mayor grado de aislamiento en la celda y en el transformador de la fuente.

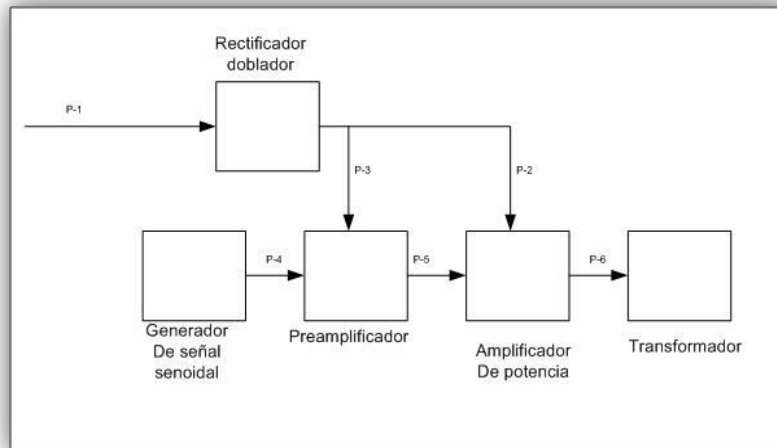
En la década de los años noventa, los fabricantes de generadores de ozono empezaron a utilizar los adelantos tecnológicos de la electrónica de potencia y diseñaron fuentes de poder que operaban a altas frecuencias (más de 1000 Hz). Los beneficios que se obtuvieron al utilizar los adelantos en la electrónica fueron: reducir considerablemente el tamaño de las fuentes, disminuir los niveles de voltaje y de aislamiento eléctrico e incrementar la eficiencia de la producción de ozono.

En la actualidad, las topologías que más se utilizan en los generadores de ozono, en el rango de alta frecuencia son: el de convertidor flyback, y los inversores medio puente y puente completo.

El propósito de esta tesis es establecer el sistema integral de ozonificación para la torre de enfriamiento y equipos industriales. Se estableció la ecuación de diseño para determinar una estimación teórica de la cantidad de energía que debía suministrarse para producir cierta cantidad de ozono necesaria para tratar un volumen determinado de empaquetadura. Sin embargo para suministrarse esa cantidad de energía, que es de un voltaje alto a una frecuencia distinta a la frecuencia de uso público (60 Hz), se necesita un sistema que pueda elevar el voltaje así mismo que pueda darnos la facilidad de modular la frecuencia para poder obtener el voltaje deseado. Esto nos obliga a tener un sistema eléctrico específico que nos de una entrega de respuesta un rango permitido de energía, a una frecuencia dada. Este apartado eléctrico-electrónico es parte fundamental del sistema ozonificador, sin embargo debido a la complejidad de los sistemas eléctricos para lograr la aplicación, no se profundizará más; solo se planteará la teoría básica de los componentes de un sistema sencillo eléctrico-electrónico para instalar en nuestro equipo ozonificador.

El siguiente diagrama de bloques mostrará un bosquejo sobre el sistema eléctrico- electrónico.

**Figura 9.3: Diagrama de bloques eléctrico- electrónico para sistema ozonificador.**



### 9.2.1 Duplicadores de voltaje, o rectificador doblador.

Los duplicadores dobladores de voltaje producen el doble de tensión en corriente directa (DC) de la que podría producir un rectificador común.

Se puede implementar de dos diferentes maneras: duplicadores de media onda, y duplicadores de onda completa y en ambos casos la frecuencia de la tensión de rizado es la misma que la de la tensión de entrada.

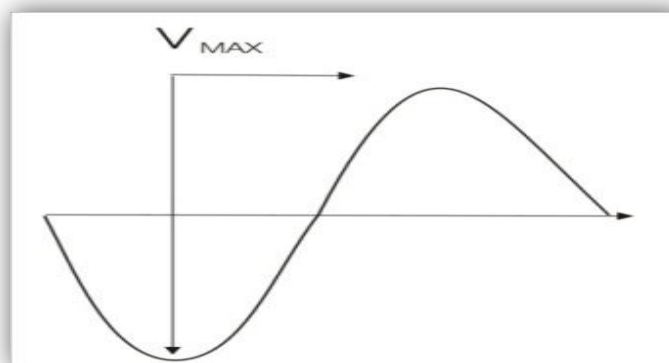
En el caso de la rectificación de onda completa en los rectificadores tradicionales, la frecuencia de la tensión de rizado es el doble de la frecuencia de la tensión de entrada.

En el circuito doblador de tensión, la tensión que se aplica sobre los diodos, es el doble, por lo que estos deberán soportar el doble de tensión. La característica de tensión de los capacitores dependerá del circuito en particular.

La ventaja del duplicador de voltaje de media onda es que tiene una línea, que es común a la entrada y salida. Esta línea se puede tomar como común o tierra y se puede conectar al chasis o base metálica del equipo que se desea alimentar.

El terminal de tierra o común debe estar bien identificado para no hacer una conexión invertida que puede tener consecuencias desagradables. Si se hiciera así, el chasis o base metálica del equipo estaría conectado al "vivo".

**Figura 9.4: Dobrador de media onda.**



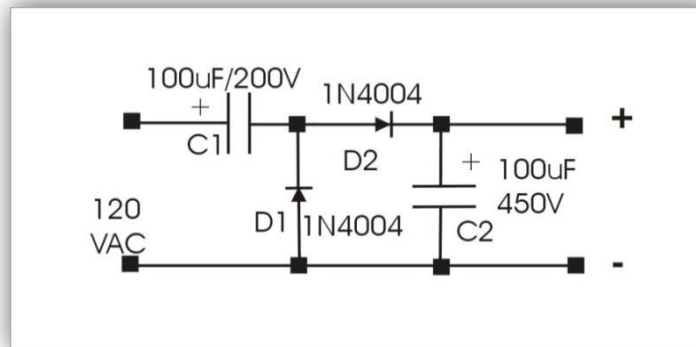


En el primer semiciclo negativo de la onda de entrada, el diodo D1 conduce permitiendo el paso de la corriente por el capacitor C1, cargándose a una tensión igual al máximo valor de tensión de la tensión de entrada.

Si la tensión de entrada es  $V$ , el valor pico de esta entrada es  $V_{Max}$ , entonces este capacitor se carga a esta tensión. En este ciclo el diodo D2 no conduce.

En el siguiente semiciclo de la tensión de entrada (semiciclo positivo), el diodo D1 está polarizado en inverso y no conduce. El diodo D2 está polarizado en directo y la corriente fluye pasando por el capacitor C1, el diodo D2 y el capacitor C2.

**Figura 9.5: Diagrama de capacitores y diodos de un rectificador doblador de voltaje.**



En el inicio del semiciclo negativo, el capacitor C2 está descargado, pero C1 está cargado a  $V_{Max}$  (valor pico de la tensión de entrada).

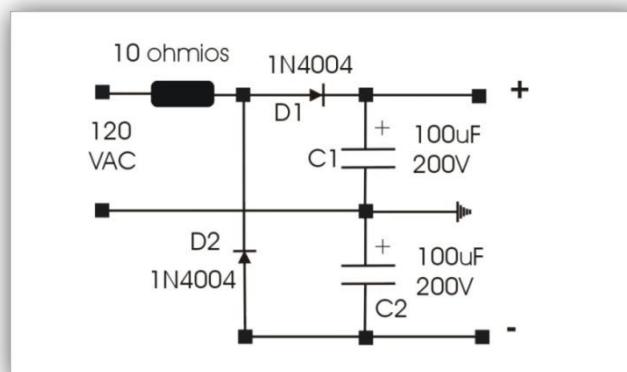
El capacitor C2 se cargará entonces al doble de la tensión pico de la entrada, pues se suman ésta (la tensión pico de entrada y la tensión acumulada que está en el capacitor C1).

**Importante:**

En el diagrama se ha supuesto que la tensión de entrada es de 120 volts en CA (corriente alterna). Para un diseño con alimentación de 220 / 240 volts hay cambiar los capacitores por otros con características de tensión mayores.

También se muestran valores de capacitores y diodos. Tomar en cuenta las notas adicionales en la segunda parte de este tutorial.

**Figura 9.6: Diagrama de un duplicador de tensión de onda completa:**

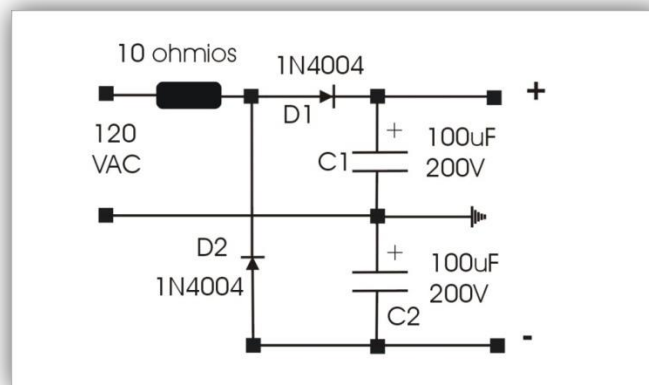


El circuito funciona de la siguiente manera:

En el semiciclo positivo de la sonda de entrada, se polariza en directo el diodo D1 cargando el capacitor C1 a una tensión a  $V_{Max}$ . (Tensión de pico de la onda de entrada) y la polaridad de la carga queda indicada con la polaridad que se ve en capacitor C1. En este semiciclo D2 está polarizado en inverso y no conduce.

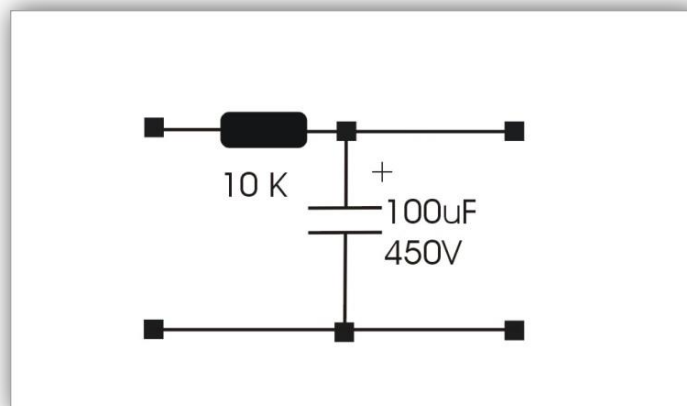
En el semiciclo negativo, se polariza en directo el diodo 2 cargando el capacitor C2 a una tensión a  $V_{Max}$  (tensión de pico de la onda de entrada) y la polaridad de la carga queda indicada con la polaridad que se ve en capacitor C2. Al quedar los dos capacitores en serie, las tensiones almacenadas en se suman, lográndose el duplicador de tensión. Este doblador de tensión se puede utilizar como fuente bipolar (tiene tensión positiva y tensión negativa), si se conecta tierra o el común en la unión entre los dos capacitores.

**Figura 9.7: Duplicador de onda completa bipolar.**



**El rizado:** Para poder reducir el rizado de estas fuentes se puede incluir en su salida un filtro RC (ver el diagrama). La tensión de rizado dependerá de la carga que se tenga.

**Figura: 9.8 Filtro eléctrico- electrónico.**



La corriente  $i$  se demanda poca corriente (poca carga) el rizado es pequeño, si se aumenta la carga, el rizado aumenta. En caso de que se tenga una carga grande se pueden incluir capacitores de mayor valor.

**Resistor limitador de corriente:** En el momento en que estas fuentes son encendidas (ON), la demanda de corriente es muy grande, por lo que se conecta en serie con la entrada del circuito una resistencia de potencia (3W) de 10 ohmios (ver primer y segundo diagramas).

Esta demanda de corriente se debe a que cuando el circuito se enciende los capacitores están descargados y se comportan inicialmente como un corto circuito. La resistencia asegura que la máxima corriente, en el encendido, no sea mayor a 17 amperes.

Ecuación 9.1	$I = \frac{V_{Max}}{10} = \frac{169.2}{10} = 16.92 \text{ Amperios}$
--------------	--

Donde:  $V_{Max} = V_{pico} = 120 \times 1.41 = 169.2$  volts y  $R = 10$  ohmios

El principio de un doblador de tensión se puede aplicar para un número cualquiera de multiplicadores de tensión y permite obtener fuentes de alta tensión de poco amperaje sin dificultad.

A partir de los elementos básicos que integran el doblador de corriente, se puede diseñar un amplificador de clase E para el suministro o fuente de poder del sistema ozonificador.

**Importante:**

En el diagrama se ha supuesto que la tensión de entrada es de 120 volts en CA (corriente alterna). También se muestran valores de capacitores y diodos.

Para un diseño con alimentación de 220 / 240 volts hay cambiar los capacitores por otros con características de tensión mayores<sup>41</sup>.

A partir de esta teoría básica se puede realizar la ingeniería eléctrica para el diseño y la construcción de un sistema eléctrico- electrónico, para el suministro de elevados voltajes. El componente de la figura 30 correspondiente al pre amplificador y amplificador de señales, corresponde a un modulador de frecuencia que hace de la corriente directa que obtenemos del doblador de tensión, la convierte en corriente alterna. Dependiendo de la capacidad de los diodos, capacitores, preamplificadores y amplificadores podemos obtener una tensión y frecuencia más alta de la de entrada. Es importante señalar que la tensión de entrada debe de ser introducida mediante la salida de un transformador, que nos de la tensión o voltaje correcto.

Existe otro dispositivo que nos puede dar alta tensión o voltaje directamente. Los transformadores que son para lámpara de neón pueden darnos una cantidad alta de voltaje.

La lectura básica de teoría en esta sección de esta tesis nos proporciona una idea de como elevar el voltaje de forma eléctrico-electrónico. No es propósito de esta tesis entrar en este detalle del cálculo de cada capacitor o diodo para obtener esta cantidad de voltaje.

<sup>41</sup> [http://www.unicrom.com/Tut\\_duplicadores-tension.asp](http://www.unicrom.com/Tut_duplicadores-tension.asp)

Pero es posible manipular los diferentes componentes que existen en el mercado para obtener nuestra cantidad de energía requerida para poder formar el arco necesario para la descarga corona. Es necesario tener en cuenta algunas reglas básicas si se decide armar un circuito formado por mallas de condensadores capacitores diodos y resistencias.

- Hacer el cálculo necesario por cada malla individual para obtener la cantidad de energía necesaria para formar el arco voltaico y desprender el efecto corona. Cada malla será una etapa.
- Se debe de colocar una resistencia inicial, calculada para no sobrecargar el capacitor, y no quemar los diodos.
- Cubrir los circuitos con barniz de alta tensión con especial énfasis en la unión final donde se puede generar una fuga de corriente.
- El circuito puede ser bañados en resina aislante formando un bloque seguro y de fácil manipulación, la resina puede ser de calcita.
- Instalar los circuitos en una tablilla de cerámica o teflón.
- Este circuito se debe de montar en una base a prueba de fuego como baquelita.
- Como se deben de formar dos series de mallas, una positiva y otra negativa, cada malla deberá ser instalada con una separación de 10 cm o más de distancia.

Actualmente existen en el mercado dispositivos armados directamente para la generación de efecto corona. Así que la parte eléctrica de la fuente de poder puede ser o seleccionada o diseñada para generación de efecto corona deseado. Para efectos de esta tesis, para armar un ozonificador de tipo corona, el amplificador solo se seleccionará en base a la lámpara diseñada, dejando a un lado la ingeniería eléctrica para la construcción de un amplificador de tipo E.

### **10.1 Estimación económica.**

Hasta ahora se explicado los aspectos técnicos de como funciona este ozonificador, la energía que se necesita para producir el efecto corona así como de los accesorios que se requieren para la instalación del sistema ozonificador en la torre de enfriamiento. También se determino el perfil de nuestra torre de enfriamiento y la cantidad de ozono que se necesitaría para tratarla. Hasta este punto se puede realizar la siguiente pregunta: ¿Qué tan rentable es esto?

En esta sección se propone una estimación económica precisa, debido a que la utilización del sistema ozonificador debe de ser sugerido mediante un análisis previo del equipo a tratar. Para el caso de nuestra torre de enfriamiento se tratará de probar que puede ser más económico en comparación de los equipos del mercado, si el perfil del agua a tratar esta contaminada y puede generar biopelícula. Para el caso en el que la empaquetadura tenga biopelícula es necesario un equipo ozonificador de medida correctiva, si el agua se cree que puede generar biopelícula que interfiera con la transferencia de calor y dañen la empaquetadura interna de la torre, se deberá emplear una medida preventiva. También es necesario analizar la salida de agua de la torre, si el agua está siendo vertida a un sistema acuífero como un rio, pueda verterse sin contaminantes, contaminantes como Legionella, así como también evitar exponer a trabajadores u operarios de las torres de enfriamiento a este tipo de bacterias.

El sistema de ozonificación deberá ser parte de un sistema integral, para el tratamiento de agua previo al ser ingresado a un equipo industrial. Aquí se desglosara el precio del sistema de ozonificación en nuestra torre de enfriamiento. Este costo será determinado a partir de las partes individuales del equipo existentes en el mercado.

Se determinará el precio de los componentes del ozonificador, así como de lámparas comerciales, para hacer un balance final contra nuestra lámpara construida.

### **10.2 Insumos.**

Tubo de vidrio, de las medidas indicadas para la fabricación de la lámpara ozonificador. En la selección y listado de los componentes se hará una selección por unidad de cada parte del sistema ozonificador. Estos por precios buscados por unidad fueron encontrados en algunos casos como precio en volumen, por el cual el precio real de cada componente es la parte que solo se utiliza en la construcción del sistema ozonificador y no el precio del volumen; un ejemplo de ello es el tubo de acero inoxidable, el precio del tubo es por una unidad de 2 metros, sin embargo solo se utiliza 15 cm (0.15 m) por lo que el costo debe ser tomado como el solo material usado en la construcción del sistema ozonificador.

**Tabla 10.1: Lista de precio de los principales componentes en la fabricación y ensamble de un sistema ozonificador.**

 <p>Member Id : fqtrade</p>	<p><b>Tubo de vidrio.</b></p> <p><b>Precio: 150\$ pesos Pieza.</b></p>
	<p><b>Tubo de Acero inoxidable.</b></p> <p><b>Precio 600\$ pesos.</b></p>
	<p><b>Transformador para sistema generador de ozono de 4000 a 5000 volts.</b></p> <p><b>Precio 39.90 EUROS Pieza (678.3 \$ Pesos MNX)</b></p> <p><b>1 euro = 17.06\$ pesos MNX (febrero 2015)</b></p>
	<p><b>Lámpara comercial de Ozono.</b></p> <p><b>3 mg / h</b></p> <p><b>Precio 5.45 EUROS. (92.9 \$Pesos MNX)</b></p> <p><b>1 euro = 17.06\$ pesos MNX (febrero 2015)</b></p>

	<p><b>Tablero del tipo NEMA.</b></p> <p><b>Precio: 2809.6 Pesos Pieza.</b></p>
	<p>Sílica gel.</p> <p>Precio 600 pesos ½ Kilogramo.</p>
	<p>Válvula Venturi de Inyección de ozono.</p> <p>Precio 13.5 USD Pieza (200.4 Pesos MNX)</p> <p><b>1 Dólar = 14.85\$ pesos MNX</b> (febrero 2015)</p>
 <p>MODEL:KH-CSP1</p> <p>3/16" Spring check valve</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1.Outer Dia of Air inlet: 4.7mm</li> <li>2.Inner Dia of Air inlet: 3.0mm</li> <li>3.Total Length: 43.5mm</li> <li>4.Body material: PVDF</li> <li>5.Diaphragm material:Viton</li> <li>6.Back pressure:3KG</li> </ol>	<p>Válvula Check resistente al ozono.</p> <p>Precio 2.5 USD. (37.1 \$ Pesos MNX)</p> <p><b>1 Dólar = 14.85\$ pesos MNX</b> (febrero 2015)</p>



	<p>Bomba de Vacío con destructor de ozono. Opcional. Precio 1000 Pesos. Pieza.</p>
	<p>Malla de Acero Inoxidable. Precio 2 USD. (29 \$ Pesos MNX) <b>1 Dólar = 14.85\$ pesos MNX</b> (febrero 2015)</p>

Los componentes descritos anteriormente son los principales en la fabricación y ensamble de un sistema ozonificador. Se describe entre ellos una lámpara de ozonificación comercial, para este balance se va contemplar, la fabricación de nuestra lámpara calculada así como del ensamble de un sistema ozonificador para realizar una comparativa de precios. Ante esta comparativa se podrá determinar que tan rentable es construir la lámpara así como que tan rentable puede ser buscar los insumos necesarios para solo armar el dispositivo. Este es uno de nuestros principales argumentos para defender que; si bien puede ser costoso en un principio el tratamiento de agua con ozono, este costo puede ser cubierto si se contempla que puede ser mas costoso un remplazo total de la empaquetadura. Además de que en esta tesis se propone que las torres de enfriamiento cuenten desde el inicio con el sistema de tratamiento de agua, Ozonificación-filtración. Debido a esto, en principio se ahorraría muchos recursos en el remplazo de empaquetadura causada, por las incrustaciones en la empaquetadura así como de la formación de biopelícula.

Se ha analizado el precio de los insumos para la construcción del sistema ozonificador. Este solo contempla la suma de los precios por los insumos para la construcción de este sistema.

Así mismo, se estima que la construcción de un ozonizador con estas características, es de 3 a 5 días para la construcción total del producto.

Así mismo también se debe de contemplar la posibilidad de no realizar la construcción la lámpara ozonificadora, esto es debido a que existen lámparas que se producen en gran escala y este nos puede reducir los costos de armado

de un ozonificador, pero solo mediante un análisis y comparativa de precios. El planteamiento teórico que se realizó en las secciones anteriores sirve de gran medida para realizar la selección de una lámpara de ozonificación adecuada para el tratamiento requerido en este caso nuestra torre de enfriamiento.

**Tabla 10.2 Balance de Precios (tomados en 2012) en la Construcción del sistema ozonificador.**

<b>Componentes de ozonificador.</b>	<b>Pesos</b>
<b>Tablero de control.</b>	<b>\$2809.6</b>
<b>Tubo de cuarzo</b>	<b>\$150</b>
<b>Malla de Acero</b>	<b>\$29</b>
<b>Tubo de acero inoxidable.</b>	<b>\$50</b>
<b>Transformador electrónico</b>	<b>\$678.3</b>
<b>Tubo para columna de humedad</b>	<b>\$20</b>
<b>Sílica Gel</b>	<b>\$300</b>
<b>Accesorios Varios y sistema de enfriamiento</b>	<b>\$400</b>
<b>Costo mano de Obra. (costo Salario Mínimo)</b>	<b>\$300</b>
<b>Subtotal construcción</b>	<b>\$4736.9</b>
<b>Costo de instalación.</b>	
<b>Válvula Venturi</b>	<b>\$200.4</b>
<b>Válvula Check</b>	<b>\$37.1</b>
<b>Tubería de pvc.</b>	<b>\$100</b>
<b>Sistema destructor de ozono</b>	<b><u>\$1000</u></b>
<b>Mano de Obra Instalación</b>	<b>\$450</b>
<b>Total de Instalación</b>	<b>\$1787.6</b>
<b>Total</b>	<b>\$6524.5</b>

- Costos en Pesos Mexicanos MNX
- Salario Mínimo Tomado a 2015 en 70 pesos/ día.
- Se utiliza una persona para la construcción de una lámpara.

### **10.3 Análisis de costos, Viabilidad Económica.**

Es importante tener costos estimados relacionados con la instalación de sistemas de ozonificación. En general los sistemas de refrigeración pequeños con sistemas de ozonificación tienen un costo aproximado de 15 euros por kW instalados en torres de enfriamiento. En caso de sistemas de refrigeración de

mayor tamaño el costo de instalación de sistemas de ozonificación por KW suele disminuir.

Los gastos de operación para el control de la Legionella.

Los costos anuales estimados para el funcionamiento de un sistema de ozonificación son los siguientes:

Consumo eléctrico para la producción de ozono (10.1 pesos) y (15.15 pesos) / **KW** en sistemas de refrigeración de sistemas pequeños

El costo anual de un tratamiento químico convencional (incluye cloro, y otros biocidas anticorrosivos desincrustantes, etc.) es de (63.8 pesos) euros /**KW**

#### **Gastos de mantenimiento.**

Los costos anuales de mantenimiento del sistema de ozonificación que incluyen cambios y mano de obra son de aproximadamente (3.0 pesos) / kW.

Los costos anuales de mantenimiento de un tratamiento químico convencional que incluye mano de obra y almacenaje de los productos son aproximadamente de (6.5 pesos) /kW de transferencia de calor de la torre.

Para ilustrar los beneficios económicos del uso del ozono en la prevención de la Legionella frente al tratamiento químico convencional, se describen los gastos anuales para un sistema modelo ya establecido como una torre de refrigeración. En los tratamientos comparados se discriminan diferentes partidas de gastos.

**Tabla 10.3 Comparativo de precios de una torre de enfriamiento.**

<b>Partida</b>	<b>Tratamiento Químico</b>	<b>Tratamiento con ozono</b>
<b>Construcción o</b>	10500	6055.1 pesos
<b>Compra de equipo</b>	(sistema Weteland) <sup>42</sup>	
<b>Funcionamiento eléctrico</b>	0	10 pesos kW/h
<b>Productos Químicos</b>	63.80 pesos	0 pesos
<b>Mantenimiento mano de obra y otros.</b>	6.5	3.0 pesos
<b>Consumo de energía eléctrica de la planta</b>	0.8 pesos	0.1 pesos
<b>Costo total.</b>		
<b>Tomando una corrida De operación.</b>	<b>10571.0</b>	<b>6068.2</b>

Los datos de consumo eléctrico fueron tomados de la tarifa 5 de la Comisión Federal de Electricidad del año 2012, en \$ pesos/ KW-h, (0.809 pesos, primeros 75 KW –h).

Como se puede ver en este ejemplo, el correcto análisis, diseño, construcción, enfriamiento e instalación del sistema ozonificador, puede resultar más

<sup>42</sup> <http://www.bvsde.paho.org/bvsAIDIS/PuertoRico29/mantilla.pdf>

económico que un sistema de tratamiento químico para torres de refrigeración o enfriamiento<sup>43</sup>.

Para las torres de enfriamiento de mayor capacidad, es necesario realizar un estudio sobre los periodos de mantenimiento en los equipos. Para estos casos es necesario programar en estos periodos de mantenimiento, si es en el caso correctivo, analizar el consumo total de energía eléctrica que el sistema ozonificador consumirá. En el caso preventivo, el consumo eléctrico aumentará y se deberá realizar el balance en costos sobre el consumo energético.

Para el caso de nuestra torre de enfriamiento, el consumo eléctrico es mínimo, debido a que partimos de una empaquetadura teórica. La torre de enfriamiento tiene 2 periodos de mantenimiento durante el año. Aunque estos periodos de mantenimiento solo contemplan a los componentes eléctricos. El sistema ozonificador podría utilizarse sin problemas con el consumo mínimo de energía eléctrica. El sistema ozonificador se estima que consuma la energía de aproximadamente 60 watts durante el periodo de utilización.

El costo de operación de un sistema de tratamiento químico comparado contra un sistema de tratamiento con ozono, se comprueba que el tratamiento con ozono es 57.4% más económico.

La comparativa del tubo comercial vs tubo fabricado, es 92.9 \$ Pesos. Tubo de vidrio comercial vs 60 \$ Tubo de vidrio Fabricado, nos muestra que: el tubo fabricado es 64.5 % más económico que un tubo comercial, sin embargo hay que tomar en cuenta que los materiales cotizados son para un tiraje de producción de 4 a 5 lámparas.

El análisis nos Arroja que es más económico la construcción de un sistema de lámpara ozonificadora que una comercial. Y en comparación con un sistema de tratamiento químico, el sistema ozonificador tiene amplias ventajas, siendo un sistema óptimo para operar en el caso de nuestra torre de enfriamiento.

---

<sup>43</sup> Manual de aplicaciones del ozono para el control de la Legionella. Universidad y ciencia de la comunidad de Valencia

### 11.1 Tiempo de operación para la ozonificación del tanque de abastecimiento de la torre de enfriamiento.

Cuando la aplicación del sistema de ozonificación sea de índole preventiva o de diseño, se podrá aplicar el ozono desde la reserva de agua que abastece a la torre de enfriamiento.

Para este caso se puede instalar el sistema ozonificador en los tanques de almacenamiento de agua, así de esta forma se dispondrá de agua libre de bacterias desde su abastecimiento, hasta su paso a la torre de enfriamiento.

Para este caso es necesario instalar un sistema de ozonificación de mayor capacidad de producción de ozono. Así, si se dispone de un tanque de 1500 litros,  $1.5 \text{ m}^3$ , se puede proponer una producción de 1.5 g de ozono. Esta forma de dosificación tiene que ser mediante burbujeadores, distribuidos en el interior del tanque. La función de los burbujeadores es análoga al sistema de inyección de tipo Venturi. Los burbujeadores hacen que el ozono que se este produciendo, llegue al seno del tanque de agua. Esta función y aplicación es la mas practica, incluso, se puede colocar el destructor de ozono diseñado y seleccionado en la parte superior del tanque de abastecimiento.

A partir del volumen que se estableció para el tanque, se comienza a diseñar el sistema ozonificador. Este sistema consiste en aplicar un flujo de aire correcto y así determinar el tiempo de operación del ozonificador, así como de la concentración que se esta aplicando al volumen total de agua al tanque.

Para un flujo de aire de 2.22 L/min se tiene que:

$$\left(1.5 \frac{g}{h} \times 1 \frac{h}{60 \text{min}}\right) \times 0.20946 \frac{g}{\text{min}} = 5.2365 \times 10^{-3} \frac{g}{\text{min}} = 5.2365 \frac{mg}{\text{min}}$$

Dividiendo por el flujo:

$$\frac{5.2365 \frac{mg}{\text{min}}}{2.22 \frac{l}{\text{min}}} = 2.35 \frac{mg}{l}$$

Esta es la concentración que se tiene para tratar el agua durante 1 minuto.

A partir del factor CxT expuesto en el capítulo 5, y tomando como bacteria presente a la Legionella, se tiene que:

$$C \times T = 0.3$$

Despejando el tiempo de aplicación de ozono para la desinfección de 1 litro de agua.

$$T = \frac{0.3}{C} = \frac{0.3}{2.35} = 0.127min$$

Tomando el tiempo de 1 minuto y aplicándolo para los 1500 litros de agua que pertenecen al contenedor se tiene un tiempo total de aplicación de:

$$\frac{0.127min}{l} \times 1500l = 190.5min = 3.175h$$

Cabe recordar que este tiempo de dosificación de ozono fue estimado para un flujo de **aire** como gas vehículo de 2.22 l/min y una producción de la lámpara de ozonificación de 1.5 g/h.

Se puede de esta forma “jugar con el flujo de gas vehículo” así como en la producción de los sistemas ozonificadores.

Los efectos de este juego son los siguientes.

- ❖ Si se reduce el flujo de aire la concentración de ozono aumenta, por lo tanto el tiempo de dosificación, por litro y total de agua, disminuye. Para desinfección de la Legionella.
- ❖ Si se aumenta la producción de ozono (g/h) manteniendo el flujo constante de gas vehículo, la concentración de ozono aumenta y el tiempo de dosificación por litro y total de agua disminuye para la desinfección de Legionella.
- ❖ Si la producción de ozono permanece constante, el flujo de gas vehículo permanece constante, se puede variar el tipo de gas vehículo, cambiando aire por oxígeno, de esta forma la concentración de ozono aumenta y el tiempo de dosificación por litro y total de agua disminuye para la desinfección de Legionella.

Es importante determinar la cantidad de ozono que se disuelve en el agua, y la cantidad de ozono que se libera a la atmosfera interna del tanque, sin embargo colocando el destructor de ozono, se asegura que el ozono “residual” es destruido, así de esta forma, los alrededores del tanque de agua estarán libres de ozono, o en su defecto, por debajo de la norma ambiental (0.11ppm).

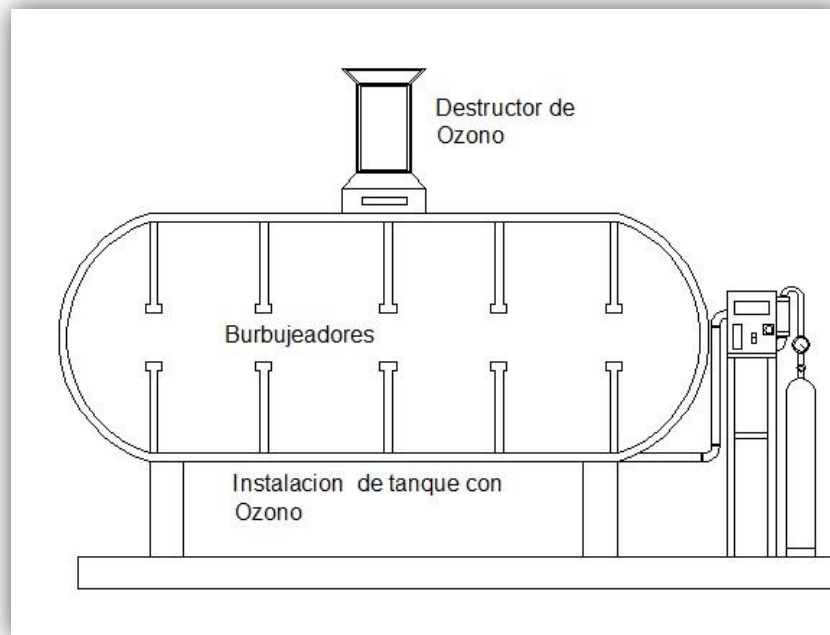
Mediante el análisis anterior, se puede establecer el diseño y el tiempo de operación para diferentes volúmenes de tanque, para nuestro caso es un tanque de aproximadamente 1500 litros, por la cual es posible un tratamiento de agua con ozonificación.

Si se tiene un tanque de 5000 litros se puede realizar un ajuste para disminuir el tiempo de aplicación. Con las condiciones anteriores de flujo (2.22 l/min) y como gas vehículo siendo aire, y una producción de lámpara del ozonificador de 1.5 g, se tendría un tiempo de operación de 10.58 horas. Este tiempo es un tiempo muy grande para considerarse como un tiempo óptimo para un acondicionamiento de agua. Por lo tanto se necesitaría aplicar una de los efectos descritos anteriormente. En este caso, se decide incluir oxígeno como gas vehículo.

Con esto, la concentración de ozono se incrementa a 11.26128 mg/l, con un tiempo de aplicación de 0.026 min, para tratar 1 litro de agua, de esta forma el tiempo completo para tratar los 5000 litros es de 133.19 min (2.219 h), para desinfectar Legionella.

La siguiente figura muestra la propuesta de configuración de un sistema ozonificador instalado a un tanque de 5000 litros. La forma de inyectar es mediante los burbujeadores.

**Figura 11.1. Sistema ozonificador en un tanque de abastecimiento.**





### **Conclusiones.**

El diseño teórico de un sistema ozonificador, puede resultar sencillo.

### **Los objetivos de esta tesis que se cumplieron.**

- Se partió de una ecuación de diseño para encontrar el dimensionamiento y los materiales adecuado para la construcción de un sistema ozonificador. Se encontró el dimensionamiento necesario para producir la cantidad necesaria de ozono para la aplicación deseada.
- Se estimó el perfil de una torre de enfriamiento para encontrar la óptima instalación de un sistema ozonificador.
- Se Analizó y calculó las variables de una torre enfriamiento, se encontró el volumen necesario de agua para realizar la aplicación de ozonificación.
- Se estimó el perfil bacteriológico de agua para estimar el tiempo de aplicación.
- Mediante ecuaciones teóricas básicas de balance de materia y energía, se estimó la cantidad de energía necesaria para formar un arco eléctrico de efecto corona.
- Se ajustó el balance de materia y energía a la ecuación de diseño y estimar la potencia de operación del sistema ozonificador.
- El análisis nos muestra que es económicamente preferible usar un sistema ozonificador que un sistema de tratamiento Químico.

La columna central, se basa en encontrar la fuente de poder ideal que suministre la cantidad de voltaje necesario para formar el arco de la descarga corona. En esta tesis se abordó una aplicación práctica del uso del ozono para una torre de enfriamiento, esta aplicación mostró que puede correr mediante 2 variantes, como un sistema preventivo (de diseño tanto en un tanque de agua de abastecimiento o instalado previamente en el diseño de una torre de enfriamiento) o como un sistema correctivo, instalando un sistema ozonificador en una torre de enfriamiento contaminada ya existente. En ambas ejecuciones, es necesario seleccionar ciertas condiciones de operación así como determinar el perfil de agua a desinfectar. También es importante determinar el material adecuado de la torre de enfriamiento.

Estas condiciones de operación pueden resultar complicadas de establecer en un principio, pero de fácil dominio al conocerlas en su totalidad, nos ayuda a seleccionar el instalar un ozonificador correcto para equipos industriales.

Ahora bien en términos económicos, se tiene la expectativa que un sistema ozonificador puede resultar por demás costoso. Sin embargo los costos pueden reducirse si se cuenta con las condiciones de operación antes mencionadas.

En la actualidad se diseñado y fábrica sistemas ozonificador para equipos industriales en general cubriendo torres de enfriamiento, chillers intercambiados de calor y sistemas de aire acondicionado. La principal función de estas empresas solo se ha limitado a ensamblar sistemas ozonificadores,

esto se debe a que la manufactura de los aditamentos se fabrica en gran escala, pero no se diseñan aditamentos específicos para ciertas aplicaciones. Aun así, el ensamblado de un sistema ozonificador no es costoso.

El factor económico que impera sobre la fuente de poder, es la principal limitante para reducir los costos de los ozonificadores, este componente depende de un diseño de ingeniería eléctrica. Pero se puede lograr a vencer esta limitante si se realiza un análisis de consumo energético como diseño primario de los equipos.

Los inconvenientes que se presentaron en la realización del diseño de nuestro ozonificador, radicó en el volumen neto de contacto entre el agua y la empaquetadura interna de la torre de enfriamiento. Esto fue causado por que la empaquetadura de nuestra torre piloto, no cumple con las características comerciales y usuales de las torres de enfriamiento industriales. En ese punto se tuvo que suponer una empaquetadura de tipo rudimentario, que resulta de alta eficiencia, además que el material de esta empaquetadura es muy similar a la empaquetadura común de las torres de enfriamiento.

Ante la imperativa necesidad de aplicar diversos tratamientos de agua para equipos industriales, el uso del sistema ozonificador no pretende remplazar a un sistema completo de tratamiento. Su función y el sentido de esta tesis es mostrar cómo se debe integrar a un tren de tratamiento de agua para torres de enfriamiento, y su aplicación a la desinfección de bacterias presentes de efecto negativo en un equipo industrial. El sistema ozonificador trata de mostrar alternativas a estos trenes de tratamiento. Si se conoce bien el perfil de agua puede diseñarse correctamente nuestro ozonificador. Su objetivo de aplicación debe de centrarse en el poder desinfectante que el ozono tiene, y en la remoción de manganeso del agua. El ozono no quitará minerales y sales del agua. Si existen minerales disueltos, se deberá integrarse a un tren de filtración, para que en conjunto pueda dar un tratamiento integral al agua de abastecimientos los sistemas industriales.

El punto importante a cubrir obligadamente es: No sobre pasar los límites permitidos de exposición para personas. El uso correcto de una concentración correcta nos dará las ventajas que el ozono como desinfectante posee.

El uso del ozono es común, en México se desconoce en gran medida el campo de aplicación. Son pocas las empresas que ofrecen la ozonificación como la alternativa al tratamiento químico como desinfectante, sin embargo representa un mercado creciente. En Europa es muy común encontrar tratamientos con ozono, tratamientos que van desde terapia médica, hasta uso industrial.

La ecuación de diseño nos permite realizar un diseño de aproximación muy buena del generador de ozono, el punto clave de esta ecuación de diseño es el voltaje que se debe suministrar así como la función de onda que nos permite modular la frecuencia de operación, esta alta frecuencia es la que nos permite reducir en gran medida el tamaño y el costo de nuestro sistema ozonificador. La selección de esta alta frecuencia no es tarea sencilla, ya que se necesita de una simulación. Pero es posible diseñar e instalar un equipo de ozonificación que sea eficiente en el tratamiento de biopelícula en una torre de enfriamiento.

## Anexos.

### Anexo 1.

#### Comparación entre gases de alimentación, elección de eficiencia.

Parámetro (a presión Manométrica a de 68.95 kPa)	Aire Ambiente con Punto de rocío+ 2°C( 20.62 % de humedad relativa) y 33 ° C de temperatura	Oxígeno con punto de rocío de -60°C y 33°C de temperatura	Diferencia
Concentración de ozono, Máxima, C	5.2 g /Nm	74.5 g /Nm	14.32 veces
Concentración mínima de ozono C	3.1 g/ Nm3	22.5 g/Nm3	7.25 veces
Producción de ozono a concentración máxima de ozono Pd	0.468 g/h	2.235 g/h	4.77 veces
Producción de ozono a concentración mínima Pd	0.093 g/h	2.7 g/h	29 veces
Eficiencia Eléctrica Máxima n	2.88%	15%	5.2 veces
Eficiencia eléctrica mínima n	0.416%	9.64 %	23.17 veces
Eficacia Máxima Ef	34.58 g/kWh	180.7 g/kWh	5.22 veces
Eficacia Mínima Ef	5 g/KWh	115.71 g/kWh	23.14 veces
Costo por gramo de ozono en pesos (enero 2005)	\$4.00	\$229.67	57.41 veces

## Anexo 2.

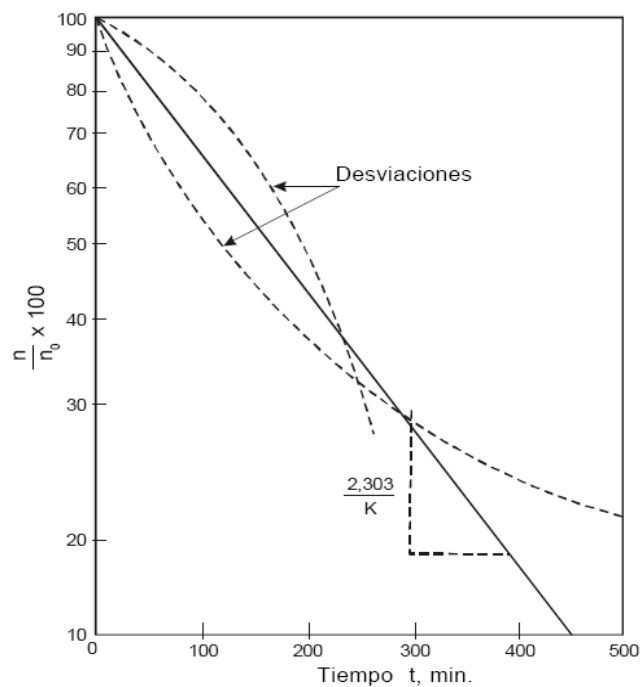
### Teoría sobre el factor de desinfección CxT.

El producto de la concentración del bactericida de "C" en mg/L medida como residual por el tiempo de contacto "T" en minutos. Predice la eficiencia bactericida. Se desprende de la Ley de Chick Watson. Es función de la temperatura, el ph y de la química del agua.

- Sigue una cinética de 1º orden en t
- $\ln(N/N_0) = -kCT$
- k : constante de reducción del microorganismo
- % inactivación :  $(1 - N/N_0) \times 100$

Log Inactivation	Percent Inactivation
0.0	0.00
0.5	68.38
1.0	90.00
2.0	99.00
3.0	99.90
4.0	99.99
5.0	99.999
6.0	99.9999
7.0	99.99999

Representación gráfica de la ley de Chick

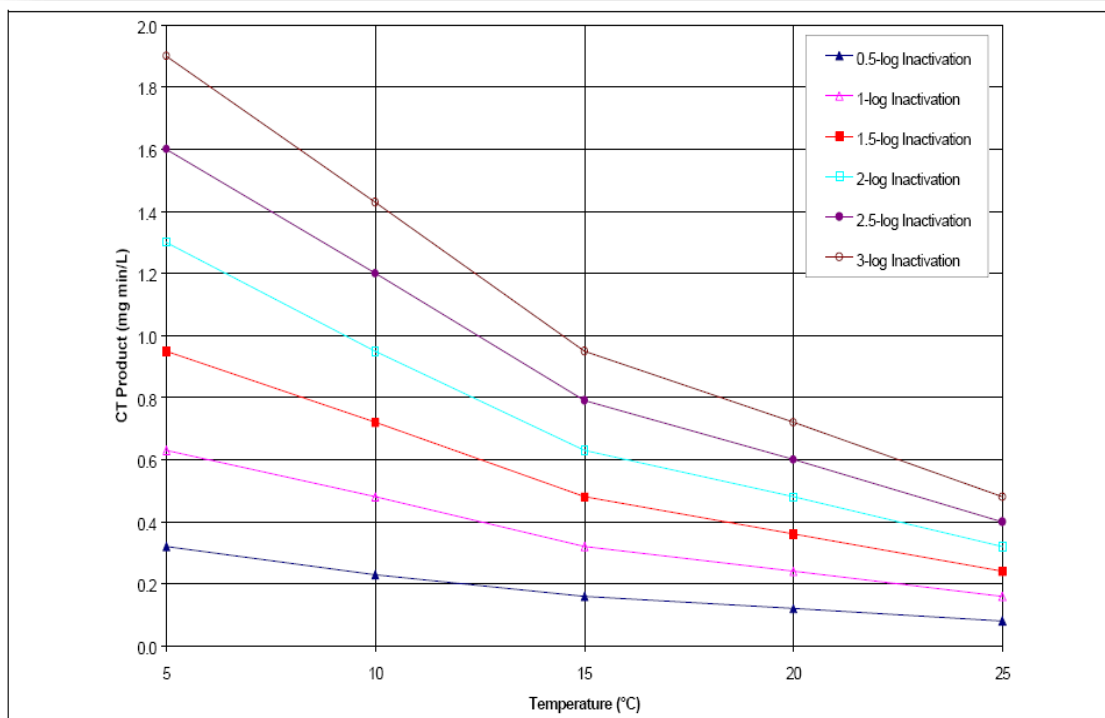


Valores de inactivación de virus, en función del pH y la temperatura usando cloro como gas desinfectante.

**CT Values for Inactivation of Viruses by Free Chlorine**

Temperature °C	Log Inactivation					
	2.0 Log		3.0 Log		4.0 Log	
	pH 6 - 9	pH 10	pH 6 - 9	pH 10	pH 6 - 9	pH 10
0.5	6	45	9	66	12	90
5	4	30	6	44	8	60
10	3	22	4	33	6	45
15	2	15	3	22	4	30
20	1	11	2	16	3	22
25	1	7	1	11	2	15

Valores CT de inactivación para Giardia con gas ozono como desinfectante.



**Figure 3-9. CT Values for Inactivation of Giardia Cysts by Ozone (pH 6 to 9)**

## Anexo 3

### Tablas de hojas de datos de los componentes.

#### Hojas de datos de cada componente.

#### Tubo de Vidrio y cuarzo.

##### Descripción de Producto

Tubo de cristal de StQuartz/tubo claro del cuarzo/tubo de vidrio:

1. Utilizado en campos de la calefacción.
2. La función del tubo de cristal claro de cuarzo:

Serie

XDT1

Densidad

2.2x 103kg/m<sup>3</sup>

Rigidez

570KHN100

Expansibilidad térmica 5.5x el 10-7cm/cm.

Conductividad termal el 1.4W/m.

Calor específico

660J/kg

Punto de fusión

1630.<sup>44</sup>

#### Tubo de Acero Inoxidable.

Tubo de acero inoxidable del tipo 304 cedula 10 de 1 1/2 (nominal) de diámetro exterior que equivale a 1.900 milésimas o 48.2 mm, de diámetro interior tiene 1.682 milésimas o 42.7 mm X 2 (Dos metros) de largo. El tubo es nuevo y es acabado industrial (sin pulir y con costura).<sup>45</sup>

#### Gabinete tipo NEMA

Estos gabinetes son utilizados principalmente en instalaciones industriales, comerciales y residenciales.

##### Características

- Acero al carbón
- Empaque de neopreno
- Instalación a tierra
- Bisagra Galvanizada Reforzada
- Puerta y Placa desmontables

<sup>44</sup> <http://es.aliexpress.com/item/Diameter-300mm-Quartz-tube/544055206.html>

<sup>45</sup> [http://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-406368944-vendo-tubo-de-acero-inoxidable-del-tipo-304-\\_JM](http://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-406368944-vendo-tubo-de-acero-inoxidable-del-tipo-304-_JM)

- Chapa llave de cuarto de vuelta
- Tornillería Galvanizada

### Acabados

- Gabinete: Pintura en polvo electrostática color Beige Poliéster Texturizado horneada a 190°
- Platina: Pintura en polvo electrostática color Blanco Liso
- Antes de todo proceso de pintura se desengrasan, fosfatizan y sellan todas las piezas para mayor durabilidad y un mejor acabado.

### Medidas

Las medidas están en centímetros

Se fabrican medidas especiales sobre pedido

\* PRECIOS SUJETOS A CAMBIO SIN PREVIO AVISO

\* PRECIO NO INCLUYE IVA

\* PRECIO L.A.B.<sup>46</sup>

### Válvula check.

#### Datos Técnicos de Válvula Check.

Capacidad de suministro:	<b>10000 Pedazo/pedazos por Día Hasta cantidad de la orden</b>
Paquete:	la bolsa de plástico y burbuja envueltas, encajonado en pequeño cartón
Plazo de entrega:	generalmente 3-5 días laborales para las órdenes pequeñas o medias

Estándar o no estándar:	<b>Estándar</b>	Estructura:	<b>Diafragma</b>
Presión:	3Kg	<b>Energía:</b>	Hidráulico o neumático
Material:	PVDF	<b>Temperatura de medios:</b>	Temperatura media
Medios:	Das o agua	<b>Tamaño del Puerto:</b>	4.7m m
Lugar del origen:	China (continente)	<b>Número de Modelo:</b>	KH-CSP1
Marca:	K-Salud	<b>Diámetro externo de la entrada de aire:</b>	4.7m m
Diámetro	3.0m m	<b>Longitud</b>	43.48m m

<sup>46</sup>

[http://www.proyectra.com/index.php?page=shop.product\\_details&flypage=flypage.tpl&product\\_id=55&category\\_id=10&option=com\\_virtuemart&Itemid=79&vmcchk=1&Itemid=79](http://www.proyectra.com/index.php?page=shop.product_details&flypage=flypage.tpl&product_id=55&category_id=10&option=com_virtuemart&Itemid=79&vmcchk=1&Itemid=79)

interno de la entrada de aire:		<b>total:</b>	
Material del cuerpo:	PVDF	<b>Material del diafragma:</b>	Viton
Muestra libre:	Disponible		
Lugar del origen:	China (continente)	Marca:	BWT
Número de Modelo:	BWT-V004	Material:	PVDF

### Datos básicos del producto

#### Especificaciones

Válvula de check resistente del resorte del ozono excelente de PVDF 3/16 " una buena clase de accesorio del generador del ozono/de muestra libre que cabe disponibles

La válvula de cheque resistente del resorte del ozono excelente de PVDF 3/16 " es una buena clase de accesorios o de guarniciones del generador del ozono. Ozono resistente/prueba

#### Válvula Venturi.

#### Datos Técnicos Válvula Venturi

Capacidad de suministro:	<b>10000 Pedazo/pedazos por Cuarto o</b>		
Paquete:	CTNS		
Plazo de entrega:	20 Días después del trabajo.		
Estándar o no estándar:	<b>Estándar</b>	Estructura:	<b>Manorreductor</b>
Presión:	Presión media	<b>Energía:</b>	Hidráulico
Material:	Fundición	<b>Temperatura de medios:</b>	Temperatura normal
Medios:	Agua	<b>Tamaño del Puerto:</b>	20m m
Lugar del origen:	China (continente)	<b>Número de Modelo:</b>	23006
Marca:	triumfo	<b>Venturi:</b>	válvula de cheque



## **Especificaciones**

Venturi PVDF para el agua que se mezcla, corriente del ozono: longitud total de 0.1~1 toneladas: 145mm.

### **Características:**

- 1). El tubo de mezcla del agua del gas (inyector) con flujo bajo y pequeño volumen fue diseñado especialmente para los pequeños productos del tratamiento de aguas
- 2). El diseño mezclado único de la cámara de aire y la inyección mezclada fuerte del agua y del aire hacen la mezcla bien-distribuida, terminan, y hacen las burbujas exquisitas, mezcladas con eficacia alta, el consumo de energía baja y la vida de servicio larga.

### **Uso:**

Pequeños equipos de la ayuda del generador del ozono.

Todas las clases de pequeña mezcla del gas-agua del tratamiento de aguas.

### **Especificación:**

1/4 " entrada del aire, entrada del agua del 1/2"

Corriente: 0.1~1 toneladas

Longitud total: 145m m

La estructura compacta, mantenimiento simple, instalación rápida, operación confiable, esté lista para comenzar o para parar en cualquier momento y operación automática

Construcción durable de PVDF.

Válvula de cheque incluida en puerto de inyección.

### **Nota:**

La temperatura del agua debe ser 0°C~60°C;

El valor de pH del agua debe ser 5~11;

Los líquidos mezclados no son líquidos inflamables, la longitud de impurezas zonales no están más de largo de 25 cm, el diámetro de las impurezas del gránulo es menos de 4 milímetros en agua<sup>47</sup>.

## **Sílica gel en empaques de 500 g.**

### **CON INDICADOR DE SATURACION**

Especial para generadores de ozono u otros procesos que tengan algún tipo de contacto humano, esta sílica gel es de color ámbar o naranja libre de agentes cancerígenos. Toma su tonalidad de la violeta de genciana la cual es totalmente inofensiva para el ser humano y es utilizable para algunos procesos farmacéuticos y alimenticios cuando se satura de humedad se torna color

---

<sup>47</sup> <http://spanish.alibaba.com/product-gs/venturi-valve-1-4-inch-airinput-1-2inch-water-input-ozone-venturi-508844968.html>

violeta además se puede regenerar en varias ocasiones metiéndola en el microondas de 4 a 8 minutos.<sup>48</sup>

### **Destructor de ozono**

Es un filtro con siete tipos de membranas para que el aire succionado por la bomba de vacío pueda recircular por el destructor de ozono<sup>49</sup>.

### **Malla de Acero Inoxidable.**

Malla de alambre de acero inoxidable producidos por el proveedor se clasifican en dos tipos según el tejido de los patrones: tejido liso tejido de sarga y alambre de acero inoxidable de malla tejido llano es el más comúnmente usado tejer. Cada hilo de urdimbre pasa alternativamente por encima y debajo de cada hilo de trama. Hilos de urdimbre y trama en general tienen el mismo diámetro. Tejido Twill alambre de acero inoxidable de malla está formado por cada uno de trama de alambre pasando alternativamente en dos y a continuación, en virtud de dos hilos de urdimbre y cada hilo de urdimbre pasa alternativamente en dos y en dos hilos de trama. Es posible que se utilicen para permitir un nivel más pesado que el diámetro del hilo. Alambre de acero inoxidable de malla variedades de acuerdo a los materiales: acero inoxidable cuadrados de malla de alambre de acero inoxidable tipo 304 cuadrados de malla de alambre de acero inoxidable tipo 304L cuadrados de malla de alambre de acero inoxidable tipo 316 cuadrados de malla de alambre tipo 316L Usos: El acero inoxidable de malla de alambre y tela de alambre de acero inoxidable de productos ampliamente utilizadas en el petróleo, industria química, la protección del medio ambiente, la mía, el espacio aéreo, la fabricación de papel, electrónica, metalurgia etc. Especial tamaño y las especificaciones están disponibles de acuerdo a los clientes requisito. Malla de alambre de acero inoxidable Tamaños: Standard rollo ancho: 1m a 48 de longitud estándar de rollo: 30 a 100<sup>50</sup>.

---

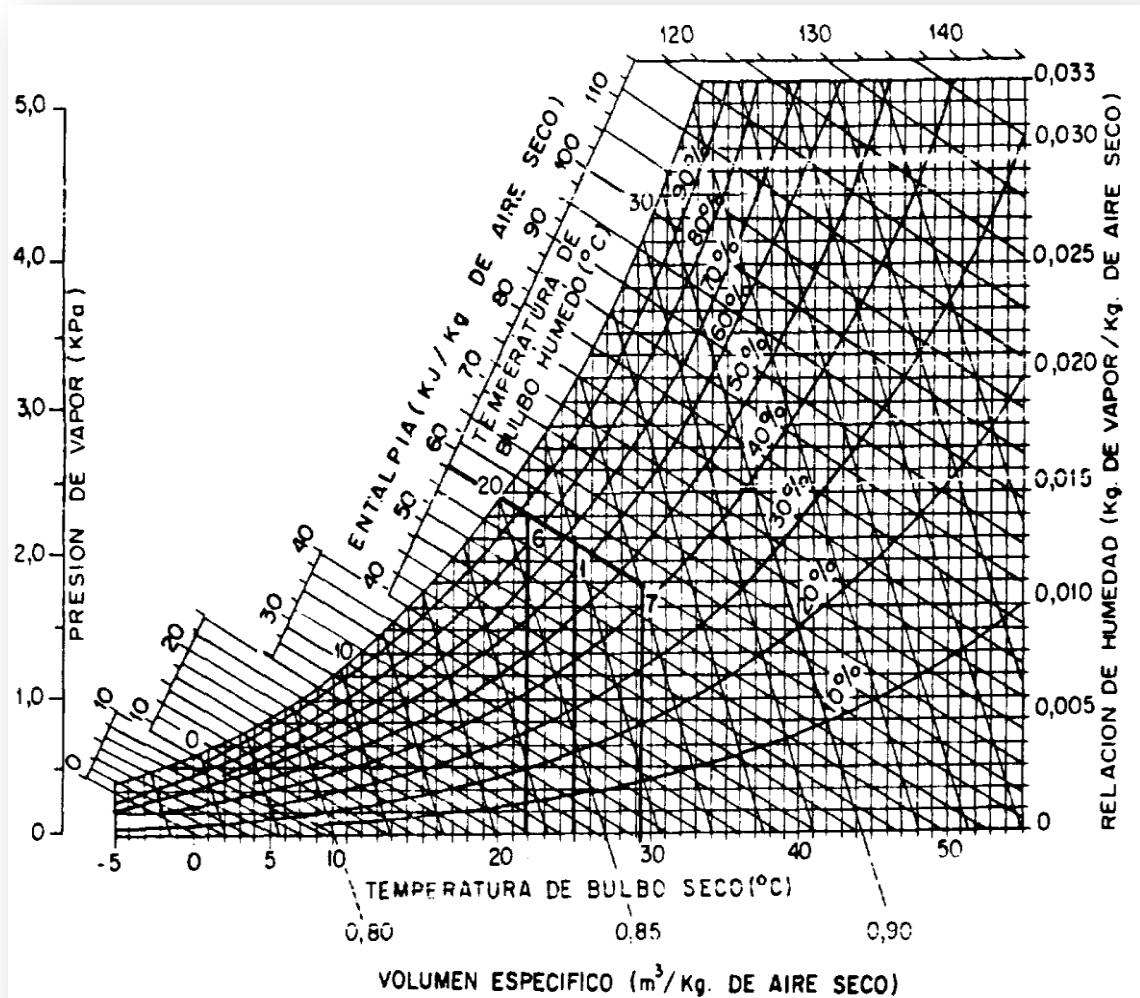
<sup>48</sup> [http://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-408518533-silica-gel-secante-de-humedad-para-generadores-de-ozono-\\_JM](http://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-408518533-silica-gel-secante-de-humedad-para-generadores-de-ozono-_JM)

<sup>49</sup> [http://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-75524617-destructor-de-ozono-\\_JM](http://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-75524617-destructor-de-ozono-_JM)

<sup>50</sup> <http://www.latincomercio.com/goods/1110/qa.html#module>

## Anexo 4 Nomogramas.

### Carta Psicrometrica.<sup>51</sup>

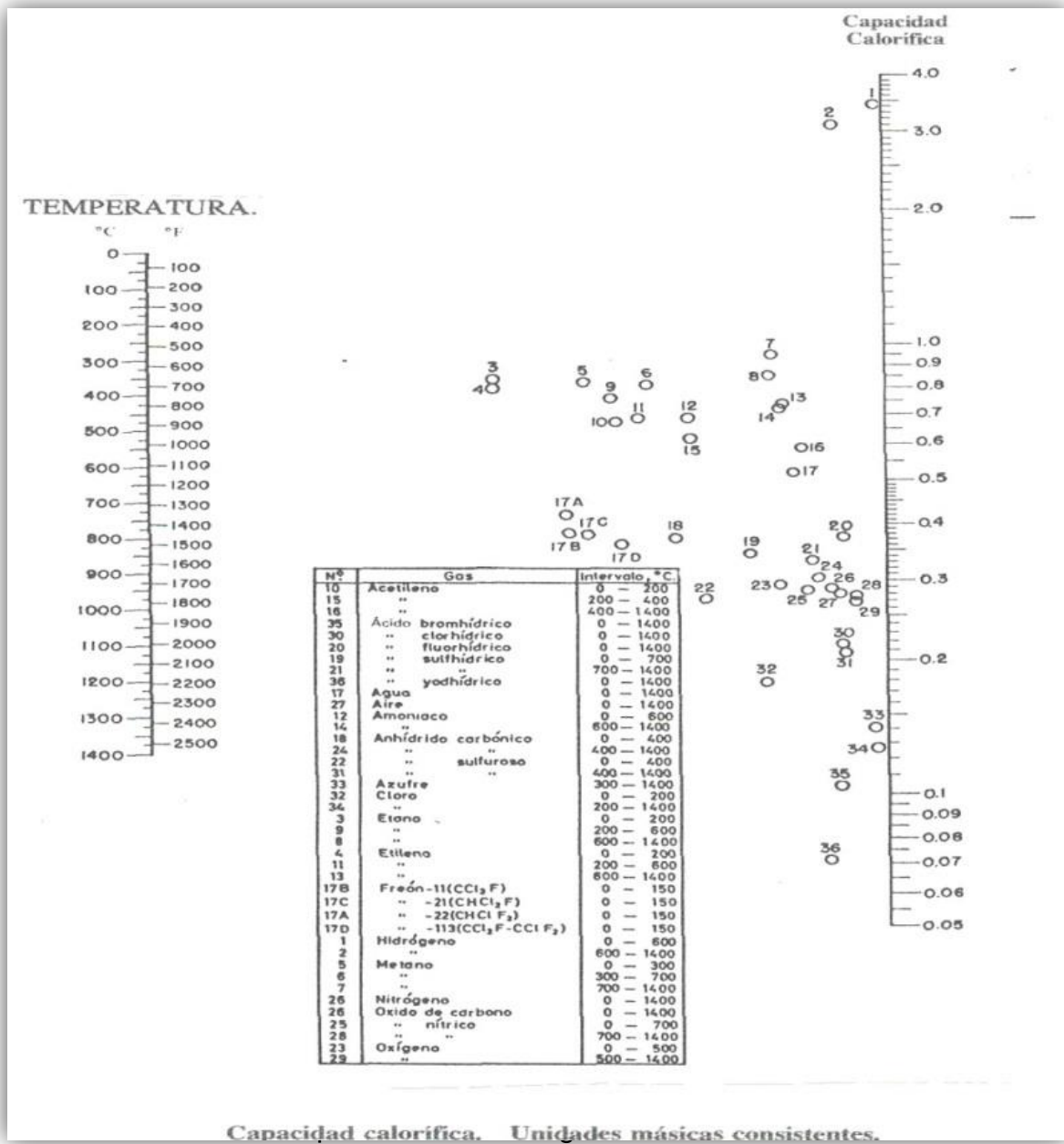


51

<http://www.google.com.mx/imgres?q=Carta+psicrometrica+Kg+de+vapor+Kg+de+agua&hl=es&biw=1024&bih=653&tbn=isch&tbnid=uwZYgQ1Fuv5VPM:&imgrefurl=http://www.fao.org/docrep/X5027S/x5027S0o.htm&docid=mP7dnBGMsi7nwM&w=1656&h=1194&ei=CttGTtCIN8PJsQL8u-mSCA&zoom=1&iact=rc&dur=215&page=5&tbnh=145&tbnw=201&start=48&ndsp=13&ved=1t:429,r:10,s:48&tx=135&ty=114> Tomado el día 13-08-2011, 3.22PM

## Anexo 5

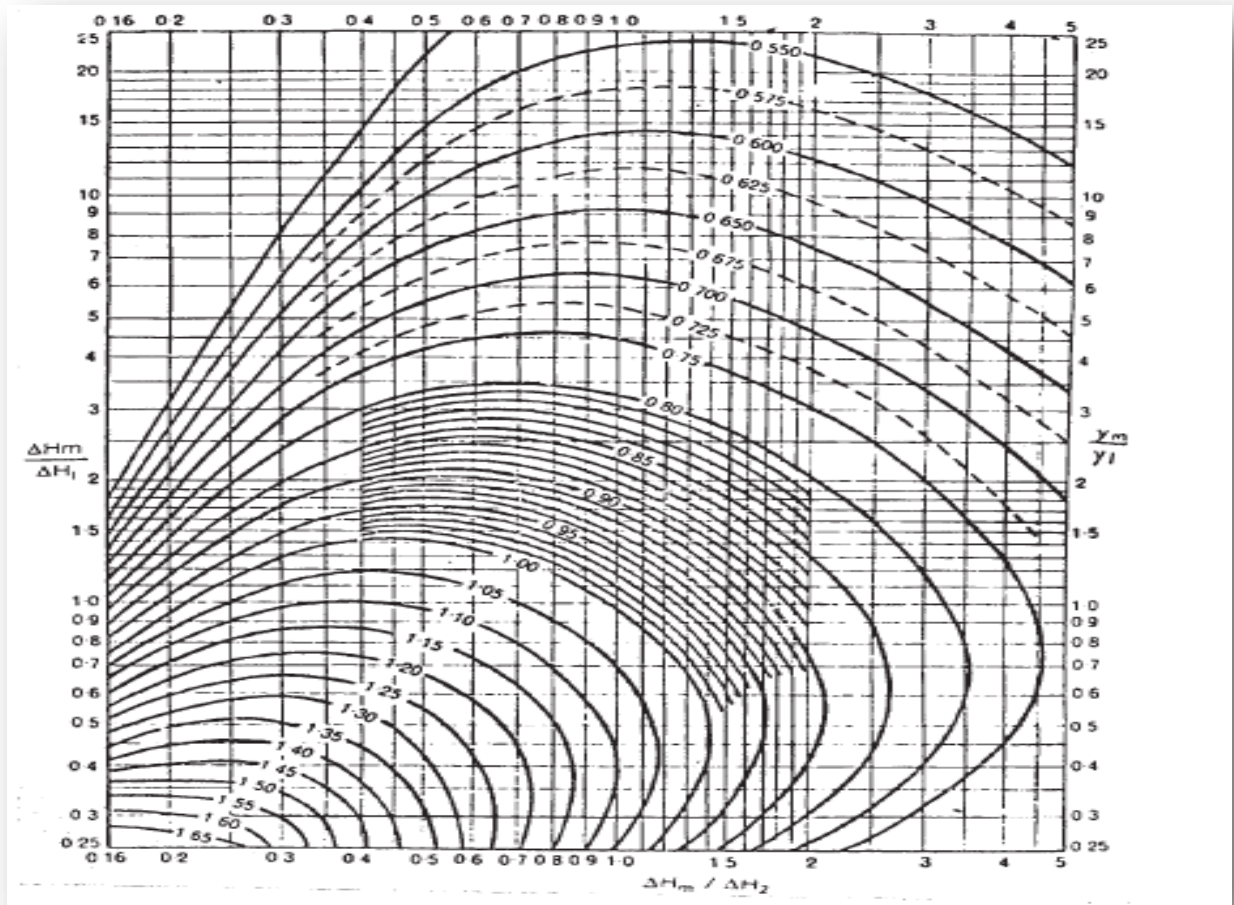
### Nomograma para estimación de capacidades caloríficas.<sup>52</sup>



<sup>52</sup> Manual del ingeniero Químico; PERRY, 6ª edición, pp. 3-169

## Anexo 6

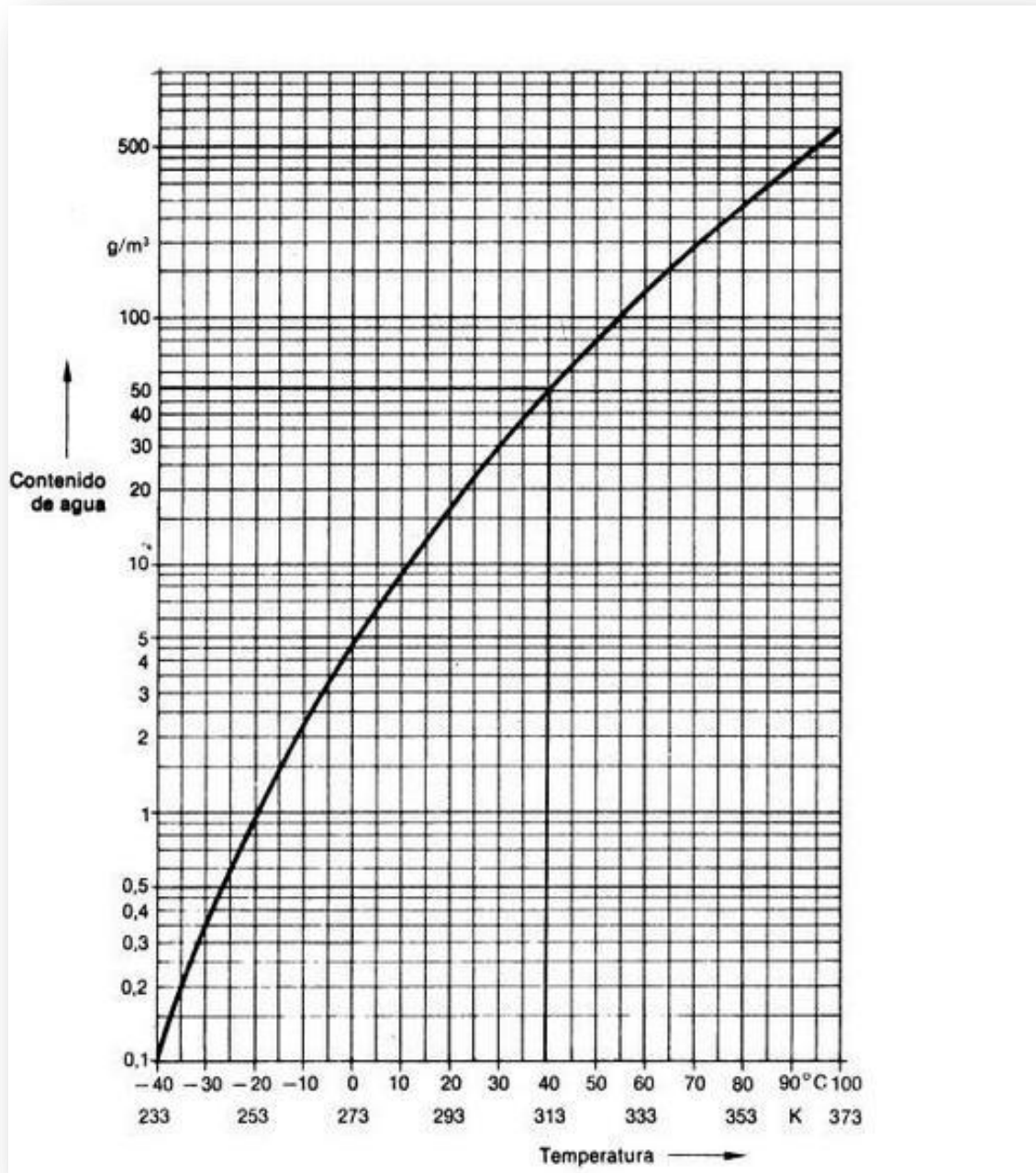
### Nomograma para estimación del factor de corrección y fuerza impulsora<sup>53</sup>.



<sup>53</sup> Manual de Practicas de laboratorio de Ingeniería Química; Proceso de Separación 2, Facultad de Química UNAM, Apéndice 1, Pág. 96

## Anexo 7

### Grafica punto de rocío vs humedad<sup>54</sup>.



<sup>54</sup> <http://www.sapiensman.com/neumatica/neumatica5.htm>

## Anexo 8

### Estimación de desecantes por unidad<sup>55</sup>.

Bolsas de plástico o materiales flexibles sellados a prueba de humedad		Tambo o contenedores Rígidos de metal con Barreras Selladas y cubiertas de fibra			Unidades de Desecante Requeridas
Pies Cuadrados	Pulgadas Cuadradas	Galones	Pies Cúbicos	Pulgadas Cúbicas	
0.1	15	1.1	0.14	237	1/6
0.2	30	2.1	0.28	476	1/3
0.3	45	3.2	0.42	714	1/2
0.6	90	6.2	0.83	1,428	1
1.3	180	12.5	1.67	2,856	2
1.9	270	18.7	2.50	4,284	3
2.5	360	25.0	3.33	5,712	4
3.1	450	31.2	4.16	7,140	5
3.8	540	37.4	5.00	8,568	6
4.4	630	43.6	5.83	9,996	7
5.0	720	50.0	6.66	11,424	8
5.6	810	56.1	7.50	12,852	9
6.3	900	62.3	8.33	14,280	10
7.5	1,080	74.8	10.00	17,136	12
8.8	1,260	87.3	11.66	19,992	14
10.0	1,440	99.7	13.32	22,850	16
20.0	2,880	199.4	26.64	45,700	32
50.0	7,200	498.5	66.65	114,250	80
100.0	14,400	997	133.30	228,500	160
120.0	18,000	1,240	166.00	285,600	200
150.0	22,500	1,550	207.00	357,000	250

<sup>55</sup> [http://www.desecante.com/desecante\\_unitchart.htm](http://www.desecante.com/desecante_unitchart.htm)



## Bibliografía:

- Temas de microbiología (Legionella). **Capítulo 1** [Consultada 12 de octubre de 2014].  
Link: [http://www.bvsde.paho.org/cd-gdwq/docs\\_microbiologicos/Bacterias%20PDF/Legionella.pdf](http://www.bvsde.paho.org/cd-gdwq/docs_microbiologicos/Bacterias%20PDF/Legionella.pdf)
- ASTM International News [Homepage] **Capítulo 1** [Consultada 13 de octubre de 2014]  
Link: [http://www.astm.org/SNEWS/SPANISH/SPMA09/e3515\\_spma09.html](http://www.astm.org/SNEWS/SPANISH/SPMA09/e3515_spma09.html)
- Eroski Consumer [Homepage] **Capítulo 1** [Consultado 13 de octubre de 2014]  
Link: <http://www.consumer.es/seguridad-alimentaria/ciencia-y-tecnologia/2004/06/02/12636.php>
- BEUTEL SPACHER, SANTIAGO ERWIN; “Diseño y construcción de un generador de ozono para aplicaciones de purificación de agua”, México, Agosto 2005, Tesis Anexo A9
- CALDERÓN ANCONA, JOSÉ MARÍA “Diseño y construcción de un generador de ozono para aplicaciones de purificación de agua”, México Agosto 2005, Tesis Anexo A7.
- Langalis Bruno “Ozone in water treatment, application and engineering”; Lewis Publisher, Año 1985 pag 375
- Clemente Salazar Marco A “Aspectos Básicos para el diseño de un generador de Ozono”. [Consultada el 25 de octubre de 2015]  
Link  
<http://www.depi.itchihuahua.edu.mx/electro/archivo/electro2000/mem2000/articulos/IN3.pdf>
- WEB del professor [Homepage] [Consultada 28 de octubre de 2014]  
Link <http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/csalas/OPIV/torres1.pdf>
- Perry “Manual del Ingeniero Químico”, sexta edición, Torres de tiro mecánico, Tomo 1 pp. 12-15, 12-16
- Perry “Manual del ingeniero Químico”, P.P Figura 12-12. Sexta edición, Tomo I.
- Perry “Manual del Ingeniero Químico” Sexta Edición, (Teoría de la torre de enfriamiento) Tomo I P.P 12-14



— Perry “Manual del Ingeniero Químico”, sexta Edición, Tomo 1P-p 12 17  
Jorge Antoni Iñiguez Donoso, Alfredo Barriga Rivera. “Cálculo y Diseño de empaquetadura y ventiladores para una torre de enfriamiento de Tiro Forzado” [Consultada 10 agosto 2014]

Link: <http://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/1968/1/3955.pdf>.

— Secado y Humedad Datos de Ingeniería Química [Consultado el día 13-Agosto-2014]

Link

<http://www.google.com.mx/imgres?q=Carta+psicrometrica+Kg+de+vapor+Kg+d+e+agua&hl=es&biw=1024&bih=653&tbn=isch&tbnid=uwZYqQ1Fuv5VPM:&imgrefurl=http://www.fao.org/docrep/X5027S/x5027S0o.htm&docid=mP7dnBGMsi7nwM&w=1656&h=1194&ei=CttGTtCIN8PJsQL8u-mSCA&zoom=1&iact=rc&dur=215&page=5&tbnh=145&tbnw=201&start=48&ndsp=13&ved=1t:429,r:10,s:48&tx=135&ty=114>

— PERRY “Manual del ingeniero Químico”, 6ª edición, pp. 3-169

— Manual de Practicas de laboratorio de Ingeniería Química; Proceso de Separación 2, Facultad de Química UNAM, Apéndice 1, Pág. 96

— Iñiguez Donoso José Antonio. ”Calculo y diseño de empaquetadura y ventiladores para una torre de enfriamiento de tiro forzado” [Consultado 20 de septiembre de 2015]

Link: <http://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/1968/1/3955.pdf>

— Raymond Chang “Química” , sexta edición ED MC GRAWHILL P.P 71

— Serway Beichner; “Física para ciencias e ingeniería”, Tomo II, MC GRAWHILL 5 Edición, P.P 771

— CALDERÓN ANCONA, JOSÉ MARÍA Diseño y construcción de un generador de ozono para aplicaciones de purificación de agua, Centro nacional de investigación y desarrollo tecnológico. México Agosto 2005 Tesis pág. 61.

— Norma oficial Mexicana NOM-020SSA1-1993. [Consultada 18 de octubre de 2014]

Link <http://www.sma.df.gob.mx/sma/links/download/archivos/nom-020-ssa1-1993.pdf>

— FG INENIERIA Ing Yannuzi Hernan. [Homepage] [consultado 15 de agosto 2014]

Link: <http://fgingenieria.com.ar/downloads/publicaciones/es/el-abc-ozono.pdf>

- Mongarco. Aspectos generales de ozono en la industria de procesos [Homepage][consultado 17 de Agosto 2014]  
Link: <http://www.mongarco.cl/doc.tecnicos/Generalidades%20del%20Ozono.pdf>
- Ozonizadores Comerciales. [Homepage] [Consultado 5 de Noviembre de 2014]  
Link <http://www.basktek.com.mx/>
- Alibaba.com Global trade starts here. Valvulas. Página comercial [Homepage] [Consultado 15 de noviembre de 2014]  
Link: <http://spanish.alibaba.com/product-gs/pvdf-3-16-ozone-resistant-spring-check-valve-kh-csp1-321030251.html>
- Purefresh Destructor de ozono [Homepage] [consultado 13 de noviembre de 2014]  
Link: <http://purfresh.com/library/brochures/espanol/DS-OD900-ESP-0909.pdf>
- Carus group. Accesorios Químicos. [Homepage] [Consultado 15 de noviembre de 2014]  
Link: <http://www.caruscorporation.com/content.cfm/carulite-200>
- Sílica Gel Comercial [Homepage] [Consultado 18 de Noviembre de 2014]  
Link: <http://www.silicagel.com.mx/desecantes.aspx>
- Energy y environment 2E Secado del aire por adsorción, Catalogo Comercial. [Homepage] [Consultado 21 de noviembre de 2014]  
Link:  
<http://www.gunt.de/networks/gunt/sites/s1/mmcontent/produktbilder/08354000/Datenblatt/08354000%204.pdf>
- Conceptos Básicos de Neumática e Hidráulica. [Homepage] [Consultado 1 de diciembre de 2014]  
Link: <http://www.sapiensman.com/neumatica/neumatica5.htm>
- Medrano Silvia “Medición de humedad Relativa con Psicrómetro” Septiembre 2003 [Homepage] [Consultado 28 de agosto de 2014]  
Link: <http://www.metas.com.mx/guiametas/La-Guia-MetAs-03-09.pdf>
- Miliarium.com Ingeniería Civil y Medio Ambiente. Calculo del punto de rocío  
Febrero 2001. [Homepage] [Consultado 4 de Noviembre de 2014]  
Link  
[http://www.miliarium.com/Paginas/Prontu/Arquitectura\\_Sostenible/Clima/Calculo\\_Punto\\_Rocio.asp](http://www.miliarium.com/Paginas/Prontu/Arquitectura_Sostenible/Clima/Calculo_Punto_Rocio.asp)

— Practica de laboratorio de protección ambiental, evaluación de la exposición a ozono ambiental, Laboratorio de Ingeniería química UNAM

— Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994.

— Norma Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1996

— Electrónica Unicrom, Duplicadores y dobladores de voltaje de Media Onda.Unicrom.com Foro de electrónica [Homepage] [Consultado 19 de agosto de 2014]

Link [http://www.unicrom.com/Tut\\_duplicadores-tension.asp](http://www.unicrom.com/Tut_duplicadores-tension.asp)

— Limex, Proveedor de Tubos de Acero Inoxidable. Mercado Libre, [Homepage] [Consultado 16 de diciembre de 2014]

Link <http://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-406368944-vendo-tubo-de-acero-inoxidable-del-tipo-304- JM>

— Proyecta, Proyectos Eléctricos y Transformadores. SA de CV. Portal de venta de gabinetes eléctricos NEMA. [Homepage] [Consultado 22 de septiembre de 2014]

Link

[http://www.proyectra.com/index.php?page=shop.product\\_details&flypage=flypage.tpl&product\\_id=55&category\\_id=10&option=com\\_virtuemart&Itemid=79&vm\\_cchk=1&Itemid=79](http://www.proyectra.com/index.php?page=shop.product_details&flypage=flypage.tpl&product_id=55&category_id=10&option=com_virtuemart&Itemid=79&vm_cchk=1&Itemid=79)

— **Proveedor de sílica gel para ozonizadores. Mercado Libre** [Consultado 22 de septiembre de 2014]

Link <http://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-408518533-silica-gel-secante-de-humedad-para-generadores-de-ozono- JM>

— Latincomercio.com Malla de Acero inoxidable. Proveedor [Consultado 9 de diciembre de 2014]

Link

<http://www.latincomercio.com/goods/11110/qa.html#module>

— Destructor de Ozono Proveedor de Accesorios para ozonificadores. Mercado Libre. [Consultado 2 de diciembre de 2014]

Link <http://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-75524617-destruccion-de-ozono- JM>