

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO

FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICA

ESCUELA PROFESIONAL DE FÍSICA



**OZONIZACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES MEDIANTE EL
MÉTODO DESCARGA CORONA**

Tesis para optar el Título Profesional de Licenciado en Física

JOSUÉ ISAC CARRILLO ESPINOZA

CALLAO – PERÚ

Noviembre – 2010

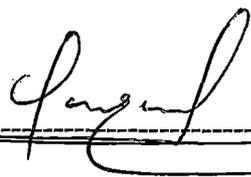
HOJA DE PRESENTACIÓN

**OZONIZACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES MEDIANTE EL
MÉTODO DESCARGA CORONA**

JOSUÉ ISAC CARRILLO ESPINOZA

Tesis presentada a consideración del Jurado designado por el Consejo de Facultad de la Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas de la Universidad Nacional del Callao, como parte de los requisitos para obtener el Título Profesional de Licenciado en Física.

Aprobada por:



Lic. Venancio Alejandro Gómez Jiménez
Presidente



Dr. Richard Toribio Saavedra
Secretario



Dr. Rafael Edgardo Carlos Reyes
Vocal



Dr. Walter Flores Vega
Asesor

Callao - Perú
Noviembre - 2010

FICHA CATALOGRÁFICA

CARRILLO ESPINOZA, JOSUÉ ISAC

Ozonización de las Aguas Residuales Mediante el Método Descarga Corona.

Callao, 2010.

VII, 85 p., 29,7 cm. (UNAC, Licenciado en Física, 2010).

Tesis, Universidad Nacional del Callao, Facultad de Ciencias Naturales y Matemática,
Escuela Profesional de Física.

DEDICATORIA

Con mucho cariño:

Este esfuerzo lo dedico a mis hermanos Sara y Eduardo, por sus sabios consejos, y a Elizabeth Cieza Valdivia por sus palabras de ánimo para seguir superándome académicamente en esta vida; por su comprensión y motivación para crecer como persona y profesional.

A mis padres Eduardo Carrillo Soriano y Leonor Espinoza Vásquez, por todo el apoyo incondicional desde mi educación inicial hasta mi formación profesional de pregrado con la culminación de esta tesis.

A todos mis amigos, para que este trabajo sea un ejemplo de inspiración y estímulo en lo que concierne al proceso de titulación en sus carreras profesionales.

Josué Isac Carrillo Espinoza

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue realizado en el Laboratorio de Microbiología de la Facultad de Ingeniería Ambiental de la Universidad Privada Peruana Unión y en las instalaciones de la Empresa Busersa S.A.C.

Expreso mi agradecimiento al Padre de la Ciencia: Dios, creador de la inteligencia humana; asimismo, a los siguientes profesores:

- Al Dr. Eliezer Bermúdez, profesor en Salud Ambiental de la University Indiana States de EE.UU, por sus recomendaciones y apoyo en la provisión de materiales relativos a la salud y su relación con el medio ambiente, especialmente en el tema de aguas residuales.
- A mi asesor Dr. Walter Flores Vega, por su paciencia, espíritu de investigación y revisión de mi trabajo.
- Al ingeniero Jorge Moscoso, por su ayuda incondicional en mi investigación.
- Al Blgo. Edgar Zárate, por sus consejos y recomendaciones en el área de investigación.
- A la Dra. Verna Alva León, profesora en el área de ciencias de la salud de la Universidad Cayetano Heredia, por facilitarme materiales apropiados.
- Al Lic. Venancio Alejandro Gómez Jiménez, por sus consejos y recomendaciones en el área de investigación.

De igual manera, agradezco a todos los profesores de la Escuela Profesional de Física de la Facultad de Ciencias Naturales y Matemática, por su profesionalismo, por sus enseñanzas y formación como físico durante mis años de estudiante (pre-grado).

Josué Isac Carrillo Espinoza

RESUMEN

OZONIZACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES MEDIANTE EL MÉTODO DESCARGA CORONA

JOSUÉ ISAC CARRILLO ESPINOZA

Noviembre - 2010

Asesor: Dr. Walter Flores Vega

Escuela Profesional de Física

El presente trabajo de investigación muestra que el método de altas descargas eléctricas, denominado en el ámbito de la ingeniería como “Método Descarga Corona”, aplicado al uso de las aguas residuales de Tipo III, las cuales contienen un alto porcentaje de coliformes totales y fecales, disminuye significativamente los elementos patógenos logrando alcanzar los límites permisibles establecidos, entendiéndose por aguas residuales las que provienen del uso doméstico e industrial. Después de su reciclamiento, las aguas residuales de tipo III son las que están destinadas para el riego de áreas verdes y zonas de cultivo. Para ello, se disminuirá la carga bacteriana de las aguas residuales, vía ozonización, utilizando el “Método Descarga Corona”.

El método de alta descarga eléctrica, conocido como “Método Descarga Corona”, consiste en la elevación de voltaje suministrando energía al dieléctrico constituido por un gas que contiene oxígeno, no ozonizado, lo que produce la emisión de gran cantidad de electrones cargados de energía cinética, rompiendo el enlace covalente de las moléculas de oxígeno y transformándolas en ozono.

El ozono, al actuar por oxidación sobre la muestra del agua residual logra purificarla para ser usada en el riego de las áreas verdes y plantaciones.

Los resultados que se han alcanzado están en función de diez muestras tomadas de aguas residuales, las cuales han sido sometidas a cuatro concentraciones de ozono: 50 ml/h,

100 ml/h, 150 ml/h, 200 ml/h; cada una de ellas a tiempos de 0, 5, 10, 15, 20, 25 minutos para cada concentración aplicada a las respectivas muestras.

Las primeras cinco muestras fueron sometidas a la ozonización para observar la disminución de coliformes totales, y las siguientes para observar la disminución de coliformes fecales.

De la investigación se ha logrado comprobar que la reducción de los coliformes totales y fecales depende de la concentración de ozono y no del tiempo, siendo 200 ml/h en 25 minutos el valor significativo. De la misma manera, la muerte celular de los coliformes es significativa para la concentración de 200 ml/h en 25 minutos, siendo no significativos para concentraciones y tiempos menores.

El presente trabajo demuestra que la ozonización, vía el “Método Descarga Corona”, produce significativos resultados en el tratamiento de aguas residuales, contribuyendo a la salud ambiental.

Palabras clave:

DESCARGA CORONA

OZONIZACIÓN

COLIFORMES

MUERTE CELULAR

ABSTRACT

OZONIZATION WASTEWATER BY CORONA DISCHARGE METHOD

JOSHUA ISAC CARRILLO ESPINOZA

November - 2010

Advisor: Dr. Walter Flores Vega

Professional School of Physics

This research shows that high shock method, known in the field of engineering as "Corona Discharge method, applied to the use of wastewater from Type III, which contain a high percentage of total and fecal coliforms significantly decreased the pathogens managing to reach the permissible limits established, understood the wastewater from domestic and industrial use. Depending on use is given, wastewater type III are designed for irrigation of green areas and farmland. This will decrease the bacterial load of waste water via ozonation, using "Corona Discharge Method".

The high electrical discharge method, known as "Corona Discharge Method", is raising voltage powering the dielectric consists of a gas containing oxygen, ozonized not, resulting in the emission of large amounts of kinetic energy charged electrons breaking the covalent binding of oxygen molecules and transforming them into ozone.

Ozone oxidation by acting on the sample of wastewater, manages to purify for use in irrigation of green areas and plantations.

The results are based on ten samples taken from wastewater, which have been subjected to four ozone concentrations: 50 ml / h, 100 ml / h, 150 ml / h, 200 ml / h, each of them times of 0, 5, 10, 15, 20, 25 minutes for each concentration applied to the respective samples.

The first five samples were subjected to ozonation to observe the decrease of total coliforms, and the following to see the reduction of fecal coliforms.

The investigation has been proved that lowering total and fecal coliforms depends on the concentration of ozone and no time, being 200 ml / h in 25 minutes of significant

value. Similarly, cell death is significant coliform concentration of 200 ml/ h in 25 minutes, with no significant concentrations and shorter times.

This work demonstrates that ozonation, via the "Corona Discharge Method", produced significant results in the treatment of wastewater, contributing to environmental health.

Keywords:

CORONA DISCHARGE

OZONIZATION

COLIFORM

CELL DEATH

INDICE

	pág.
HOJA DE PRESENTACIÓN	ii
FICHA CATALOGRÁFICA	iii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTO	v
RESUMEN	vi
ABSTRACT	viii
INDICE	x
1. CAPÍTULO I: Introducción	1
2. CAPÍTULO II: Fundamentos teórico	13
2.1 Apología y beneficios del ozono	13
2.2 Conceptualización	21
2.2.1 Coliformes	21
2.2.2 Coliformes fecales	22
2.2.3 Coliformes totales	22
2.2.4 Aguas residuales	23
2.3 Ozonizador eléctrico	23
2.4 Descarga corona	24
2.5 Mecanismo de la desinfección con ozono	26
2.6 Procesos favorables a la descarga	27
2.6.1 Foto-ionización	27
2.6.2 Ionización por choque	27
2.7 Procesos desfavorables a la descarga	28
2.7.1 Recombinación	28
2.7.2 Enlace con molécula neutra	28
2.8 Características de los procesos elementales	29
2.9 Mecanismos de formación de descargas en el aire encapsulado	29

2.10	Descarga en el electrodo con polaridad negativa	30
2.11	Descarga en el electrodo con polaridad positiva	31
2.12	Variables que influyen en el fenómeno efecto corona	33
2.12.1	Gradiente superficial	33
2.12.2	Estado de superficie del electrodo	34
2.12.3	Densidad relativa del aire	35
2.13	Métodos para el cálculo de pérdida corona	36
2.14	Tensión crítica disruptiva	36
2.15	Método de F.W. Peek	37
2.17	Muerte celular	38
3.	CAPÍTULO III: Materiales y Métodos	40
3.1	Materiales para la construcción del ozonizador	40
3.2	Proceso de la construcción del ozonizador	42
3.3	Diseño del prototipo	46
3.4	Elementos del prototipo	48
3.4.1	Preparación del gas	50
3.4.2	Generador del ozono	50
3.4.3	Ozonizador eléctrico	51
3.4.4	Fuente de energía	53
3.4.5	Contactador	53
3.4.6	Destrucción del ozono sobrante	54
3.5	Características técnicas del equipo	55
3.6	Toma y análisis de las muestras	55
3.6.1	Muestras	55
3.6.2	Método de muestreo y análisis	56
4.	CAPÍTULO IV: Resultados	59
5.	CAPÍTULO V: Discusión	75

5.1 El valor de la concentración efectiva del ozono por el método descarga corona	75
5.2 La velocidad de la muerte celular	77
6. CAPÍTULO VI: Conclusiones y recomendaciones	80
6.1 Conclusiones	80
6.2 Recomendaciones	80
BIBLIOGRAFÍA	82

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

La preocupación por la contaminación ambiental toma importancia y se incrementa día tras día en nuestro país. Desde hace algunos años la legislación en materia ambiental viene cobrando fuerza; sin embargo no alcanza los parámetros de las normas internacionales, demostrando que el cambio en la conciencia de las personas y empresas es insuficiente.

En nuestro medio, una de las preocupaciones es el tratamiento de las aguas residuales que generan en gran cantidad los diferentes distritos de la capital, las cuales son vertidos irresponsablemente a los ríos, a los mares, generando problemas de salubridad, económicos y sociales en la población. Otra forma de agravar el problema se da cuando la irresponsabilidad de las autoridades opta por coger dichas aguas, antes de su vertido al mar, para regar parques, jardines y áreas verdes, poniendo en peligro la salud de cientos y miles de pobladores.

Cabe señalar que las aguas residuales contienen gran cantidad de bacterias y elementos patógenos muy dañinos para la salud. Por ello, para darle uso en el regadío, protegiendo de manera simultánea nuestra salud, existe un bactericida y germicida muy eficaz, más efectivo que el cloro y no nocivo para la salud; dicho compuesto se llama ozono, pruebas científicas lo demuestran.

Desde el punto de vista de la salubridad, existen varios métodos para purificar aguas servidas, entre ellos tenemos los que usan el Flúor y Cloro, entre otros métodos. Sin embargo, en nuestro medio el más usado por su economía y comodidad es el Cloro. El ozono es más eficaz, eficiente y saludable que cualquier otro método como: microfiltración, absorción de carbón activado, osmosis inversa, etc. La eficiencia del ozono es superior a ellos.

Con referencia al más cercano competidor, el Cloro, podemos decir que en estos últimos años, se viene cuestionando la validez del cloro como desinfectante, no por su reconocido poder bactericida, sino a causa de la formación de compuestos indeseables en las aguas cloradas. Por ejemplo, si las aguas a tratar contienen nitrógeno orgánico o amoníaco libre, se forman cloraminas que producen olores en el agua y se está barajando la posibilidad de que sean agentes cancerígenos. Si las aguas contienen pequeñas cantidades de fenoles se forman, por acción del cloro, los denominados clorofenoles que producen en el agua olores y sabores medicamentosos tan desagradables. Pero sin duda, el mayor inconveniente que se le achaca al cloro, si el agua a tratar es portadora de cierta materia orgánica, es la formación de compuestos clorados tales como los bifenilos policlorados (PBC), que tienen un probado carácter cancerígeno.

Mención especial merecen los trihalometanos que últimamente están preocupando a las autoridades sanitarias de la mayoría de los países, los cuales son compuestos potencialmente cancerígenos y que aparecen en el agua tras ser sometida a cloración, por ello también la importancia del uso del ozono.

Por lo anteriormente expuesto, propongo la generación y utilización del ozono (O_3) para eliminar los diversos tipos de bacterias que se encuentran en las aguas residuales. De manera experimental mostraré el efecto del ozono sobre los coliformes totales y fecales, demostrando que es eficaz, eficiente y con un alto potencial purificador.

Para consolidar la eficiencia del ozono en la purificación de estas aguas residuales mostraré en detalle la construcción de un equipo generador de ozono el cual utiliza el método de altas descargas eléctricas conocido científicamente como el "Método Descarga Corona."

La generación de ozono se dará de manera artificial por el método en mención. Históricamente sus primeras aplicaciones experimentales se dieron a partir del siglo XVIII; posteriormente se aplicaron en los tratamientos de aguas residuales de algunas ciudades europeas como Francia y España; norteamericanas como Indiana; latinas como México, entre muchas más; tal y cómo se verá en uno de los capítulos de este trabajo.

En esta investigación para comprobar la eficacia y eficiencia del generador de ozono, he cogido muestras de aguas residuales que se usan en el regadío de las áreas verdes del “Parque Zoológico Las Leyendas Felipe Benavides Barreda”, provenientes del Canal Riva Agüero, colector Bertello, las cuales fueron ozonizadas para bajar el nivel de coliformes totales y fecales tornándolas en aguas de Tipo III, aptas para el regadío de áreas verdes.

Por lo tanto, la importancia del ozono estriba en su gran poder desinfectante, reciclando el agua residual para múltiples usos, entre ellas para el riego de parques, jardines, campos verdes, centros recreacionales, áreas de cultivo, jurisdiccionalmente pertenecientes a los diversos gobiernos regionales y municipales.

Por consiguiente, el presente trabajo pretende apoyar en el control y tratamiento que deben ejercer los municipios de cada distrito sobre las aguas residuales que se generan en sus jurisdicciones, ya que éstas al ser vertidas a los efluentes, sin ser tratadas, contaminan y perjudican la salubridad ambiental.

De la misma manera, el sector industrial contamina las aguas que son vertidas a la red de alcantarillado, ya que las grasas, sustancias tóxicas y otros contaminantes aumentan cuantitativamente y cualitativamente la insalubridad de las aguas servidas.

Cabe indicar que las aguas que usan los centros médicos: hospitales, clínicas y postas, determinan elementos patógenos y no deben ser vertidas a los efluentes de manera irresponsable por el alto valor nocivo que representan para la salud.

Por ello esta investigación propone una contribución para mejorar las condiciones de salud, el equilibrio ecológico y preservación del medio ambiente.

El agua es un elemento vital para la vida humana y seres vivientes en general, sin este elemento la vida se exterminaría en nuestro planeta; sin embargo, el elemento líquido debe encontrarse dentro de los parámetros de salubridad; caso contrario, se tornará nocivo y hasta letal para la vida.

El sistema de depuración de agua residual por ozono se basa, precisamente, en su alta capacidad de oxidación, mayor que la del cloro, que elimina de forma muy rápida microorganismos, incluso virus.

Antecedentes.

CORSINO [4] hace mención de las instalaciones de ozono de Almería y Estepona realizadas en España para tratamiento de aguas residuales y reutilización para riego, con una producción de ozono de 20 kg/h con dos generadores de 10 kg/h cada uno, pero con la diferencia que la de Almería produce ozono a partir de aire y la de Estepona a partir de oxígeno líquido. En cuanto a los parámetros químicos del tratamiento se pueden considerar similares, dadas las características de un agua residual estándar. La planta de tratamiento de aguas residuales de Estepona genera agua que se utiliza para riego de campos de golf.

Corsino también nos habla acerca de dos investigadores: Acosol y Trailigaz, que se unieron para resolver este desafío de aprovechar las aguas residuales efectuando un post-tratamiento por medio del ozono. La utilización del ozono como elemento oxidante ya ha demostrado su eficiencia tanto en el tratamiento de aguas potables, residuales o industriales así como en otros dominios de tratamientos especiales. La nueva tecnología y los adelantos en el campo de la generación de ozono y su difusión, han permitido una reducción importante en la explotación de las plantas y un mejor aprovechamiento de las fases de tratamiento. Trailigaz, con más de 2500 instalaciones de ozono en el mundo entero sigue investigando continuamente la generación y difusión del ozono en sus laboratorios. El resultado es la nueva serie de generadores de media frecuencia a bajo consumo, trabajando a concentraciones de $35\text{g O}_3/\text{m}^3$ a partir de aire y más de $200\text{g O}_3/\text{m}^3$ a partir de oxígeno.

POZNYAK, BAUTISTA Y CÓRDOVA [21] nos mencionan que: "En el estudio de evaluación sobre la presencia de materia orgánica y elementos patógenos en las aguas residuales sanitarias, domésticas e industriales en el colector principal de la ciudad de México, al ser tratadas por ozonización, se mostró la efectividad de este gas (ozono). Previo a ello se sometieron al tratamiento de coagulación y floculación. Las características de estas aguas residuales eran: sólidos suspendidos = 1511 mg/litro y pH (sustancia alcalina o ácida) igual a 9.7. Al tratar con ozono estas aguas, se obtuvieron resultados favorables.

Cabe señalar que la presencia de materia orgánica en estas aguas, es causante de muchos problemas cancerígenos cuando se combina con el cloro. Satisfactoriamente en esta evaluación fue eliminada. Fue suficiente cinco minutos de ozonización para eliminar la turbidez del agua en un 100% y 60 minutos para purificar las aguas residuales del colector principal de la capital de México”.

MOLEILO [18] explica: “Aunque el ozono existe en la atmósfera desde la formación de ésta y no fue detectado hasta 1785 por Von Marum, bautizado por Schönbein en 1840 y utilizado en Francia en la desinfección de agua del Sena, seguida de Niza en 1906, no fue sino hasta la década de 1950 que aparece en Cuba su primera aplicación, con la adquisición de un equipo de la firma Westinghouse para el tratamiento de agua de consumo en el edificio de las oficinas de la compañía cubana de electricidad. En el Colectivo de Ozono del CNIC, posteriormente Centro de Investigaciones del Ozono, comenzaron los primeros estudios a principios de la década de 1970, utilizando un equipo de laboratorio de la firma Gallenkamp, de muy baja eficiencia. Desde la década del setenta hasta la fecha, se ha incursionado en diversas aplicaciones del ozono, donde se destacan primero que todo, las investigaciones básicas que le dan soporte científico a las aplicaciones de este gas. Las tecnologías con el empleo del ozono, desarrolladas en el Centro de Investigaciones del Ozono son: desinfección de aguas limpias, obtención de medicamentos hasta registro sanitario; decoloración de disoluciones azucaradas, obtención de catalizadores para la destrucción de ozono residual, desinfección de agua para piscinas, desinfección de aguas residuales, decoloración de tejidos de algodón, desulfuración de petróleo, conservación de alimentos, decoloración de cera de caña de azúcar y desinfección de cuartos de siembras. También se trabaja en la ozonoterapia, que se encuentra muy extendida en Cuba y en el desarrollo de equipos generadores de ozono, utilizando para la generación la media y alta frecuencia de línea.”

SAAVEDRA [24] nos explica que ingenieros de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), utilizando la capacidad del ozono para destruir las estructuras químicas de múltiples microorganismos patógenos, desinfectan al cien por ciento aguas residuales que quedan listas para re-usarse en el riego de cultivos.

El método, único en su tipo en México y que se prueba también en Francia y Cuba, supera en resultados a la cloración y los rayos ultravioleta, métodos convencionales de tratamiento de aguas residuales, asegura Neftalí Rojas Valencia, del área ambiental del Instituto de Ingeniería de esa casa de estudios. MONJE [19] explica: "el ozono da muy buenos resultados porque destruye bacterias (por ejemplo del cólera), protozoarios y helmintos, que son parásitos gastrointestinales causantes de diarrea, fiebre, daños a la vista y que ocasionan incluso la muerte de personas, dependiendo del grado de contaminación. Son patógenos de difícil control, reconocidos mundialmente por sus daños".

En el Laboratorio de Físico-Química, la especialista prueba las virtudes de este gas, que se captura del aire mediante un ventilador y descargas eléctricas, para mezclarlo con aguas negras obtenidas del desagüe. Ya en el agua contaminada, el ozono (formado por tres átomos de oxígeno) destruye las estructuras de los patógenos. Así se obtiene un líquido que puede re-usarse como agua de riego agrícola sin causar daños a la salud pública y cumple con la Norma Oficial Mexicana (NOM) del ramo. El cloro ha resuelto la desinfección de agua por más de un siglo, pero tiene problemas secundarios que hacen poco factible su aplicación, ya que genera subproductos como los trihalometanos, precursores de cáncer. "No desinfecta por completo el agua, 'adormece' a los patógenos pero no los destruye y puede producir cáncer a largo plazo", asegura la experta. Mientras otros tratamientos de aguas residuales se inician filtrando el líquido con la utilización de sustancias químicas, este método experimental evita ese costo inicial y aplica el ozono directamente a las aguas negras. "Estamos aplicando el ozono al principio del proceso y hemos obtenido buenos resultados. Los filtros muchas veces no sirven correctamente en las plantas de tratamiento y dejan pasar muchos microorganismos aunque se esté clorando el agua. Esto aumenta costos por posibles infecciones de los consumidores", advierte.

En sólo una hora, el ozono destruye los enlaces moleculares de virus y bacterias sin causar efectos secundarios. Esta tecnología experimental, podría pasar a una etapa industrial en el futuro, lo cual depende de que el Gobierno acepte este proceso.

Para pasar del laboratorio a la industria, no sería necesario cambiar los sistemas de cloración que ya existen. "Sería cuestión de instalar un equipo al final de la cadena de

tratamiento de aguas residuales como se utiliza normalmente la cloración, que utiliza varios tanques de almacenamiento, pero en el caso del ozono no se requiere espacio para almacenar. El equipo no ocupa mucho espacio y puede capturar el ozono sin necesidad de almacenar ningún producto. Eso lo hace menos costoso". Los resultados obtenidos en el laboratorio dan una drástica disminución de los patógenos, respaldada con diversos estudios realizados en Francia, Italia y Cuba, por el Centro de Investigaciones del Ozono.

Al tratar el agua con ozono se obtiene un mejor producto, pues se reduce notablemente la concentración de microorganismos y, al parecer, se facilita la asimilación de nutrientes en cultivos que se riegan con el agua tratada.

El riego con esta agua garantiza cultivos libres de patógenos y disminuye el uso de pesticidas o fungicidas. "Se evitan esos costos porque el ozono está actuando como pesticida; también se reduce el uso de abono porque las plantas regadas con esta agua absorben mejor los nutrientes y crecen mejor", explica la ingeniera, luego de cultivar plantas con agua tratada y agua cien por ciento potable.

Respecto a los costos, la investigadora sostiene que son competitivos con los actuales. Ahora se requieren casi 50 pesos para desinfectar 100 metros cúbicos mediante cloración y dechloración, y un poco menos utilizando el método de luz ultravioleta. Con el proceso de ozono el costo es de 48 pesos por metro cúbico, inversión que podría abarataarse al pasar a una fase industrial.

VARGAS [28] nos presenta un caso práctico de la utilización del ozono en el Aeropuerto Internacional Jorge Chávez (Lima), donde las aguas provenientes de aeronaves, que son descargadas de los servicios sanitarios y contienen niveles de coliformes arriba de 180×10^6 NMP/100 ml y sobre las 1,000 p.p.m. de DBO_5 , fueron tratadas con ozono. NMP/100 es el número más probable por cada 100 ml; p.p.m. es el fraccionamiento de la muestra en partes por millón; y, DBO_5 es la demanda bioquímica de oxígeno en cinco días. La concentración de ozono utilizada osciló entre 6 y 8 mg/l hora, logrando reducir el 85% de los coliformes presentes en las aguas descargadas por aeronaves.

LINGJI [14], menciona algunos ejemplos de ciertos investigadores que consideran al ozono como un candidato perfecto para el tratamiento de agua para reciclar, ya que es un agente oxidante poderoso que se ha utilizado para desinfectar, eliminar color, olor y turbidez, así como para reducir la carga orgánica de las aguas residuales.

Una manera de mantener o hasta mejorar la seguridad de productos frescos es lavando las frutas y vegetales con agua ozonizada. Lingji hace mención del investigador Kim, donde este último nos habla de dos tipos de sistemas de lavado, aspersion y en canal, que se pueden utilizar para reducir la cuenta microbiana en la superficie del producto. Kim usó agua ozonizada para lavar lechuga en tiras. Inyectaron 1.3 ml de ozono a una velocidad de flujo de 0.5 L/min dentro de una mezcla agua/lechuga, batiendo a alta velocidad antes de la homogenización peristáltica por 3 min para obtener una reducción de cerca de 2 escalas de logaritmos ufc/g en la cuenta total en placa, donde ufc/g significa unidades formadoras de colonia de bacterias por cada gramo. También hace mención de otro investigador: Kondo, quien obtuvo más del 90% de reducción en las cuentas bacterianas totales para la col China con este método. El ozono es particularmente efectivo contra la bacteria de Escherichia de Coli, bacteria patógena de mayor interés para la industria de frutas y verduras.

ORTA [20], explica que debido a la escasez de agua potable y al creciente incremento de aguas residuales, aunado a la alta tasa de generación de residuos y a la necesidad de satisfacer la demanda de alimentos sanos y nutritivos dentro del perímetro urbano, se vio la necesidad de aplicar métodos que en conjunto nos ayuden a plantear alternativas prácticas para satisfacer una de las necesidades básicas de México y del mundo como es la alimentación.

El trabajo realizado por Orta aporta una metodología segura para el tratamiento de aguas residuales, para su reuso en la agricultura urbana; al mismo tiempo que se puede producir en espacios urbanos reducidos y durante todo el año, diferentes vegetales frescos, libres de pesticidas y fertilizantes químicos, basándose en prácticas sostenibles que permiten el reciclaje de los desechos, utilizando agua tratada con ozono. En su trabajo trató

el agua residual cruda con ozono (O_3), en el TPA (“tratamiento primario avanzado”) de las aguas residuales; es decir, TPA + O_3 . Se hicieron análisis toxicológicos y se cuantificaron agentes patógenos como bacterias *Vibrio cholerae*, *Salmonella typhi*, coliformes fecales y parásitos intestinales como *Giardia sp.* y huevos de helmintos, a la par que se evaluaron parámetros fisicoquímicos como: nutrientes, metales pesados, “demanda bioquímica de oxígeno” (DBO) y la “demanda química de oxígeno” (DQO).

Los resultados obtenidos muestran que el agua tratada con O_3 empleada en el riego de hortalizas, además de desinfectar, mejora el crecimiento de los cultivos. El agua tratada por este método cumple con los estándares vigentes en México, en cuanto a microorganismos y metales pesados. Se logró una remoción de 88% de la “demanda bioquímica de oxígeno en un período de cinco días” (DBO_5) y 93% de DQO. Los resultados microbiológicos mostraron la destrucción de bacterias del agua residual cruda después de 15 minutos de ozonización con una dosis de 4.8 mg/L a pH 7 y una temperatura de 23 °C, mientras que los parásitos intestinales requirieron de una hora para ser destruidos en su totalidad. Con respecto a la toxicidad se observó en semillas de lechuga (*Lactuca sativa*) que el desarrollo en las radículas de cada una de las semillas sembradas no se inhibió en ninguno de los casos y se observó el máximo crecimiento en los tratamientos con O_3 . Con respecto al crecimiento de cultivos compuestos por *Lactuca sativa*, rábano (*Raphanus sativus* L.), jitomate (*Lycopersicon esculentum*) y hierbabuena (*Mentha piperita*) se registró el máximo crecimiento en conjunto en el módulo regado con aguas tratadas con O_3 .

También Orta menciona al investigador Raub, quien trató agua residual con ozono para usarlo en el riego agrícola; logrando aumentar el vigor de la cosecha, reduciendo las plagas y también mejorando la penetración de oxígeno. Cabe resaltar que teóricamente el ozono favorece la nitrificación y la asimilación de los nutrientes al oxigenar el suelo.

MONJE [19] explica el uso del ozono para la eliminación de *Vibrio cholerae*, fenotipo rugoso resistente al cloro; fue investigado en aguas residuales de la Ciudad de México en donde ésta bacteria fue detectada y aislada. Las pruebas de desinfección se

llevaron a cabo en un efluente de tratamiento fisicoquímico avanzado inoculado con *Vibrio cholerae* (bacteria que produce el cólera en humanos). La densidad bacteriana inicial fue del orden de 109 unidades formadoras de colonia por cada 100 mililitros (109 UFC/100 ml). Los resultados del estudio muestran un claro efecto desinfectante del ozono para eliminar bacterias patógenas como *Vibrio cholerae*, fenotipo rugoso, además de otros indicadores como coliformes fecales, alcanzando niveles por debajo de la “Norma Oficial Mexicana” (NOM) de aguas residuales para riego agrícola (1000 UFC/100 ml). Con una dosis de ozono aplicada en fase gas de 117.3 mg O₃/L de agua residual tratada, el fenotipo rugoso de *Vibrio cholerae* fue eliminado en su totalidad después de 12 minutos de ozonización.

Con las condiciones experimentales utilizadas en el estudio, para alcanzar la dosis de ozono requerida en el proceso de desinfección, se necesita de una producción de ozono de 0.492 g O₃/h. La calidad del efluente a ozonizar fue de primordial interés en la demanda de ozono, por lo que es importante mejorar la calidad del agua, con la finalidad de reducir la dosis requerida de ozono. El uso del ozono como desinfectante es una alternativa al método tradicional de cloración, que de acuerdo con los resultados de esta investigación, puede garantizar una calidad de agua residual tratada libre de patógenos, por lo que puede ser re-utilizada en forma segura en el riego agrícola.

CÓRDOVA [3] explica el uso regulado del ozono en España: “Los tratamientos avanzados con ozono para aguas residuales, permiten que éstos presenten las características para usos tan diversos como el agrícola, pecuario, estético, recreativo o industrial. El uso del ozono está regulado según sus usos, encontrándose incluido según el Real Decreto 140/2003 del 7 de febrero del 2003 (norma española); por el cual se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua para el consumo humano. Añade que, es urgente que se generalicen los tratamientos de aguas residuales con vistas a su reutilización, a la vez que se restringe el uso de productos químicos como el cloro, altamente contaminantes, ya que de otro modo el deterioro progresivo de la calidad del agua puede tocar techo.”

LÓPEZ [15] describe brevemente el uso del ozono en las aguas residuales de Almería. “La planta de ozono está ubicada en el término municipal de Viator (municipio de la provincia de Almería, España), al igual que el centro de control, el embalse de

regulación, las oficinas y los talleres de mantenimiento. El emplazamiento del agua residual, por encima de la cota de 120 metros sobre el nivel del mar, permitió inicialmente regar por gravedad los sectores IV y V Bajo (división geotécnica para regadío). Con la construcción posterior de otro embalse de regulación, de unos 100 mil metros cúbicos, sobre la cota de 160 metros sobre el nivel del mar, se logró regar por gravedad el sector V Alto, que anteriormente necesitaba de presión sostenida por bombas.”

La mencionada planta de ozono de Viator, tiene una capacidad de 12 millones de metros cúbicos al año, siendo el consumo medio de agua para la capital almeriense de unos 10 millones al año. El recorrido del agua residual, desde que sale con un tratamiento secundario de “La Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR)” del Cortijo el Violín (zona dentro de la provincia de Almería), en el término municipal de Almería, hasta que se sirve al agricultor, sería el siguiente: de la EDAR de Almería llega, por gravedad, a un depósito regulador con capacidad para 10,000 metros cúbicos, situado en Costacabana, al lado del aeropuerto; desde este depósito, y necesitando de una pequeña impulsión, asciende hasta la planta de ozono, que tras darle el tratamiento terciario se reparte entre dos grandes embalses. Una vez que el agua se encuentra en el embalse regulador, se encuentra ya disponible para el agricultor, que puede tomarla de la red cuando más le interese.

Este trabajo se justifica porque presenta una propuesta para regar los parques y jardines con aguas servidas que han sido sometidas al tratamiento previo, con la consiguiente reducción de patógenos contaminantes, evitándose abrir las puertas a grandes focos proliferantes de diversas enfermedades epiteliales, estomacales, diarreicas entre muchas más, para niños y adultos. También se puede utilizar las aguas servidas para el sector agrícola, previa ozonización, de esta manera estaríamos disminuyendo diversas enfermedades que se transmiten a través de los productos que se extraen de la tierra. Desde el punto de vista económico-social, la justificación reside en que el Estado ahorraría mucho dinero en la compra de medicamentos y tratamientos para las personas enfermas de males estomacales, producto del contacto con las aguas residuales o con áreas contaminadas por las mismas; esto implica también economizar gastos de hospitalización, posología, etc. de todas las personas que se encuentren afectadas por estos males.

De poseer una planta procesadora de agua residual por ozonización se ahorraría mucho dinero en el mantenimiento de las áreas verdes, ya que al ser tratada esta agua se suministraría directamente a los parques y jardines. Asimismo, gran parte de la producción del agua tratada podría ser vendida para el regadío de parques y jardines de la comuna metropolitana.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

En el presente capítulo se define el marco teórico utilizado en la investigación, partiendo de los antecedentes, abordando los conceptos y el soporte teórico-práctico del presente trabajo.

2.1 APOLOGÍA Y BENEFICIOS DEL OZONO.

RODRÍGUEZ [22] menciona que “en el año 1785 M. Von Marum, investigando con máquinas electrostáticas, observó la presencia de un olor característico, fenómeno que hizo constatar en sus ensayos la presencia de un nuevo gas, entendiéndose por máquinas electrostáticas como aparatos a proporcionar en forma rápida y cómoda cargas eléctricas en reposo. Asimismo menciona a Cruickshank, que en 1801, al realizar la electrólisis del agua (descomposición de una sustancia por medio de la corriente eléctrica) observó también ese olor característico. Sigue diciendo que no fue hasta 1840 cuando se pudo clasificar a este gas, siendo el científico Schumbein quien lo denominó ozono por primera vez, nombre proveniente del griego que significa sin olor. Desde ese año y hasta 1863, se pensó que se trataba de un peróxido de hidrógeno, hasta que el investigador Sonet confirmó el hecho que se trataba de un compuesto formado sólo por átomos de oxígeno. Fue M.P. Otto quien logró producirlo y controlarlo artificialmente por descargas eléctricas. El primer intento de esterilizar agua con ozono fue en 1893 y la primera vez que se utilizó comercialmente para la desinfección de agua residual fue durante el año 1906 en la ciudad de Niza, Francia. Así se empleó uno de los agentes oxidantes para la desinfección de aguas.”

SMITH [25] nos dice que “todos los científicos que han estudiado la acción del ozono sobre aguas contaminadas por residuos han llegado a diversas conclusiones respecto de las concentraciones y tiempos de contacto del ozono, tal como es el caso de Smith y Bodkin en 1964, quienes compararon la acción bactericida del cloro y del ozono a diferentes valores de pH, observando que a un pH de 5 el tiempo necesario para esterilizar un litro de muestra que contenía una cantidad de bacterias totales de $8 \times 10^7/100$ ml fue de 5 minutos, mientras que a un pH de 8 fue 7,5 minutos con concentraciones de ozono de 7,3 y

8,2 mg/l de ozono, respectivamente, obteniendo como resultado $20,8 \times 10^5/100$ ml de bacterias. El pH es una medida de la acidez o alcalinidad de una solución e indica la concentración de iones hidronio $[H_3O^+]$ presentes en determinadas sustancias. La sigla pH significa "potencial de hidrógeno."

Las características químicas del ozono nos lo presentan como un gas inestable. Es precisamente gracias a esta inestabilidad a la que se debe su rapidez de actuación y su capacidad de convertirse nuevamente en oxígeno normal.

DEININGER [5] nos habla que la acción bactericida del gas ozono se basa principalmente en la oxidación de los enlaces disulfuro (enlace covalente fuerte de azufre con azufre) que mantienen el plegamiento de las proteínas. Esta oxidación destruye las proteínas estructurales de los microorganismos y la inactivación de las enzimas necesarias para su supervivencia. De manera similar, el ozono tiene también la capacidad de inactivar virus.

KINMAN [13] menciona que "en otros compuestos orgánicos el ozono convierte enlaces covalentes dobles entre los átomos de carbono, en simples, destruyendo así su estructura molecular". En general, los compuestos orgánicos son oxidados dependiendo de su funcionalización. Así por ejemplo, las olefinas pueden llegar a romperse, los grupos amina se oxidan a grupos nitro (destrucción de las cloraminas), etc. En menor medida, compuestos aromáticos como los clorofenoles son también destruidos por ozonólisis.

ELOVITZ [7] expresa que otros compuestos inorgánicos contaminantes son también oxidados por efecto del ozono. Estos mecanismos son propios de una oxidación, de la misma manera sucedería si se utilizara el cloro. Las diferencias consisten en: la mayor capacidad del ozono para llevarlas a cabo y una vez que ha actuado, el ozono da como subproductos de las reacciones: oxígeno (O_2), agua, óxidos inertes procedentes de las partículas metálicas que pudieran haber en el agua y, también, anhídrido carbónico (CO_2) en pequeñas cantidades. Todos ellos son compuestos mucho más inocuos que los derivados del cloro.

El ozono es una forma de oxígeno, compuesta por tres átomos del mismo y que se representa como O_3 a diferencia del oxígeno normal atmosférico, compuesto por dos átomos de oxígeno y representado por O_2 .

Se produce de manera natural en las altas capas de la atmósfera mediante la acción de los rayos ultravioletas sobre el oxígeno atmosférico, formando la llamada ozonósfera o capa de ozono, cuya misión es precisamente filtrar, absorber y reflejar la radiación ultravioleta procedente del sol.

Desde finales del siglo XIX, se vienen estudiando las propiedades desinfectantes y antisépticas de este gas, y desde entonces se viene utilizando con gran eficacia en el tratamiento de aguas de abastecimiento público, aguas residuales, y en tratamientos ambientales.

GEORGE [9] nos dice que el ozono puede ser generado de diferentes formas; su generación artificial se realiza mediante la activación del oxígeno del aire por descargas eléctricas de alto voltaje. Esta energía eléctrica rompe la molécula de oxígeno, recombinando sus átomos para formar ozono; en la mayoría de casos se requiere que moléculas de oxígeno de enlaces estables sean divididas en dos átomos inestables de oxígeno. Estos átomos de oxígeno, reactivos, reaccionan inmediatamente con moléculas de oxígeno para formar ozono. Los métodos para producir ozono son varios, pero únicamente la irradiación de aire u oxígeno con rayos ultravioleta, y la descarga corona son métodos de importancia comercial.

La producción de grandes cantidades a altas concentraciones de ozono requiere el uso de la tecnología denominada "descarga corona".

Una descarga corona es una descarga eléctrica silenciosa, la cual es usada para acelerar electrones y proporcionarles una energía cinética suficiente, para dividir por impacto, una molécula de oxígeno en dos átomos, los cuales reaccionan con otra molécula, dando como resultado, una de ozono. El ozono introducido en un ambiente cualquiera realiza tres acciones fundamentales:

A) Acción microbicida.

Es quizás la propiedad más importante del ozono y por la que más aplicaciones se le atribuyen. El concepto microbio, como es sabido, es muy amplio. En principio, microbio es un procariota (células sin núcleo diferenciado) que no puede ser visto por el ojo humano, y que requiere el uso del microscopio para ser observado.

Estos seres vivos permanecen muchas veces sobre todo tipo de superficies, en todo tipo de fluidos, o bien flotan en el aire asociados a pequeñas motas de polvo, minúsculas gotas de agua en suspensión, especialmente en sitios cerrados donde haya gran número de personas, y el aire se renueva muy lentamente.

El control de algunos de estos microorganismos, llamados patógenos por su capacidad de provocar enfermedades contagiosas, ha sido una gran preocupación del hombre desde el momento en que fueron descubiertos. Cientos de métodos y de sustancias químicas han sido elaborados y utilizados con este fin, proporcionando resultados en mayor o menor medida positivos e intentando disminuir la cantidad de estos patógenos, en términos como desinfección, higienización, asepsia, etc.

El ozono, debido a sus propiedades oxidantes, puede ser considerado como uno de los agentes microbicidas más rápido y eficaz que se conoce. Su acción posee un amplio espectro que engloba la eliminación de: bacterias (efecto bactericida), virus (efecto viricida), hongos (efecto fungicida), esporas (efecto esporicida).

El efecto bactericida, es bien conocido desde principios de siglo, donde se empezó a usar para el tratamiento de agua. Actualmente nos servimos de él, tanto para el tratamiento de todo tipo de aguas como para tratar ambientes e incluso directamente sobre el organismo humano con fines terapéuticos.

Una de las ventajas más importantes del ozono, con respecto a otros bactericidas, es que este efecto se pone de manifiesto a bajas concentraciones como de 0,01 partes por millón (p.p.m.) o menos y durante periodos de exposición muy cortos. Incluso a concentraciones ínfimas de ozono es ya perfectamente observable un efecto bacteriostático.

HOIGNE [11] manifiesta que “la diferencia entre un efecto bactericida y un efecto bacteriostático es sencilla: un agente bactericida es aquél capaz de matar a las bacterias. Sin embargo, un agente bacteriostático no llega a matarlas, pero si les impide reproducirse, frenando rápidamente el crecimiento de sus poblaciones.”

Aunque teóricamente sean efectos muy distintos, en la práctica, una población de bacterias sin capacidad de reproducción o con capacidad disminuida para la misma, es una población condenada a su desaparición. De hecho, agentes antimicrobianos tan importantes como algunos antibióticos basan su poder en una acción bacteriostática.

Los iones cargados se unen a las membranas de las bacterias y moho existentes en el ambiente. Rompen sus estructuras y matan el microorganismo. Ver figura 1.

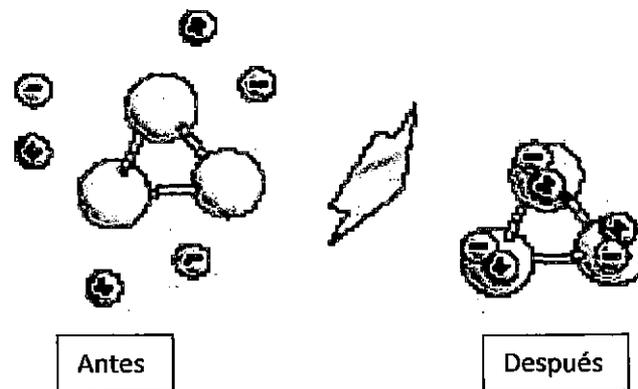


Figura 1. Ruptura de la estructura molecular bacteriana por los iones al momento de adherirse sobre aquella.

Para caracterizar su efecto viricida, definiremos el concepto de virus. Los virus son pequeñas partículas, son seres abióticos que no poseen ácido desoxirribonucleico (ADN), hoy consideradas frontera entre los seres vivos y la materia inerte, que no son capaces de vivir ni de reproducirse si no es parasitando células a las que ocasiona su destrucción. Sólo

poseen ácido ribonucleico (ARN). A diferencia de las bacterias, los virus siempre son nocivos y provocan enfermedades a todo organismo al que atacan. Enfermedades tan comunes como la gripe, el catarro, el sarampión, la viruela, varicela, rubéola, poliomielitis, y otras muchas son debidas a virus.

El ozono actúa sobre ellas oxidando las proteínas de su envoltura y modificando su estructura tridimensional. Al ocurrir esto, el virus no puede anclarse a ninguna célula hospedadora por no reconocer su punto de anclaje, y al encontrarse el virus desprotegido y sin poder reproducirse, muere.

La acción viricida es observable a concentraciones de ozono inferiores a la de acción bactericida. Esto es debido a que la complejidad de la envoltura vírica es inferior a la de la pared bacteriana.

Respecto a su efecto fungicida, es necesario mencionar que existen ciertos tipos de hongos que tienen capacidad de provocar enfermedades al ser humano. Otros son capaces de ocasionar alteraciones en nuestros alimentos, haciéndolos inaceptables para su consumo. Debido a esto, resulta interesante controlar y eliminar estas formas patógenas, cuyas esporas pululan por todo tipo de ambientes. El ozono nos ofrece la posibilidad de eliminarlas mediante su acción oxidante que provoca un daño celular irreversible.

Este gas también posee el efecto esporicida. Existen algunos hongos y bacterias que cuando las condiciones son adversas para su desarrollo, fabrican una gruesa envoltura alrededor de ellas, y paralizan su actividad metabólica, permaneciendo en estado de latencia. Cuando las condiciones para la supervivencia vuelven a ser favorables, vuelven a su forma normal y su metabolismo recupera su actividad.

Estas formas de resistencia se conocen como esporas y son típicas de bacterias tan patógenas como las que provocan el tétanos, la gangrena gaseosa, el botulismo y el ántrax.

Este tipo de mecanismo de resistencia hace muy difícil luchar contra ellas, incluso tratamientos tan útiles utilizando las altas temperaturas y multitud de antimicrobianos, se vuelven ineficaces.

El ozono a concentraciones ligeramente superiores a las usadas para el resto de las bacterias, es capaz de acabar con la resistencia de las esporas.

B) Acción deodorante.

Es una de las propiedades mejor comprobadas, debido a su gran utilidad en todo tipo de locales de uso público y en el tratamiento de ciertos olores de origen industrial.

El ozono posee la propiedad de destruir los malos olores atacando directamente sobre la causa que los provoca, y sin añadir ningún otro olor. Para lograr esto último resulta extremadamente necesario no exceder la concentración del ozono requerida para un determinado local, ya que si ésta se encuentra muy elevada, quedaría un residual fuerte de ozono presente en el aire y se percibiría un cierto olor.

¿Cuál es la causa de los malos olores?; en sitios cerrados, de gran afluencia de público, la causa suele ser la materia orgánica en suspensión, y la acción de los distintos microorganismos sobre ella, tal es el caso del típico olor a personas, humedad, tabaco, comidas, etc.

El ozono ataca a ambas causas. Por un lado oxida la materia orgánica, además de atacarla por ozonólisis y por otro lado ataca a los microbios que se alimentan de ella. Existe una amplia gama de olores los cuales pueden ser atacados por el ozono. Todo depende de la naturaleza de la sustancia causante del olor. Según dicha naturaleza se podrá establecer su vulnerabilidad hacia la acción del ozono, y la dosis de éste requerida para su eliminación.

El resultado de una correcta ozonización es que en los sitios donde existan malos olores, no huelan a nada luego de su aplicación.

El ozono emitido se adhiere a los compuestos que generan el mal olor y los ataca, ocasionando la desintegración de sus estructuras y generando agua y dióxido de carbono.

C) Acción oxigenante.

En las grandes ciudades, donde existen gran cantidad de locales cerrados y poco ventilados, con mucha frecuencia es apreciable el enrarecimiento del aire como

consecuencia de una carencia de oxígeno, la cual habitualmente identificamos como aire viciado.

El ozono, por su mayor poder oxigenante, contribuye a mejorar la eficiencia de las células de los organismos superiores en cuanto al aprovechamiento del oxígeno disponible, mediante la estimulación de varias enzimas que intervienen en estos procesos.

Entre otras aplicaciones, tenemos las aplicaciones domésticas: lavado de frutas y hortalizas, desinfección del agua de bebida, tratamiento de piscinas, fosas sépticas.

En cuanto a su aplicación en la depuración de aguas residuales, citamos las siguientes:

- Alcantarillas: se aplica ozono al agua residual urbana en los sistemas de recogida; la función principal es la eliminación de olores desagradables.
- Pre-ozonización: se dosifica ozono al agua residual bruta a su llegada a una estación depuradora, en diversos puntos de la red troncal.
- Post-ozonización: dosificación de ozono al efluente de una estación de depuración de aguas residuales. Generalmente, el tratamiento con ozono en una Estación de Tratamiento aguas Residuales (EDAR) se puede aplicar en diversos puntos, desde las balsas de decantación primaria para aumentar la floculación, hasta el tratamiento más habitual en el último estado, la clarificación, logrando un importante descenso de la demanda química de oxígeno (DQO) y la demanda bioquímica de oxígeno (DBO).
- Se añade ozono al agua residual urbana con los fines siguientes: control del olor, prevención de la septicidad, reducción de la DBO, facilitación de la eliminación de grasas y espumas, prevención de estancamientos y control de insectos en filtros percoladores, control de formación de espumas, destrucción de cianuros, eliminación de fenoles, ayudante de la coagulación y desinfección.

En lo referente al tratamiento del agua potable: la dosificación de ozono al agua antes de cualquier tratamiento posterior (pre-ozonización) y la dosificación de ozono en la última fase de un proceso de tratamiento (Post-ozonización).

El ozono se añade a un suministro de agua con fines químicos o bacteriológicos para: desinfección, prevención de la formación de limo y el crecimiento de algas, control de sabor y olor, oxidación del hierro y manganeso, eliminación del sulfuro de hidrógeno, eliminación del color.

El ozono tiene una amplia variedad de aplicaciones, tales como:

- **Industria alimenticia:** el ozono es muy utilizado en la industria pesquera, avícola, lechera, destilación de bebidas, así como en el envasado de frutas y vegetales. Su aplicación se efectúa tanto en el proceso de producción como en el de limpieza.
- **Industria papelera:** se emplea el ozono en la industria papelera para evitar la formación de limos mejorando con ello la calidad del producto final.
- **Industria galvanoplastita:** los vertidos de cianuros producidos por este tipo de industria son químicamente oxidados en soluciones alcalinas por el ozono, transformándolos en sustancias inocuas.
- **Acuicultura:** viveros de mariscos, piscifactorías. Desinfección y esterilización de material y maquinarias acuáticas.
- **Embotelladoras:** agua de lavado, agua de aporte, lavado de tuberías a altas concentraciones.
- **Circuitos de refrigeración:** en muchos procesos de fabricación, y particularmente en la producción de energía eléctrica, se requiere agua de refrigeración. Para prevenir el crecimiento de microorganismos en el agua de refrigeración, que reducirían el intercambio calorífico, se dosifican grandes cantidades de ozono. Cuando se trata de agua de mar, también se dosifica ozono para controlar la formación de colonias de moluscos en el interior del sistema de refrigeración.

2.2 CONCEPTUALIZACIÓN

En esta sección definimos los conceptos a emplearse en el trabajo de tesis.

2.2.1 Coliformes.

FALCÓN [8] conceptualiza a los coliformes como bacterias en forma de bacilos (cilindros), que están ampliamente distribuidos en la naturaleza y son huéspedes intestinales

del hombre y, en general, de los animales de sangre caliente. Muchas enfermedades infecciosas del hombre como la fiebre tifoidea, la disentería y el cólera son causadas por bacterias patógenas que se transmiten por aguas contaminadas, de ahí la importancia de los coliformes totales y fecales como indicadores inmediatos de contaminación fecal en el agua.

Asimismo, manifiesta que una muestra de agua, que no contenga coliformes totales y fecales, se considera libre de ser agente de enfermedades producidas por bacterias e inclusive por otros gérmenes patógenos, como por ejemplo los de la hepatitis A, rotavirus, etc.

2.2.2 Coliformes fecales.

APHA [1] define a los coliformes fecales como microorganismos con una estructura parecida a la de una bacteria común que se llama *Escherichia Coli* y se transmite por medio de los excrementos. La *Escherichia* es una bacteria que se encuentra normalmente en el intestino del hombre y en el de otros animales; existen diversos tipos, sin embargo algunos no causan daño en condiciones normales y otros pueden incluso ocasionar la muerte. Por ende el nombre de coliformes fecales se designa principalmente a los órdenes de bacterias de *Escherichia* y *Klebsiella*. El *Escherichia* no sobrevive mucho tiempo en aguas de mar pero otros coliformes fecales sí, por lo que suelen reportarse en conjunto y ambos conforman un indicador de contaminación bacteriológica de las playas.

2.2.3 Coliformes totales.

Al hablar de coliformes totales nos referimos en forma general a la familia de bacterias de los géneros *Escherichia*, *Enterobacter*, *Citrobacter* y *Klebsiella*. La mayoría de estos organismos se encuentran en el medio ambiente y en la materia en descomposición, excepto el género *Escherichia*.

URNANEJA [27] nos dice que otros autores mencionan al grupo de coliformes totales como la familia de *Enterobacteriaceae*, que se caracterizan por ser de forma bacilar, gramnegativos, aeróbicos y anaeróbicos, no forma esporas. La bacteria *E. Coli* constituye aproximadamente el 10% de los microorganismos intestinales del hombre y animales de

sangre caliente, por ello se utiliza como indicador biológico de contaminación fecal. Cuando esa bacteria no se detecta en un volumen de 100 mL de agua, se puede considerar que el agua es apta para el consumo humano.

2.2.4 Aguas residuales.

JIMENO [12] expresa que las aguas residuales han sido clasificadas en aguas residuales industriales y en aguas residuales municipales, estas últimas también llamadas aguas negras; son una mezcla compleja que contiene agua en más de 90% junto a contaminantes orgánicos e inorgánicos, en suspensión y disueltos.

La concentración de estos contaminantes normalmente es muy pequeña y se expresa en mg/dm^3 , esto es, en miligramos de contaminantes por decímetros cúbicos de la mezcla. Esta es una relación peso/volumen que se emplea para indicar concentraciones de componentes en agua, como aguas residuales, desperdicios industriales u otras soluciones diluidas.

A estas aguas, que han salido de la red del consumo humano, también se las denominan aguas servidas o de desagüe que luego son descargadas a la red de alcantarillado.

2.3 OZONIZADOR ELÉCTRICO

Si se colocan dos electrodos, separados por una capa aisladora (que puede ser vidrio y un espacio de aire), y se aplica una corriente alterna de elevado voltaje, el espacio de aire se llena de un fulgor difuso llamado descarga ozonizadora. Esta descarga en el aire seco es uniforme en caso que el espacio de aire no tenga más de 2 – 3 mm. Si el espacio de aire es muy ancho o el aire tiene cierta humedad, gran número de descargas brillantes y centellantes se entrelazarán en el espacio luminiscente. La descarga en el oxígeno es de color blanco.

Para obtener una verdadera descarga ozonizadora debe existir una capa aisladora porque sin ella sólo se producirá una chispa o un arco; y se ha de utilizar corriente alterna, puesto que no puede pasar corriente a través del aislador. Sencillamente éste recoge las

2312

cargas de electrones o de iones sobre su superficie durante un semiciclo de la corriente alterna y los libera al invertirse la polaridad.

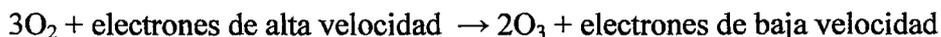
Aunque existen electrodos y aisladores planos, también se construyen ozonizadores en que los electrodos y el aislador son tubos concéntricos.

El ozono se descompone térmicamente en oxígeno; por lo tanto, un generador de ozono debe ser enfriado eficientemente para prevenir la operación del mismo a altas temperaturas. En el caso, que el calor no sea disipado adecuadamente del generador, una porción del ozono generado es simultáneamente destruido. Algunos generadores de ozono comerciales operan con temperaturas de las superficies de los electrodos de hasta 150° C.

2.4 DESCARGA CORONA

Cuando un electrón es acelerado a altas velocidades y contiene energía de 6 a 7 eV, ocurre una interacción entre las moléculas de oxígeno (O₂) y el electrón (e⁻), la cual da lugar a dos átomos de ozono.

La velocidad de disociación del oxígeno por impacto del electrón depende de la distribución de la energía en la descarga. Cuando los electrones salen con alta velocidad del conductor eléctrico cilíndrico e impactan sobre tres moléculas de oxígeno, los electrones disminuyen su velocidad y a la vez contribuyen a la formación de dos moléculas de ozono. Así tenemos:



Esto es usualmente tratado como una función de fuerza del campo eléctrico por unidad de densidad del gas.

La descarga corona está compuesta de numerosas pulsaciones de descargas, cada una de las cuales dura 10 ns aproximadamente. Los átomos activos reaccionan rápidamente con moléculas de oxígeno, de acuerdo a la ecuación 1, donde "K" es la velocidad de reacción para la formación de ozono y "T" es la temperatura del aire en grados kelvin. Cabe señalar que el mencionado aire (oxígeno + otros gases en menor proporción) es el que se encuentra encerrado dentro de la cápsula ionizadora.

$$K= 1.06 \times 10^{-34} e^{(510/T)} \text{ cm / s} \quad (1)$$

La formación de ozono a través de descargas eléctricas en un gas procesado está basado en las descargas corona no homogéneas en el aire u oxígeno. Hay numerosas microdescargas distribuidas, las cuales efectivamente generan ozono, el cual aparece en cada microdescarga que dura aproximadamente algunos nanosegundos, durando entre 2.5 a 3 veces más tiempo en el aire que en el oxígeno. La densidad de corriente varía entre 100 y 1000 A/cm².

VON [29] nos dice “que la descarga corona corresponde a una descarga parcial en un gas, localizada en una zona limitada del espacio y que no significa la pérdida completa de las propiedades aislantes del gas, por cuanto el resto del gas conserva sus propiedades dieléctricas originales. Se presenta en campos no uniformes, en zonas con grandes intensidades de campo.”

Si el electrodo adquiere un potencial lo suficientemente elevado para dar lugar a un gradiente con un campo eléctrico radial (junto a un conductor), igual o superior a la rigidez dieléctrica del aire, se producen corrientes de fuga, análogas a las debidas a la conductancia de los aisladores. Tales corrientes producen pérdidas de potencia.

En definitiva, todo sucede como si el aire se hiciese conductor, por eso se da la analogía citada.

En los conductores aéreos el fenómeno es visible en la oscuridad, pudiéndose observar cómo queda envueltos por un halo luminoso, azulado, de sección transversal circular.

Esta es la razón del nombre “Efecto Corona”, dado al fenómeno. Incluso en inglés mantiene la palabra española “corona”.

Cuando el campo eléctrico o gradiente de potencial alcanza la “rigidez dieléctrica del aire”, el aire se ioniza, se hace conductor y se produce una descarga local.

Existen diversos procesos elementales que contribuyen, detienen o retardan la producción de cargas eléctricas en el aire que se encuentra dentro de la cápsula ionizadora

(chamber); de acuerdo con su acción podemos clasificarlos en procesos favorables a la descarga y procesos desfavorables.

2.5 MECANISMO DE LA DESINFECCIÓN CON OZONO

HOIGNE [11] expresa que “el mecanismo de desinfección en la ozonización se basa en el alto poder del ozono como oxidante protoplasmático general. Esta condición convierte al ozono en un eficiente destructor de bacterias y la evidencia sugiere que es igual de efectivo para atacar virus, esporas y quistes resistentes de bacterias y hongos.”

A diferencia del cloro, la capacidad desinfectante del ozono no depende tanto de su período de retención en el agua (aunque esto tiene un efecto), sino más bien de la dosis suministrada. Esto se debe a que su alto potencial oxidante produce gran inestabilidad del ozono, incluso en el agua destilada, lo que quiere decir que quedará ozono remanente y por un corto tiempo sólo cuando toda la materia con alta capacidad de oxidación haya sido oxidada. En caso contrario, es posible que no se haya satisfecho completamente la demanda de ozono. Dada su escasa permanencia, es comprensible entonces la importancia de determinar adecuadamente la demanda de ozono y la dificultad que reviste determinar el residual que asegure una desinfección completa.

GLAZE [10] nos dice que “cuando hay presencia de material orgánico, la química se hace más compleja y se acelera la descomposición del ozono. Con un potencial de oxidación de 2,07 voltios, el ozono teóricamente puede oxidar la mayoría de los compuestos orgánicos y los convierte en dióxido de carbono y agua, pero como es selectivo en cuanto a las sustancias que oxida rápidamente, la cinética de las reacciones del ozono con muchos compuestos será demasiado lenta para que resulte en la conversión de estos a dióxido de carbono durante el tratamiento del agua. Como casi siempre la demanda total de ozono excede su suministro, estas reacciones cesarán mucho antes de que todas las sustancias orgánicas se hayan oxidado totalmente”.

Otra consideración que se debe tener en cuenta, al igual que con otros desinfectantes, es que la eficacia del ozono depende de su contacto con los microorganismos, por lo que debe evitarse que estos se agrupen y protejan (si el agua es

turbia) y también se debe proveer algún sistema de mezcla o contacto con el ozono antes que el gas se disipe.

2.6 PROCESOS FAVORABLES A LA DESCARGA

En el proceso de la descarga corona existen procesos favorables a ésta, tales como: foto-ionización e ionización por choque. A continuación presentamos algunas de las formas como puede darse la descarga corona en la estructura atómica.

2.6.1 Foto-ionización:



El bombardeo fotónico sobre los átomos (A) de un gas por luz ultravioleta, rayos cósmicos, radiactividad natural, radiaciones, etc., es capaz de ionizarlos (A^+) cuando la energía del fotón incidente es al menos igual a la energía de ionización de la partícula gaseosa. Si es que existe un excedente de energía, éste se transmite al electrón (e^-) en forma de energía cinética (ver esquema 2).

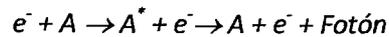
2.6.2 Ionización por choque:

Los electrones libres se desplazan y aceleran por la acción de un campo eléctrico como es por ejemplo el generado en el electrodo. En su movimiento, el electrón encuentra átomos y moléculas de los gases del aire, chocando con ellos. El choque puede ser de dos clases: elástico e inelástico (según sea alta o baja la energía del electrón).

En el choque elástico no ocurren cambios en la energía interna de las partículas ni en su estructura, solamente el electrón pierde algo de su energía, que ya era relativamente baja. Si el choque es inelástico, ocurren cambios de energía interna en el átomo neutro colisionado, los cuales pueden ser:

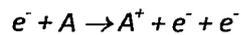
A) Excitación: El átomo (A) cuando choca con un electrón (e^-) de alta energía, tal como se ve en la parte izquierda de la reacción en el esquema 3, pasa a un estado de mayor energía interna con desplazamiento orbital de sus electrones (ver la parte central de la reacción que aparece en dicho esquema 3). Por lo general, este estado es inestable, por ello al átomo lo simbolizamos como A^* . Al desprenderse la energía en exceso mediante la emisión de un

fotón, el átomo (A) recupera su estado original y el electrón ha disminuido su energía. El proceso se puede esquematizar como:



(3)

B) Ionización: Si la energía del electrón (e^{-}) es aún mayor (dicho electrón viene del desprendimiento del conductor eléctrico), al impactar sobre el átomo neutro (A), ver parte izquierda del esquema 4, el choque tiene por consecuencia el desprendimiento de un electrón (e^{-}) del átomo chocado (A). El átomo primitivamente neutro (A), al quedar con un electrón menos, adquiere carga positiva (A^{+}) y se convierte en un ión positivo:

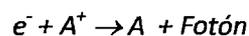


(4)

2.7 PROCESOS DESFAVORABLES A LA DESCARGA

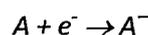
El proceso descarga corona también presenta fenómenos desfavorables como: recombinación y enlace con molécula neutra.

2.7.1 Recombinación: Para el caso de choque entre un electrón (e^{-}) y un ión positivo (A^{+}), sin la energía suficiente para producir algunos de los resultados ya descritos, ocurre una neutralización de ambas cargas y un átomo neutro (A). La reacción produce la liberación de una cierta cantidad de energía la cual es radiada en forma de un fotón (ver esquema 5), por lo tanto:



(5)

2.7.2 Enlace con molécula neutra: Un electrón libre (e^{-}) dotado de escasa energía puede chocar con un átomo neutro (A) ligándose a él y formando así un ión negativo (A^{-}), lo expresado queda representado como:



(6)

El ión negativo tiene menor movilidad que el electrón y por ese motivo, a pesar de conservarse la carga, la descarga tiende a neutralizarse (ver esquema 6).

2.8 CARACTERÍSTICAS DE LOS PROCESOS ELEMENTALES

Los procesos descritos se caracterizan por ser fenómenos probabilísticos; cada uno tiene una probabilidad de ocurrencia que depende principalmente de la densidad del gas y de la energía que poseen las partículas que lo forman. La probabilidad de choque de la partícula incidente es variable con la energía. En el caso de ionización, la probabilidad es nula si la energía es menor que aquella llamada “de ionización” que es típica del elemento de que se trate. Crece con el aumento de energía y luego disminuye. En el caso de fotones, las consideraciones son las mismas, sólo que la probabilidad es máxima cuando se está más cerca del nivel de ionización.

Otra característica importante de los procesos favorables a la descarga es que en ellos actúan principalmente electrones. Los iones, por su gran masa y dimensiones, tienen muy baja movilidad, por lo que la probabilidad de ionización por choque de iones es bajísima. Para efectos de estudio, los iones pueden ser considerados inmóviles con respecto a los electrones.

2.9 MECANISMOS DE FORMACIÓN DE DESCARGAS EN EL AIRE ENCAPSULADO

Siempre existe un cierto número de pares ión-electrón libres en el aire, usualmente creados por fotoionización producto de radiaciones naturales, que son los encargados de iniciar el proceso de formación de descargas.

Si un electrón choca con un átomo, y otro electrón es liberado, ambos son acelerados por el campo. Y si este campo tiene la intensidad suficiente, cada uno de estos electrones adquiere energía suficiente para desprender más electrones por colisión. De esta forma, se produce una reacción en cadena que aumenta la cantidad de electrones y de iones muy rápidamente, formándose una avalancha. Para que esta multiplicación de electrones se produzca en aire a presión normal, es necesario que el número de electrones liberados por ionización sea superior a los ligados por recombinación.

Para que una avalancha se transforme en una descarga, se debe alcanzar una cierta magnitud crítica del gradiente de voltaje, que depende de la polaridad del conductor; luego, en tensión alterna, el fenómeno es diferente en cada semiciclo, por efecto del cambio de polaridad del conductor.

3.10 DESCARGA EN EL ELECTRODO CON POLARIDAD NEGATIVA

En torno al conductor, el campo eléctrico tiene su máxima intensidad. Un electrón libre en esa zona es acelerado, alejándose del electrodo por poseer la misma carga negativa (repulsión). Al seguir suministrándole un determinado voltaje al conductor, se genera una densidad de carga, donde las cargas positivas (iones) se acercan al conductor y los electrones con carga negativa siguen siendo repelidos continuamente formando una avalancha. En este caso las condiciones de desarrollo de la avalancha son más desfavorables a medida que el electrón se aleja del conductor, pues el campo disminuye rápidamente (ver figura 2).

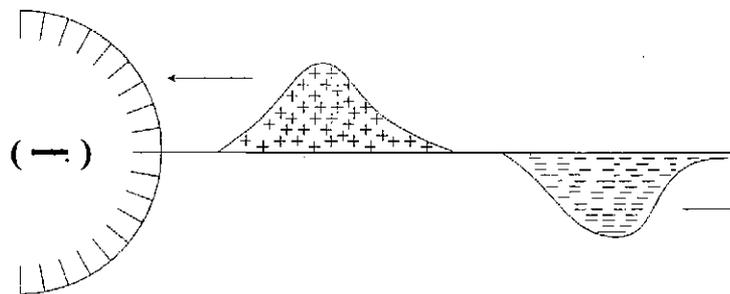


Figura 2. Cargas de espacio en la vecindad de un electrodo negativo.

STAEHELIN [26] afirma que “algunos de los fotones producidos en esta avalancha golpean al electrodo, liberando electrones que crean otras avalanchas y la cantidad de electrones libres crece rápidamente. Los electrones, al alejarse del conductor, dejan atrás los iones positivos producidos y finalmente se ligan a moléculas neutras, generalmente oxígeno, formando iones negativos.”

El campo se deforma por efecto de las concentraciones de carga en el espacio: aumenta cerca del conductor por efecto de la carga espacial positiva y esto provoca que los nuevos electrones libres en la superficie del conductor se recombinen con las cargas positivas antes de multiplicarse. Con el movimiento de la carga positiva hacia el electrodo, la ionización en la superficie cesa cuando el campo en esa zona disminuye con respecto al valor inicial por neutralización de esta carga y por el alejamiento de la carga negativa.

Al alejarse la carga negativa por efecto del campo, retornan las condiciones iniciales y el proceso se repite; cada vez se produce un pequeño pulso de corriente de frente muy escarpado por la velocidad de formación de la avalancha. Se produce radiación de energía que aparece en forma de luminosidad continua, por la elevada frecuencia de los pulsos que alcanzan desde 1 KHz hasta algunos MHz, lo cual provoca ruido audible e interferencias a frecuencias de radio. La energía para estos procesos es extraída del campo y constituye las pérdidas corona. Los pulsos de corriente y la frecuencia de éstos conforman las fuentes de interferencia.

2.11 DESCARGA EN EL ELECTRODO CON POLARIDAD POSITIVA

Si el cambio de polaridad es producto de una tensión alterna y encuentra una carga espacial negativa en las proximidades del electrodo (iones negativos generados en la etapa anterior), estos iones aumentan la intensidad de campo y se desplazan hacia el electrodo, donde se neutralizan. Dado que el desplazamiento de los iones es lento, no genera corrientes importantes y no se produce interferencia. En la recombinación se emite una luminosidad continua.

Después de este fenómeno, que sucede al comienzo del semiciclo positivo, el campo toma su distribución normal y comienza otro proceso que es repetitivo y produce efluvios luminosos con perturbaciones radio-eléctricas.

Los electrones libres en este caso son acelerados hacia el electrodo y se mueven con intensidad de campo creciente. Si el campo es suficientemente alto, ocurren ionizaciones y se forman avalanchas que alcanzan un valor máximo al llegar al electrodo. Los electrones se recombinan en el electrodo, dejando atrás los iones formados en la avalancha y

produciendo fotones (F), tal y como se muestra en la figura 3, estos fotones crean avalanchas secundarias sobre la nube de iones, la cual actúa como prolongación del electrodo, dando origen a un canal ionizado.

Las nuevas ionizaciones se producen principalmente en el extremo del canal. Cuando éste llega a una zona de baja intensidad de campo la ionización se detiene.

Las cargas espaciales constituidas por iones, se desplazan por efecto del campo y se restablecen las condiciones iniciales y el proceso puede repetirse (ver figura 3).

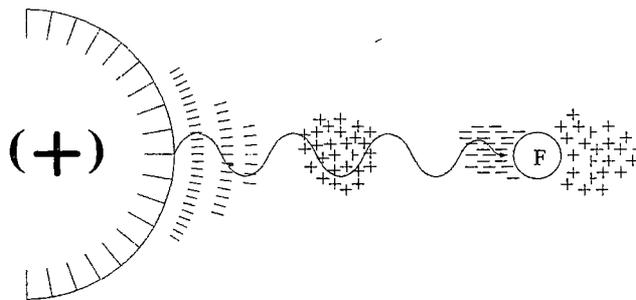


Figura 3. Cargas de espacio en la vecindad de un conductor positivo.

Con el electrodo positivo, la avalancha electrónica tiene su origen en el aire en torno al electrodo y se desarrolla hacia él. Los electrones son absorbidos por el conductor, dejando atrás una nube de iones positivos de mucha menor movilidad, alejándose del conductor. Esta avanzada de iones positivos actúa como prolongación del conductor. Se crean nuevas avalanchas de electrones libres y pares ión-electrón, creados por fotoionización, en el extremo del canal. Éste queda formado por un frente de intensa carga de espacio positiva y un cuerpo de plasma recorrido por una intensa corriente electrónica.

Cuando las ramificaciones alcanzan zonas de campo débil, su avance se detiene; los electrones se recombinan o forman iones negativos que se alejan del campo. Las condiciones iniciales pueden restablecerse y el proceso reiniciarse.

Este proceso de ionización se propaga lejos del electrodo mucho más que las avalanchas de polaridad negativa, genera corrientes cuyo valor sube muy rápido y alcanza amplitudes varias veces mayores que con polaridad negativa.

2.12 VARIABLES QUE INFLUYEN EN EL FENÓMENO EFECTO CORONA

La aparición e intensidad de las descargas corona es afectada por los siguientes factores: gradiente superficial, estado de la superficie del electrodo y densidad relativa del aire encapsulado.

2.12.1 Gradiente superficial.

La descripción de los procesos anteriores evidencia el importante papel que juega en este fenómeno el valor de la intensidad del campo en la superficie del electrodo. Se sabe con anterioridad que en un campo eléctrico uniforme es necesario un gradiente superficial de $29.80 \text{ KV}_{\text{punta}}/\text{cm}$, bajo condiciones normales de temperatura y presión ($25 \text{ }^\circ\text{C}$ y 760 mm de Hg), para causar la ionización del aire. Sin embargo, un gradiente de exactamente esta magnitud en la superficie del conductor no será suficiente para producir efecto corona, debido a que los iones no tienen oportunidad de acumularse en cantidad suficiente para producir la descarga corona, a menos que el gradiente crítico sea excedido hasta una distancia considerable desde el conductor y puedan de esta forma producir la avalancha.

El gradiente superficial (E_v) necesario para alcanzar el umbral corona en el gas que rodea un electrodo cilíndrico, se denomina también gradiente crítico visual o gradiente de iniciación " E_v ". Alcanzar el nivel E_v en la superficie del conductor significa que en una determinada distancia de dicha superficie se ha alcanzado el nivel de ruptura necesario para desencadenar el proceso de descargas. F. W. Peek provee una fórmula para determinar el campo superficial crítico de un electrodo cilíndrico, E_v en $\text{KV}_{\text{punta}}/\text{cm}$ (tal y como lo indica la ecuación 7). En el presente trabajo el generador posee un E_v igual a 7.27 KV/cm .

$$E_v = g_o \left(1 + \frac{0.301}{\sqrt{R}} \right) \quad , \quad (7)$$

donde:

E_v : gradiente superficial.

g_o : gradiente crítica disruptiva del aire $\approx 5.96 \text{ KV}_{\text{punta}} / \text{cm}$.

R : radio del electrodo, en cm.

El valor teórico del gradiente crítico definido por la fórmula de Peek puede diferir del gradiente crítico efectivo o real por efecto del estado de la superficie del conductor. La fórmula de Peek se explicará en el numeral 3.15.

2.12.2 Estado de superficie del electrodo.

Los cálculos de gradiente superficial en la superficie de conductores de líneas de transmisión se hacen frecuentemente considerando electrodos cilíndricos, de superficie lisa y perfectamente pulida, del mismo diámetro exterior que el electrodo real. Debido a las ralladuras, melladuras y otros daños que pueden existir sobre la superficie de los electrodos, el gradiente efectivo o real es algo menor que el calculado y, por lo tanto, cada electrodo real tendrá un gradiente crítico visual un poco menor por el conocido efecto de concentración de cargas y, por consiguiente, de mayores gradientes que se producen en puntos o aristas existentes en electrodos cargados.

Se considera un factor de corrección “ m ” (por tratarse de fórmulas obtenidas de manera experimental), el cual adquiere diversos valores de acuerdo a las características del conductor y es llamado también coeficiente de estado de superficie para el gradiente crítico, donde “ m ” se estima por:

m	: 1.00	Conductor liso ideal.
m	: 0.95	Conductor cableado nuevo y limpio.
m	: 0.70 - 0.80	Conductor cableado envejecido.
m	: 0.50 - 0.70	Conductor tratado deficientemente.
m	: ≤ 0.60	Conductor bajo lluvia, nuevo o envejecido.

2.12.3 Densidad relativa del aire.

La fórmula de Peek es válida en condiciones normales de laboratorio. Si la densidad del aire varía por efecto de la temperatura o presión, esto afecta la rigidez dieléctrica del aire y por consiguiente, el gradiente crítico.

Dentro del rango de presiones encontradas usualmente, la densidad del aire aumenta con la presión y disminuye con la temperatura. La Comisión Electrotécnica Internacional (CEI) da la siguiente expresión para “ δ ” (ver ecuación 8), la cual representa la densidad relativa del aire. En este trabajo “ δ ” tiene el valor de 0.677 y se expresa como:

$$\delta = \frac{0.393 P}{273 + T} \quad (8)$$

donde:

- δ : densidad relativa del aire.
- P : presión del aire, en mm Hg.
- T : temperatura del aire, en °C.
- g_o : gradiente crítica disruptiva del aire, KV_{punta} / cm

Finalmente, el gradiente crítico “ E_c ”, cuyo valor es 5.08 KV/ cm, se expresa como:

$$E_c = g_o \delta m \left(1 + \frac{0.301}{\sqrt{\delta R}} \right) \quad (9)$$

donde:

- m : factor de corrección.
- g_o : gradiente crítica disruptiva del aire.
- δ : densidad relativa del aire.
- R : radio del electrodo, en cm.

Uno de los ingenieros pioneros en el estudio del efecto corona fue el norteamericano Peek, quien ya desde principios de siglo dedujo de forma experimental unas fórmulas que permitieron su cálculo, cuyas características fundamentales son las siguientes:

1. En los cálculos de las pérdidas de potencia, debidas al “efecto corona”, se opera siempre con los valores de la tensión crítica disruptiva (concepto que se verá en el numeral 3.14) y no con los efectos luminosos.
2. Las pérdidas por el “efecto corona” empiezan a producirse desde el momento en que la tensión crítica disruptiva es menor que la de la línea de alimentación.
3. El gradiente antes citado nos conlleva a averiguar cuál es la “tensión crítica disruptiva” y aquella para la cual comienzan los efluvios de los electrones.

2.13 MÉTODOS PARA EL CÁLCULO DE PÉRDIDA CORONA

Los procesos elementales que intervienen en el efecto corona producen liberación de energía en las líneas de transmisión, que se manifiesta en forma de calor, luminosidad, radiaciones electromagnéticas, generación de productos químicos (ozono), ruido que produce interferencias en un amplio rango de frecuencias e incluso vibraciones mecánicas. Toda esta energía liberada proviene del campo eléctrico de la línea y por lo tanto es parte de la energía que se transmite, constituyendo las pérdidas corona.

KINMAM [13] afirma que para el cálculo de pérdidas se utilizan métodos que se diferencian esencialmente por el tipo de conductor en cuestión.

2.14 TENSIÓN CRÍTICA DISRUPTIVA (V_d)

GLAZE [10] lo conceptualiza como la tensión o resistencia del aire que los electrones deben vencer para iniciar su paso a través de él, abandonando el material conductor (electrodo). Es la tensión más importante (ecuación 10). De acuerdo a esta ecuación el valor de la tensión crítica disruptiva es 4.1 KV.

$$V_d = g_0 m R \delta L n \left(\frac{D}{R} \right) \quad (10)$$

Valores de “m” propuestos:

$m = 1.0$: para conductor liso, pulido.

$m = 0.93 - 0.98$: para conductor áspero o envejecido.

$m = 0.80 - 0.87$: para conductor en hebras.

Además:

$$g_0 = 5.96 \text{ KV / cm}$$

$$\delta = 0.393 P / (273 + T),$$

donde:

D : distancia efectiva entre fases, en cm. = 0.35 cm

P : presión atmosférica, en mm de Hg.

T : temperatura ambiental, 27° C

2.15 MÉTODO DE F.W. PEEK

El fenómeno corona ha sido estudiado, entre otros, por F. W. Peek, quien mediante observaciones empíricas desarrolló fórmulas para el estudio cuantitativo de éste en el caso de cilindros paralelos, de superficie lisa. Con su fórmula se obtiene la pérdida corona P_{Peek} , en KW/cm/fase, (ecuación 11); es decir, su fórmula expresa la cantidad de potencia perdida por el equipo ozonizador al momento que los efluvios de los electrones abandonan el electrodo para dar formación al ozono. Este fenómeno queda expresado en la fórmula (10). Para esta experiencia tiene un valor de 4.46 KV/cm/fase

$$P_{\text{PEEK}} = \frac{241}{\delta} (f + 25) \sqrt{\frac{R}{D}} (V - V_d)^2 \times 10^{-5} \quad (11)$$

donde:

- δ : densidad relativa del aire. = 0.677
- f : frecuencia del sistema, en Hz. = 1000 Hz
- R : radio del conductor, en cm. = 0.8 cm
- D : distancia efectiva entre fases, en cm. = 0.35 cm
- V : voltaje efectivo fase neutro, en KV. = 5 KV
- V_d : voltaje efectivo crítico disruptivo, en KV, = 4.1 KV

2.16 MUERTE CELULAR

Desde el punto de vista microbiológico, un microorganismo muere cuando pierde de forma irreversible la capacidad de dividirse o pierde su vida. El fundamento de esta definición es que si un microorganismo ha perdido la capacidad de dividirse no podrá formar una colonia sobre un medio de cultivo y no será posible detectar su presencia por los métodos microbiológicos tradicionales. Es decir, cuando no se produce aumento en el número de microorganismos, no hay crecimiento. Esta definición está muy anexada al término esterilización.

El término esterilización puede definirse como el conjunto de operaciones destinadas a eliminar o matar todos los microorganismos presentes en un objeto o sustancia. Como consecuencia de ésta definición, un objeto o sustancia estará estéril cuando se demuestre ausencia absoluta de toda forma viable de vida, no existiendo grados de esterilidad.

Para comprender el fundamento de la esterilización por agentes letales es necesario conocer la cinética de muerte de una población microbiana. El único criterio válido de muerte en el caso de los microorganismos es la pérdida irreversible de su capacidad de reproducción.

Cuando una población microbiana se somete a un proceso de esterilización, el número de sobrevivientes (N) disminuye exponencialmente con el tiempo de exposición

hasta que no puedan detectarse más organismos viables. Si se representa gráficamente el logaritmo decimal o natural de “ N ” en función del tiempo, se observará un comportamiento lineal, donde la pendiente de la recta obtenida corresponde a la constante de inactivación del proceso (k), que es una medida de la velocidad de muerte de los microorganismos viables.

La función que representa el comportamiento mencionado corresponde a una cinética de primer orden, donde la velocidad de destrucción de células es directamente proporcional al número de sobrevivientes. Esto puede expresarse mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{dN}{dt} = -k(N) \quad (12)$$

donde:

N : es el número de microorganismos viables en el volumen considerado.

t : es el tiempo de exposición al agente letal.

k : constante de velocidad de muerte celular.

dN/dt : velocidad de muerte celular.

Si se considera que “ k ” no dependen de “ t ”, la integración de esta ecuación (12) permite calcular el tiempo necesario para reducir la población a un determinado valor de “ N ” (ecuación 13), es decir:

$$t = \frac{2,303}{k} \log \frac{N_0}{N} \quad (13)$$

donde:

N_0 : es el número de microorganismos viables iniciales.

N : es el número de microorganismos viables luego del tiempo de exposición “ t ”.

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

En este capítulo se presenta el método y materiales empleados en la construcción del equipo generador de ozono, tal y como se detalla en las siguientes líneas.

El método a emplearse es conocido como descarga corona-burbujeo. Descarga corona porque el ozono se produce dentro de capsula ionizadora por el ejercicio de una fuerte descarga eléctrica sobre el oxígeno dando la formación del O₃. El ozono producido en la cápsula ionizadora es transportado a través de un conducto sintético para ponerlo en contacto con el agua residual a ser tratada. En el extremo opuesto de este conducto está anexado un difusor poroso, que basándose en la función del burbujeo (burbujas de ozono) suministrará de manera proporcional el gas ozono a toda la muestra. De allí el nombre del sistema de reparto por burbujeo, porque se forman pequeñas burbujas del mencionado gas. De esta manera se logra eliminar la carga bacteriana por la oxidación de las bacterias que se encuentran en el recipiente de vidrio. De esta manera queda demostrada la eficiencia del ozono en el tratamiento de las aguas residuales.

3.1 MATERIALES PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL OZONIZADOR

Para la elaboración de este generador se han utilizado los siguientes materiales.

- 4 elevadores de voltaje: eleva el voltaje de 220 V a 2000 V.
- 1 Compresor de aire: (Modelo AQ-21, 1/2 Hp, 220 V, 60 Hz, presión 10 bar).
- 4 Cámaras ionizadoras: (Cápsula Chamber).
- Conducto sintético ($\frac{1}{4}$ de pulgada x 5 metros).
- 1 Difusor poroso (piedra porosa, material cerámico, $\frac{1}{4}$ de pulgada de diámetro x 2 pulgadas de altura).

- 1 Ventilador de computadora.
- 4 tubos de vidrio electro-refractario de 18 cm de longitud, con d= 20 mm.
- 4 mallas cilíndricas de acero inoxidable de L= 18 cm, d= 16 mm.
- 4 mallas cilíndricas de acero inoxidable de L= 18 cm, d= 23 mm.

- 1 secador de aire de forma cilíndrica (en su interior contiene sílica-gel) cuyas medidas son: longitud = 8 cm, d = 5 cm.
- 4 interruptores T-120.
- 4 pilotos 220V AC.
- 4 fusibles.
- 1 caja metálica de 50 cm x 40 cm x 20 cm. (aquí se colocarán todos los dispositivos).

Externamente el generador se apreciará en las figuras 4 y 5.

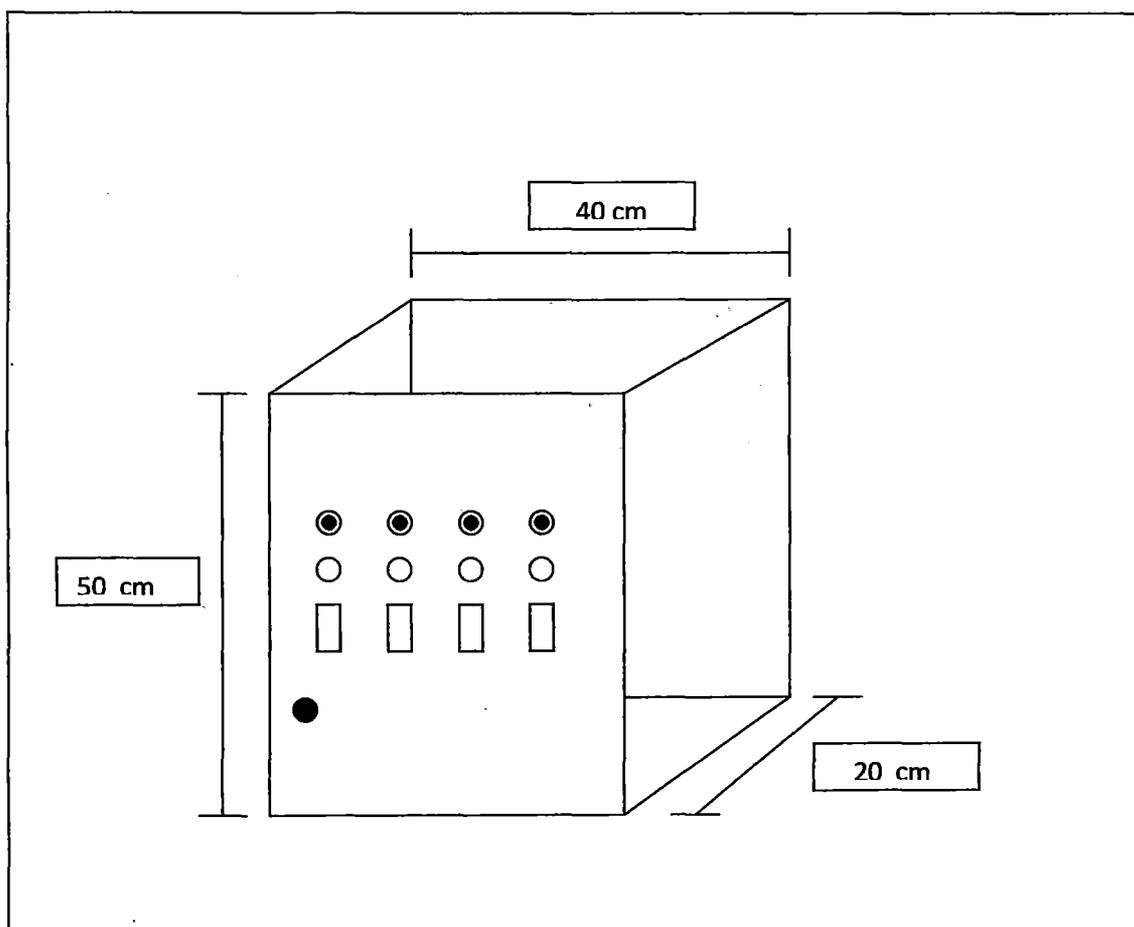


Figura 4. Dimensiones externas del generador de ozono.



Figura 5. Generador de ozono.

3.2 PROCESO DE LA CONSTRUCCIÓN DEL OZONIFICADOR

Los generadores industriales de ozono se fabrican generalmente de dos tipos, el de tubos concéntricos y el de placas: Las configuraciones pueden ser, vidrio-vidrio, o metal-vidrio.

El fundamento de un generador de ozono, para nuestro caso, se basa en la colocación de dos electrodos conductores cilíndricos de malla de acero inoxidable, situados de tal manera que exista entre ellos un espacio regular en el cual se introduce un cilindro de vidrio electro-refractario que presenta una gran resistencia al paso de la corriente eléctrica: un dieléctrico. Las medidas de las partes mencionadas están dadas en la sección precedente. Cada cápsula, para generar la descarga eléctrica, es suministrada por cuatro elevadores de voltaje (de 220 V a 2000 V); a su vez, para enfriar el sistema, lleva un ventilador externo que se encuentra en la caja de metal cuyas medidas también fueron citadas.

El ozono se produce al hacer circular aire por este espacio intermedio; previo a ello, el aire ha sido impulsado por el compresor y sometido al secador y deshumedecedor del

mismo. Una vez secado, el aire ingresará a la cápsula ionizadora para la formación del gas ozono.

El aire es cogido del medio ambiente, siendo capturado e impulsado por un compresor de aire. Éste está conectado por un conducto sintético al secador de aire, lugar donde el aire es secado y se extrae su humedad. De allí sale un conducto que se ramifica en cuatro brazos para ser acoplados a cada una de las 4 cápsulas ionizadoras, respectivamente.

Como se explicó al inicio de este apartado, el aire seco ingresa a las respectivas cápsulas para transformarse en gas ozono. El ozono sale de cada cápsula por medio de unos conductos sintéticos uniéndose todos ellos en uno solo, el cual -como ya se ha mencionado- lleva en su extremo de salida un difusor poroso. A continuación, en la figura 6 veremos la fotografía de la estructura del generador de ozono, y en la figura 7 el esquema del mismo.

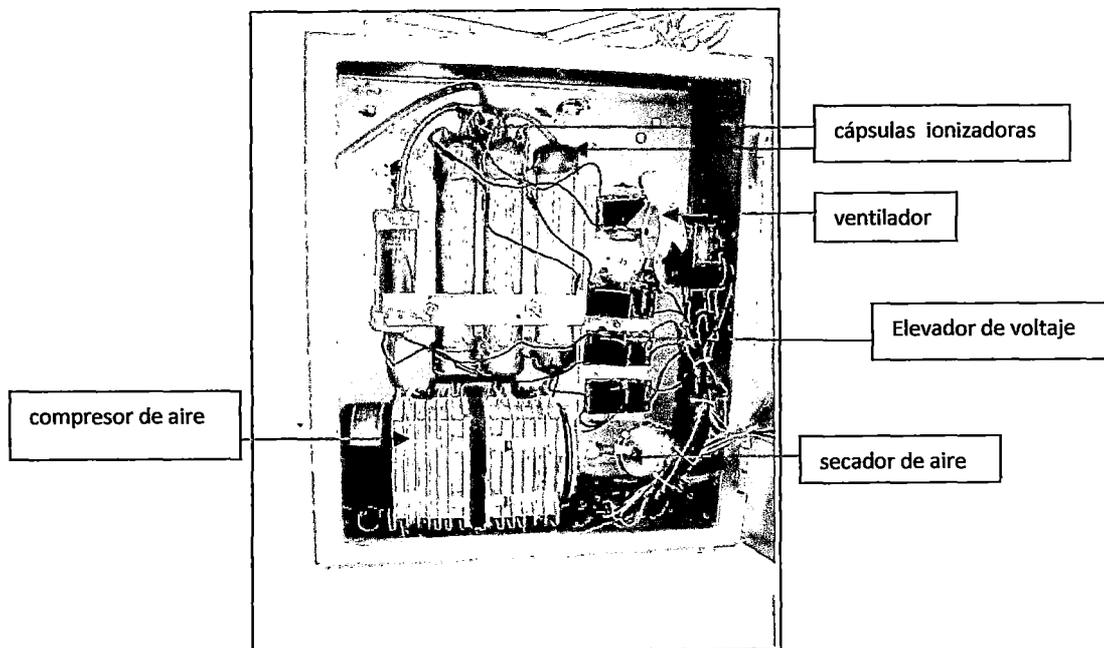


Figura 6. Estructura interna del generador de ozono.

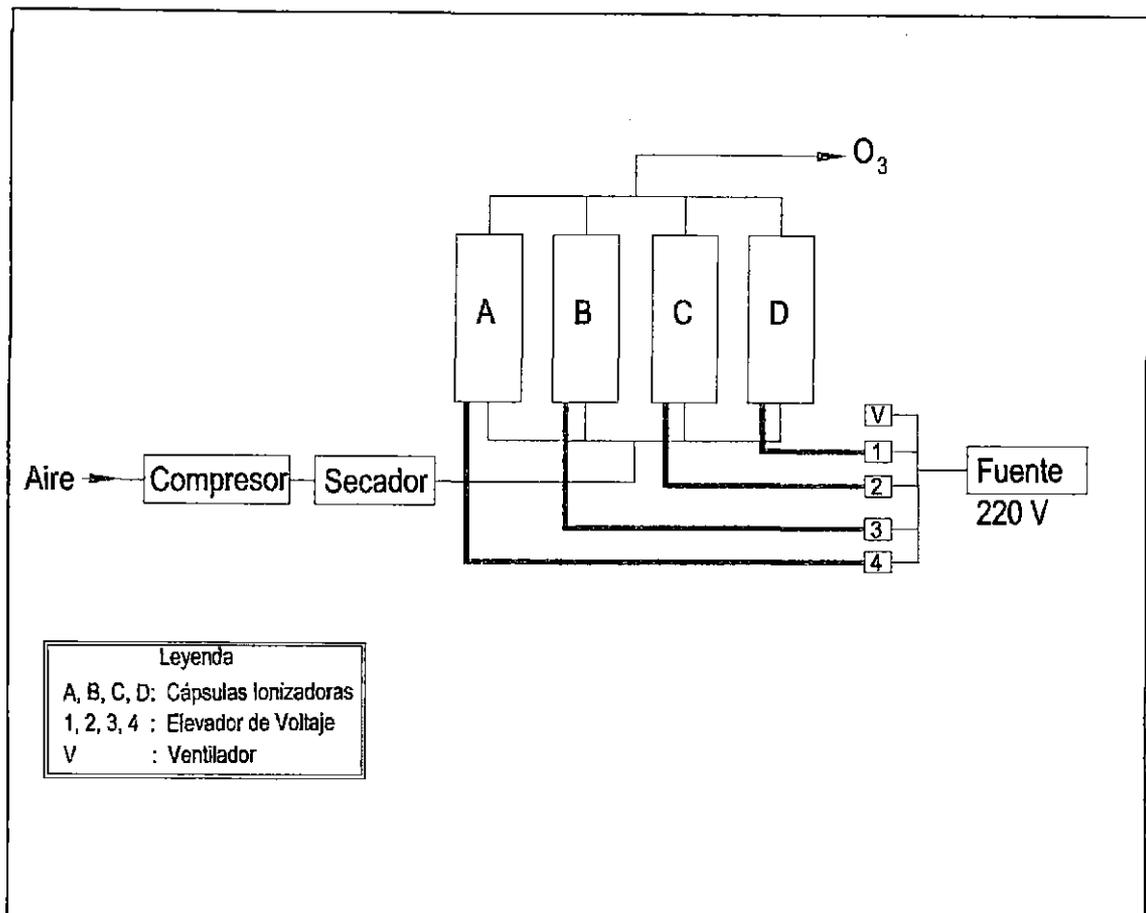


Figura 7. Esquema del ozonizador.

Cada cápsula produce 50 ml/h de gas ozono. Para que cada cápsula cumpla su trabajo de producción de O_3 , están supeditadas a la activación del interruptor; para ello cuenta con cuatro interruptores para cada elevador de voltaje, respectivamente, permitiendo el ingreso del flujo de energía o no. De esta manera el voltaje de 2000 V llegará a cada cápsula dependiendo de su encendido o inactivación. Por ello en la prueba se puede trabajar con concentraciones de 50 ml/h, 100 ml/h, 150 ml/h, 200 ml/h de ozono, de acuerdo al ensayo a realizarse. Para saber si la cápsula ionizadora está trabajando, cuenta con un foco piloto para cada cámara, el cual también está instalado en la puerta de la caja metálica. En la figura 8 mostramos el esquema del sistema eléctrico del generador de ozono.

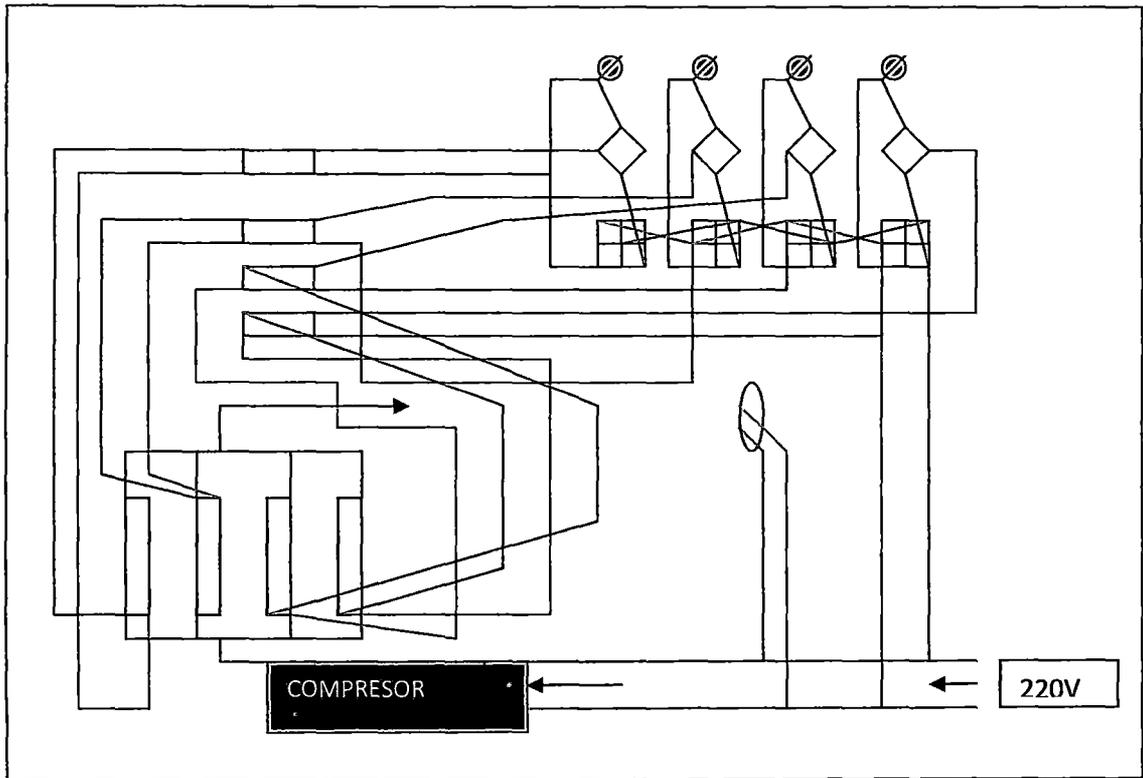
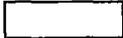


Fig. 8 Esquema eléctrico

LEYENDA:

- Elevador de Voltaje 
- Cápsula Ionizadora 
- Compresor de Aire 
- Interruptor 
- Fusible 
- Let o foco 
- Ventilador 

3.3 DISEÑO DEL PROTOTIPO

Las siguientes ecuaciones muestran la relación entre los parámetros básicos de diseño del generador.

La potencia aplicada al ozonizador es función del voltaje y la frecuencia, según la siguiente relación:

$$W = 4 f C_g E_o [E_m - (C_a / C) E_o] \quad , \quad (14)$$

donde:

W = potencia

f = frecuencia = 1000 Hz

C = capacidad

C_g = capacitancia del dieléctrico (aislador).

C_a = capacitancia del intervalo de descarga.

E_o = potencial de descarga a través del intervalo

E_m = valor máximo del voltaje en los electrodos.

Para un determinado ozonizador y un conjunto invariable de condiciones de operación, C_g , C_a y E_o son constantes independientes del voltaje y la frecuencia. El consumo de energía es, por consiguiente, directamente proporcional a la frecuencia y al voltaje más alto (por encima de un mínimo de voltaje de arranque). Además, dicho consumo, es incrementado por aislantes muy delgados con altas constantes del dieléctrico.

Las celdas industriales de descarga corona tienen una capacitancia debido al espacio de aire y el material aislante. Para geometrías cilíndricas y placas paralelas, respectivamente, las fórmulas para la capacidad (C) total de la celda, cuya unidad es el faradio "F", son las siguientes:

$$C = (2\pi\epsilon_0 L) / \ln (r_e / r_i) \quad (15)$$

$$C = \epsilon\epsilon_0 \left(\frac{A}{d}\right) \quad , \quad (16)$$

donde:

r_e, r_i = radios de los electrodos concéntricos, exterior e interior, respectivamente.

d = distancia entre electrodos.

L = longitud del electrodo.

A = área del electrodo.

ϵ_0 = constante dieléctrica absoluta ($8.854 \times 10^{-12} \frac{F}{m}$).

ϵ = constante relativa del dieléctrico (6 para vidrio).

C = capacidad en faradios.

La capacidad “ C ” es un parámetro de cada condensador que depende de su forma geométrica y del tipo de material utilizado para aislar eléctricamente las placas. Al tomar una carga “ q ” un cuerpo conductor adquiere un potencial “ V ”, de tal manera que ambas magnitudes quedan ligadas de forma directamente proporcional. Además, “ C_d ” es la capacidad del intervalo de descarga. Cuando se crea un campo muy alto, la carga no puede mantenerse invariable y por ende se carga y descarga constantemente; “ C_g ” es la capacitancia del dieléctrico (aislador).

El potencial de excitación es una función de la frecuencia de la señal, “ f ”, esto es:

$$E_o = (E_m) \cdot \text{sen}(2\pi \cdot f \cdot t) \quad , \quad (17)$$

en el cual E_m es el potencial de pico de la corriente alterna aplicada. A un valor E_s , llamado potencial arco, la descarga corona se convierte en un arco. Los valores de tales potenciales están determinados por las siguientes ecuaciones:

$$E_s = 29.64 P d_g + 1350, \text{ para el aire} \quad (18)$$

$$E_s = 26.55 P d_g + 1480, \text{ para el oxígeno} \quad , \quad (19)$$

donde:

P = 10 bar (presión absoluta del gas producida por el compresor).

$d_g = 3.5$ mm (espacio de descarga entre placa y placa).

Por consiguiente, tenemos:

$$E_m = 2000 \text{ V}$$

$$C_g = 40 \mu\text{F}$$

$$C_a = 100 \mu\text{F}$$

$$r_e = 11.5 \text{ mm (radio externo)}$$

$$r_i = 8 \text{ mm (radio interno)}$$

$$L = 180 \text{ mm (longitud del cilindro metálico del dieléctrico)}$$

Estas ecuaciones indican que, para valores iguales de espacio de descarga, el potencial de arco en el oxígeno es algunas veces más alto que en el aire. Esto puede ser corregido usando un espacio más estrecho en el diseño de los generadores basados en oxígeno. Con las otras condiciones constantes, el potencial de arco, cuando se opera a altos voltajes, es más bajo cuando el espacio de descarga es muy pequeño.

La formación de ozono en el ozonizador es directamente proporcional a la energía disipada en la descarga si se mantiene constante la concentración del ozono y la temperatura. Como 85–95% de la energía eléctrica aplicada se transforma en calor en el espacio donde se hace la descarga; si se aumenta la energía de entrada aumentará la temperatura, a no ser que se suministre mayor refrigeración. Por consiguiente, la cantidad de energía dedicada a producir la descarga estará rigurosamente restringida por las disposiciones de refrigeración.

3.4 ELEMENTOS DEL PROTOTIPO

Los sistemas de ozonización constan de cinco componentes básicos: la unidad de preparación de gas (que puede ser tanto aire u oxígeno puro), el generador de ozono, la fuente de energía eléctrica, el contactador y la unidad para la eliminación del gas sobrante (ver figura 9).

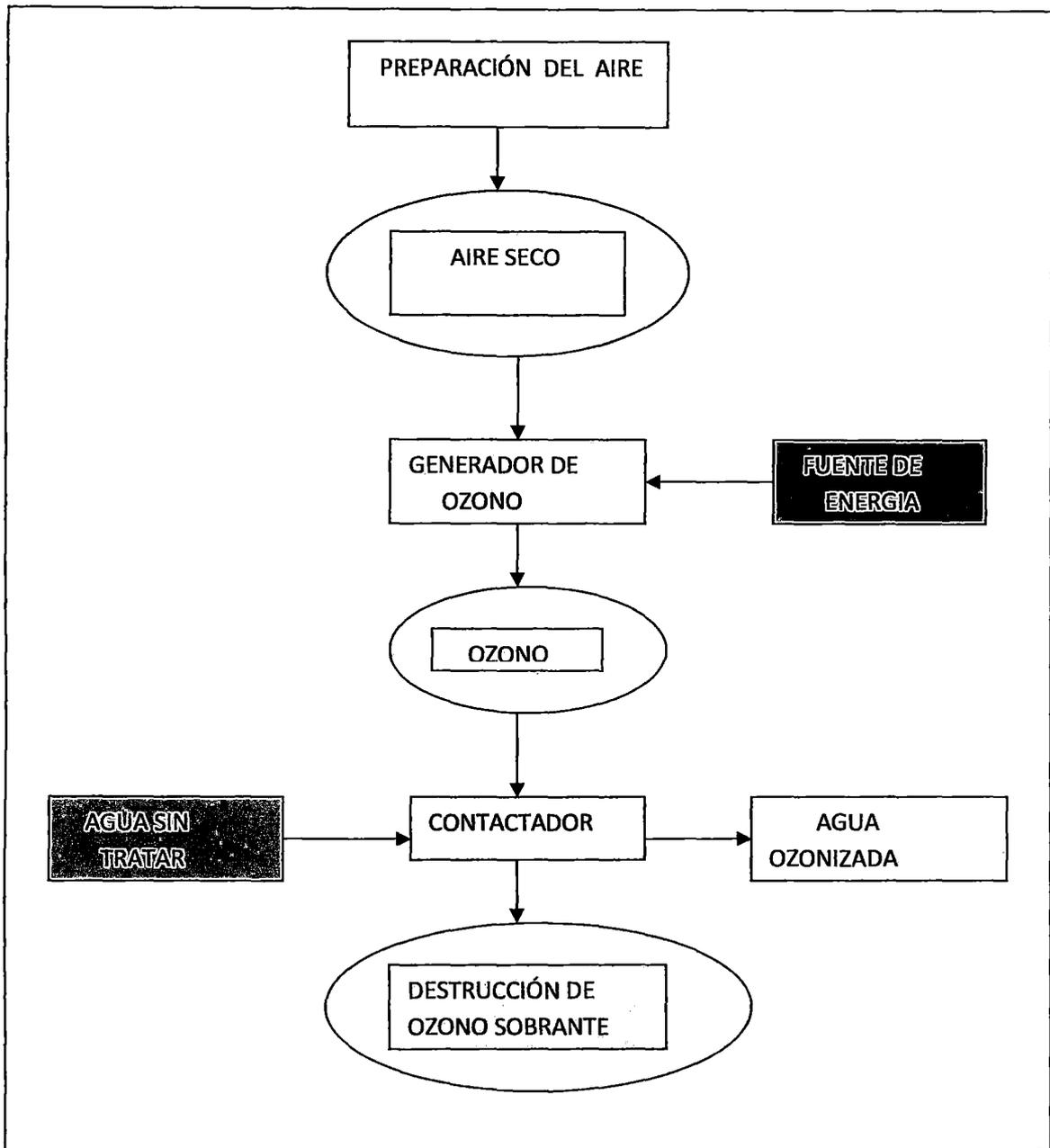


Figura 9. Esquema básico del proceso de ozonización.

En la figura 9, de manera esquemática, se presentan todos los componentes necesarios en la construcción del generador de ozono para la producción de este gas.

A partir del numeral 4.4.1 hasta el 4.4.6, se explican en detalle dichos elementos que están esquematizados en la referida figura.

3.4.1 Preparación del gas.

El propósito del dispositivo de preparación de gas es secar y enfriar el gas que contiene oxígeno. Los generadores del tipo descarga de corona utilizan aire seco u oxígeno puro como fuente de oxígeno que se va a convertir en ozono.

Cuando se utiliza aire es vital secarlo, a fin de maximizar el rendimiento del ozono y reducir al mínimo la formación de óxidos de nitrógeno que aceleran la corrosión de los electrodos. El aire también se debe enfriar porque el ozono se vuelve a descomponer rápidamente en oxígeno a temperaturas superiores a 30 ° C.

El elemento que realizará éste trabajo es el compresor de aire, cuyas características técnicas la mostraremos más adelante: En síntesis su función principal es capturar el aire del ambiente, preparar el gas, luego empujar el aire a la cámara de secado e introducirlo en la cámara ionizadora donde se producirá el ozono.

Para secar el aire también se pueden utilizar desecantes químicos en lugar de refrigeración. Su costo es algo mayor y varía considerablemente de un lugar a otro, pero en el caso de sistemas pequeños, el aumento del costo puede ser compensado por la sencillez de operación y mantenimiento. Actualmente, siguen haciéndose mejoras para aumentar el rendimiento del ozono.

3.4.2 Generador del ozono.

DEMERS [6] manifiesta que el ozono puede ser generado de diferentes formas. Mayormente se requiere que moléculas de oxígeno de enlaces estables sean divididas en dos átomos inestables de oxígeno. Estos átomos de oxígeno con enlaces covalentes, reaccionan inmediatamente con moléculas de oxígeno para formar ozono. La producción de grandes cantidades a altas concentraciones de ozono requiere del uso de la tecnología de descarga corona. Una descarga corona es una descarga eléctrica silenciosa, la cual es usada para acelerar los electrones y proporcionarles una energía cinética suficiente, para dividir

por impacto, una molécula de oxígeno en dos átomos, los cuales reaccionan con otra molécula, dando como resultado, una de ozono.

La termodinámica de la reacción de la síntesis del ozono se expresa de la siguiente manera:



El elemento encargado de producir ozono es el ozonizador eléctrico, conocido también como cámara ionizadora o cápsula ionizadora. Para nuestro caso es la cápsula ionizadora Chamber.

Para profundizar el trabajo explicaremos el proceso que se realiza en el ozonizador eléctrico o cámara ionizadora.

3.4.3 Ozonizador eléctrico (cápsula-dieléctrico).

MALVINO [16] nos menciona la importancia de la aplicación de placas electrónicas para elevación de voltaje. El proceso es el siguiente: se colocan dos electrodos de acero inoxidable (figura 11), separados por una capa aisladora (que puede ser de vidrio) y un espacio de aire de 4 mm (para algunos casos varía de 1-4 mm) y se aplica una corriente alterna de elevado voltaje (de 220 V se elevará a 2000 V) por medio de un elevador de voltaje; éste está compuesto de una “placa electrónica” y un transformador, lo cual permite un incremento significativo del voltaje; el espacio de aire se llena de un fulgor difuso llamado descarga ozonizadora. Esta descarga, en el aire seco, es uniforme si el espacio de aire no tiene más de 4mm. Si el espacio de aire es muy ancho o el aire tiene cierta humedad, gran número de descargas brillantes y centellantes se entrelazarán en el espacio luminiscente. La descarga en el oxígeno es de color blanco.

DEMERS [6] también nos dice: “es elemental recordar que para obtener una verdadera descarga ozonizadora debe existir una capa aisladora porque sin ella sólo se producirá una chispa o un arco, y ha de ser corriente alterna, puesto que no podría pasar corriente a través del aislador. Sencillamente éste recoge las cargas de electrones o de iones de su superficie durante un semiciclo de la corriente alterna y los suelta al invertir la polaridad.”

Para obtener ozono eficazmente, es preciso enfriar el espacio en que se produce la descarga y hacer pasar por ella una corriente de aire para extraer el ozono. En nuestro caso, por tratarse de 2000 V, el compresor de aire contribuye a enfriar el aire al interior de la cápsula.

SMITH [25] nos indica que el elemento del generador de ozono, donde se produce la ionización, se encuentra encerrada en una cápsula llamada Chamber (o cápsula ionizadora). Esta cápsula es de borisilicato con un diámetro de 3.5 cm., tal como se aprecia en la figura 10.

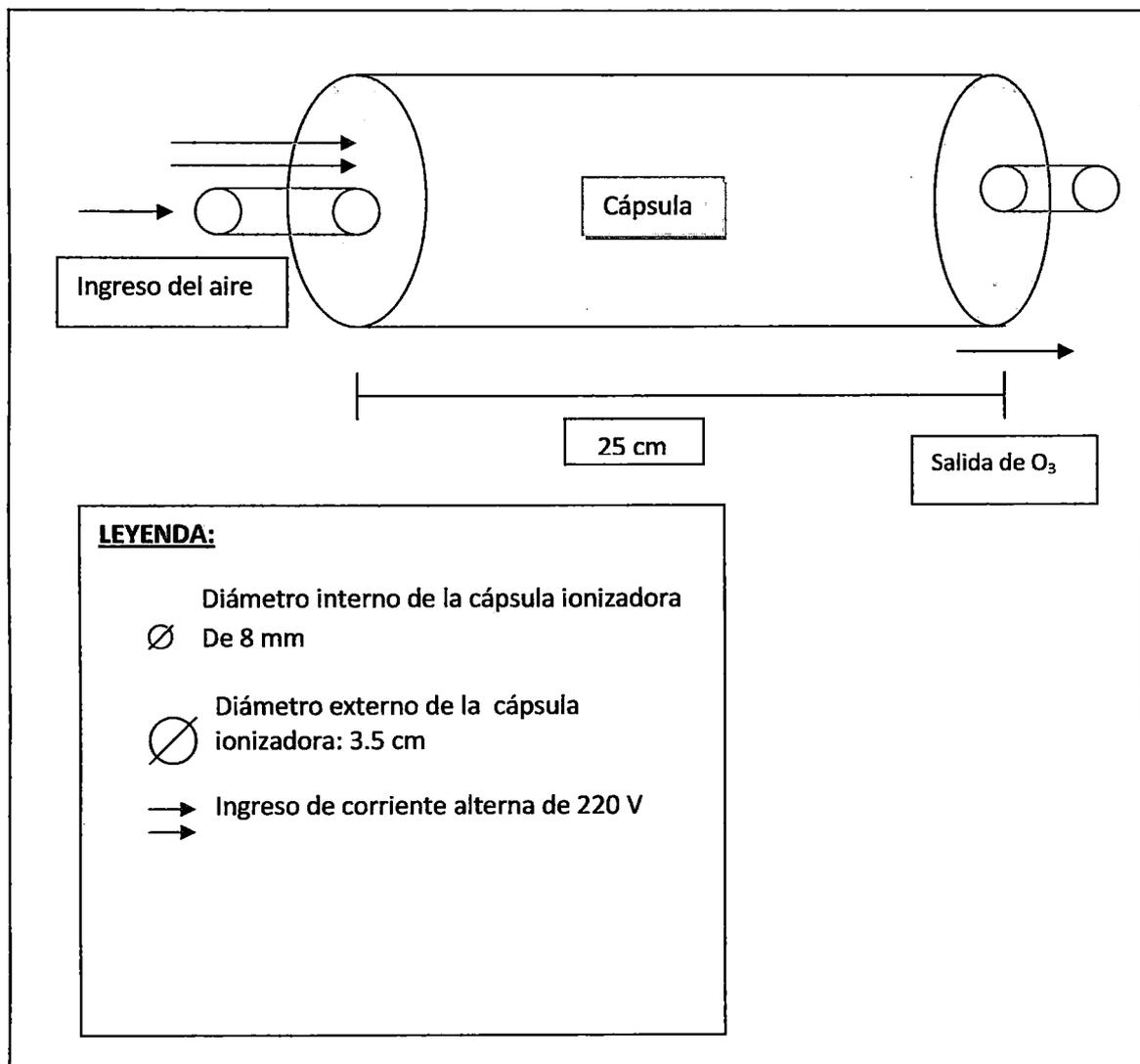


Figura 10. Esquema externo de la cápsula ionizadora.

El ozono se descompone térmicamente en oxígeno. En el caso que el calor no sea disipado adecuadamente del generador, una porción del ozono generado es simultáneamente destruido. Algunos generadores comerciales de ozono operan con temperaturas excesivas de las superficies de hasta 150 °C.

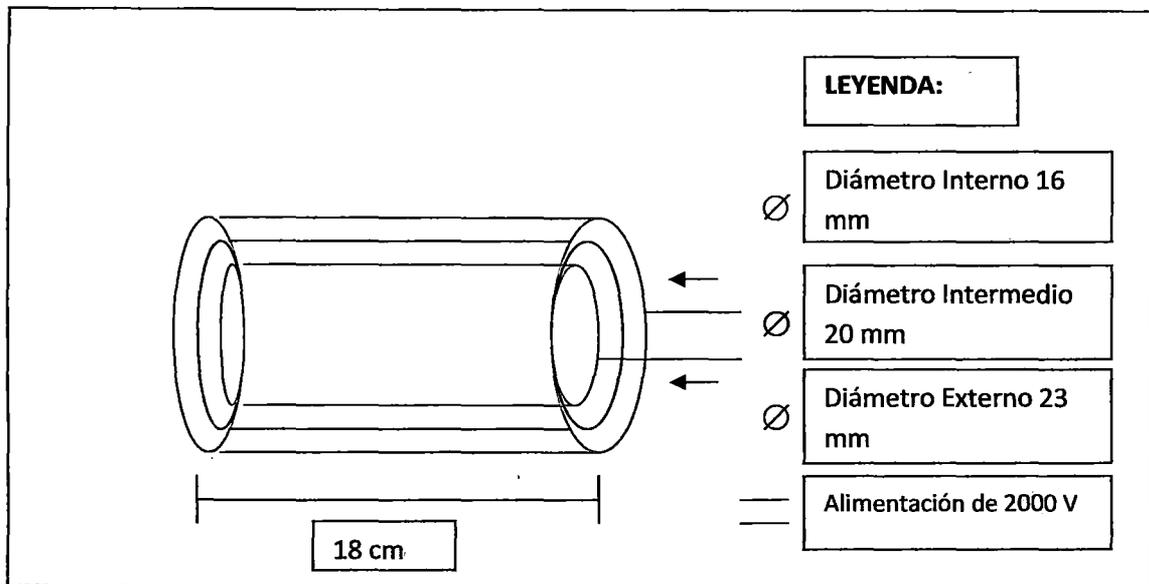


Figura 11. Esquema interno de la cápsula ionizadora.

3.4.4 Fuente de Energía.

RICE [23] manifiesta que todo el proceso de producción de ozono utiliza como fuente de energía la corriente eléctrica alterna. Para nuestro caso es de 220 V.

En esta investigación el voltaje será elevado a 2000 V por medio de un transformador o elevador de voltaje para que se pueda producir la descarga corona dentro de la cámara ionizadora.

3.4.5 Contactador

Los sistemas de ozonización utilizan contactadores para transferir el ozono generado al agua que se va a desinfectar. El tipo de contactadores depende del objetivo específico de la ozonización. Los objetivos se pueden clasificar como de reacciones rápidas: este es el

caso de la inactivación de microorganismos, la oxidación de hierro, magnesio y sulfuros, y el mejoramiento de la floculación; y de reacciones lentas: la oxidación de sustancias más difíciles de hacerlo como plaguicidas, sustancias orgánicas volátiles y otras sustancias orgánicas complejas que por razones cinéticas tienden a requerir tiempos de reacción más largos.

MASSCHELEIN [17] expresa que las fallas de los sistemas de desinfección por ozono generalmente se deben a fallas en el inyector y por defectos en el diseño y construcción del contactador. Hay dos diseños básicos del contactador: el de cámaras con difusores de burbujas y el reactor agitado por turbina.

Para que el ozono haga su trabajo de desinfección y oxidación (proceso por el cual purifica el agua contaminada), debe ser traído o dicho de otro modo llevado al recipiente donde se encuentra el agua contaminada y dispersado de la manera más sutil posible. En esta investigación, esto se realiza mediante un difusor de burbujas (piedra porosa de material cerámico). Esta piedra porosa se encuentra ubicada en el interior del recipiente con agua contaminada (sumergida en la base). Está conectada a la cápsula ionizadora a través de un conducto sintético de $\frac{1}{4}$ de pulgada y distribuye el ozono al agua, en forma de partículas muy pequeñas, a través del difusor poroso que se ubica en el otro extremo del conducto, purificando el agua mediante la oxidación química. Sin esta piedra porosa no se podría particionar el ozono porque éste es emanado en cantidades de masa considerables de la cápsula Chamber y justamente la función de ella es distribuirla al líquido en forma de pequeñas partículas (atomización del ozono).

3.4.6 Destrucción del ozono sobrante.

El modelo del prototipo que mostramos es eficiente y práctico de construir: Es un modelo real que en la práctica funciona eficientemente y no se necesita hacer uso de ningún sistema que elimine la producción excedente de ozono ya que éste produce o distribuye la cantidad de 0.1 p.p.m (partes por millón) de volumen, cantidad que es aceptada por las reglas internacionales que protegen la salud y el medio ambiente. Para nuestro caso, por tratarse de una cantidad pequeña de ozono, no es necesario utilizar un destructor de ozono.

3.5 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL EQUIPO

- Amperaje: 3.0 A.
- Producción de ozono: 200 ml/hora.
- Rango de temperatura: (0° C – 25° C).
- Inyección de ozono: burbujeo.
- Dieléctrico: tubo de vidrio refractario.
- Voltaje de alimentación: 220 V a 60 Hz.
- Voltaje de descarga: 2000 V.
- Frecuencia operación: 1000 Hz.
- Potencia máxima: 1.2 KW.
- Flujo de aire: 1 litro /minuto.
- Sistema de enfriamiento externo: ventilador

3.6 TOMA Y ANÁLISIS DE LAS MUESTRAS

En esta parte se explicará el proceso de la toma de muestras, lugar de extracción, fechas calendario para su respectivo análisis.

3.6.1 Muestras.

El muestreo se llevó a cabo durante tres días; las muestras fueron tomadas del afluente en la entrada principal ubicada en la puerta lateral del Parque de las Leyendas, ubicado en el colector Bertello de la Avenida Riva Agüero (espalda de la zona nor-este de la Región Selva de este centro recreacional). Se utilizaron 12 botellas de plástico esterilizadas de bocas anchas y rotuladas, que totalizaron 12 litros.

En la figura 12 se muestra la extracción de las muestras de aguas residuales, del afluente de aguas residuales, en el punto de entrada al Parque de las Leyendas. El caudal en este punto tiene un promedio de 200 litros por segundo. Desde este lugar se suministra dichas aguas para cubrir toda la cobertura vegetal de la zona de la selva del mencionado recinto recreacional.



Figura 12. Extracción de la muestra del agua residual.

3.6.2 Método de muestreo y análisis.

El muestreo se efectuó entre las 7.30 p.m. y las 12.30 a.m. que son las horas en las que se abre la válvula del efluente, a la vez son horas en las que se va incrementando progresivamente la carga bacteriana, según los reportes del personal que labora en el área de regadío.

Cada muestra de agua residual fue envasada en frascos de polietileno de 1 litro de capacidad. La primera muestra fue tomada el 17 de abril del 2008 en el horario de las 7:30 p.m., y rotulada con el código 001ARPL. La segunda muestra fue tomada el mismo día en el horario de las 8:30 p.m., y rotulada con el código 002ARPL. La tercera muestra fue tomada el 12 de mayo del 2008 en el horario de las 11:30 p.m., y rotulada con el código

003ARPL. La cuarta muestra fue tomada el 13 de mayo del 2008 en el horario de las 12:30 a.m., y rotulada con el código 004ARPL.

Lo expresado en este último párrafo se resume en la tabla N°1, titulada “Condiciones de muestreo”.

Tabla 1. Condiciones de muestreo.

Tipo de frasco	Tipo de muestra	Código	Fecha	Hora
Polietileno de 1L (estéril)	Muestra Puntual	001ARPL	17/04/08	7:30 p. m.
Polietileno de 1L (estéril)	Muestra Puntual	002ARPL	17/04/08	8:30 p. m.
Polietileno de 1L (estéril)	Muestra Puntual	003ARPL	12/05/08	11:30 p. m.
Polietileno de 1L (estéril)	Muestra Puntual	004ARPL	13/05/08	12:30 a.m.

Las muestras recolectadas fueron procesadas en el Laboratorio de Microbiología de la Facultad de Ingeniería Ambiental de la Universidad Privada Peruana Unión. Antes de someterlas a su análisis fueron filtradas, se tomaron las cantidades de agua residual (cantidades indicadas por el ingeniero químico) para mezclarlas con la sustancia “caldo verde brillante” (llamada así por su color verde); de esta nueva mezcla se tomaron series de cinco tubos de 10 ml, para proseguir con el proceso de incubación, para luego calcularse el número más probable (NMP) basándose en las combinaciones de tubos positivos y negativos, reportando los resultados como coliformes fecales o totales según sea el análisis por 100 ml. En la figura 13 se muestran dichas series. Este método también es llamado “método de tubos múltiples” por la utilización de tubos de ensayo.

Acotamos que a cada muestra de agua residual se le inyectó ozono con diversas concentraciones: 50 ml/h, 100 ml/h, 150 ml/h y 200 ml/h. Esta operación se efectuó durante 0 minutos al principio, luego 5 minutos, 10, 15, 20 y 25 minutos, respectivamente, para observar y analizar la disminución de la carga bacteriana.

Cabe señalar que antes de iniciar los análisis se esterilizó la mesa de trabajo, los accesorios y el conducto de salida del ozono.

Los análisis fueron realizados por el Método de Determinación del Número más Probable (NMP/100ml), método establecido como Método Estándar para análisis de agua y aguas residuales, aprobado por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (1999).

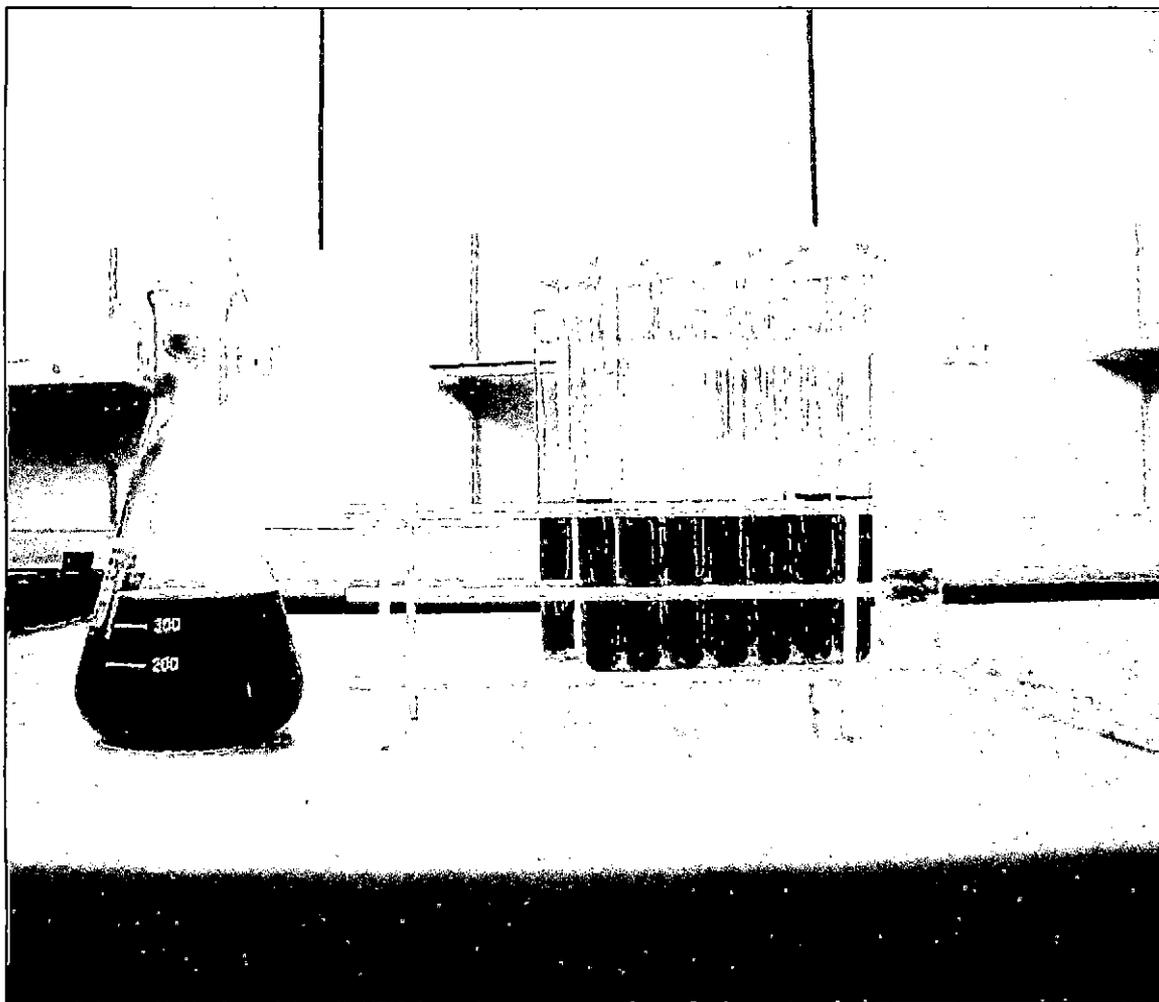


Fig. 13. Análisis del agua residual por el método de los tubos múltiples.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

A través del “Método Descarga Corona” se logra producir ozono en diversas concentraciones. En la tabla 2 se aprecia que por cada cápsula activada, de acuerdo a la fórmula de Peek, se producen diferentes concentraciones del mencionado gas. Cada cápsula funciona independientemente con cada elevador de voltaje, como si se tratase de motores diferentes. Por lo tanto, las cápsulas producen:

Tabla 2. Producción de ozono según el número de cápsulas.

Número de cápsulas activadas	Producción de ozono
Una cápsula ionizadora activada	50 ml / h
Dos cápsulas ionizadoras activadas	100 ml / h
Tres cápsulas ionizadoras activadas	150 ml / h
Cuatro cápsulas ionizadoras activadas	200 ml / h

De acuerdo a la fórmula de Peek, en el fenómeno descarga corona la pérdida de potencia (disipada) por cada cápsula ionizadora genera determinada producción de ozono. Como se puede ver en la tabla 3, al activar una cápsula genera una pérdida de potencia de 4.46 KV / cm / fase, con una producción de 50 ml / h de ozono; al activar dos cápsulas ionizadoras genera una pérdida de potencia de 8.92 KV / cm / fase, produciendo 100 ml / h de ozono; al activar tres cápsulas ionizadoras la pérdida de potencia es 13.38 KV / cm / fase, produciendo 150 ml / h de ozono y al activar las 4 cápsulas ionizadoras en simultáneo la potencia disipada es 17.84 KV / cm / fase, produciendo 200 ml / h de ozono.

Tabla 3. Potencia disipada según Peek por el método Descarga Corona.

Nº de cápsulas	Potencia disipada según Peek en KV / cm / fase	Producción de ozono
1	4.46	50 ml / h
2	8.92	100 ml / h
3	13.38	150 ml / h
4	17.84	200 ml / h

Los resultados de los análisis microbiológicos están en función de la pre-ozonización y post-ozonización de las muestras.

En la tabla 4 se presenta los resultados microbiológicos de las muestras de las aguas residuales antes de la ozonización.

Tabla 4. Resultados en función de la pre-ozonización.

MUESTRAS				
Tipo de Ensayo	Código 001ARPL	Código 002ARPL	Código 003ARPL	Código 004ARPL
* Coliformes totales	140 000 NMP / 100 ml	170 000 NMP / 100 ml	220 000 NMP / 100 ml	230 000 NMP / 100 ml
* Coliformes fecales	100 000 NMP / 100 ml	120 000 NMP / 100 ml	160 000 NMP / 100 ml	170 000 NMP / 100 ml
Ph	6.9	6.85	7.3	7.4
Tº C	22.3	22.1	15.1	16.1
Olor	Olor a sulfuro	Olor a sulfuro	Olor a sulfuro	Olor a sulfuro
Color	Grisáceo	Grisáceo	Grisáceo	Grisáceo

Después de la ozonización para los diversos tiempos (0, 5, 10, 15, 20, 25 minutos) los resultados son los que se muestran en las figuras 14 y 15.

En la figura 14 se muestra la disminución de los coliformes totales a medida que aumenta la concentración de ozono: 50 ml/h, 100 ml/h, 150 ml/h y 200 ml/h. Se puede observar cómo disminuyen estas bacterias para cada concentración a medida que aumenta el tiempo, desde el tiempo cero hasta los 25 minutos.

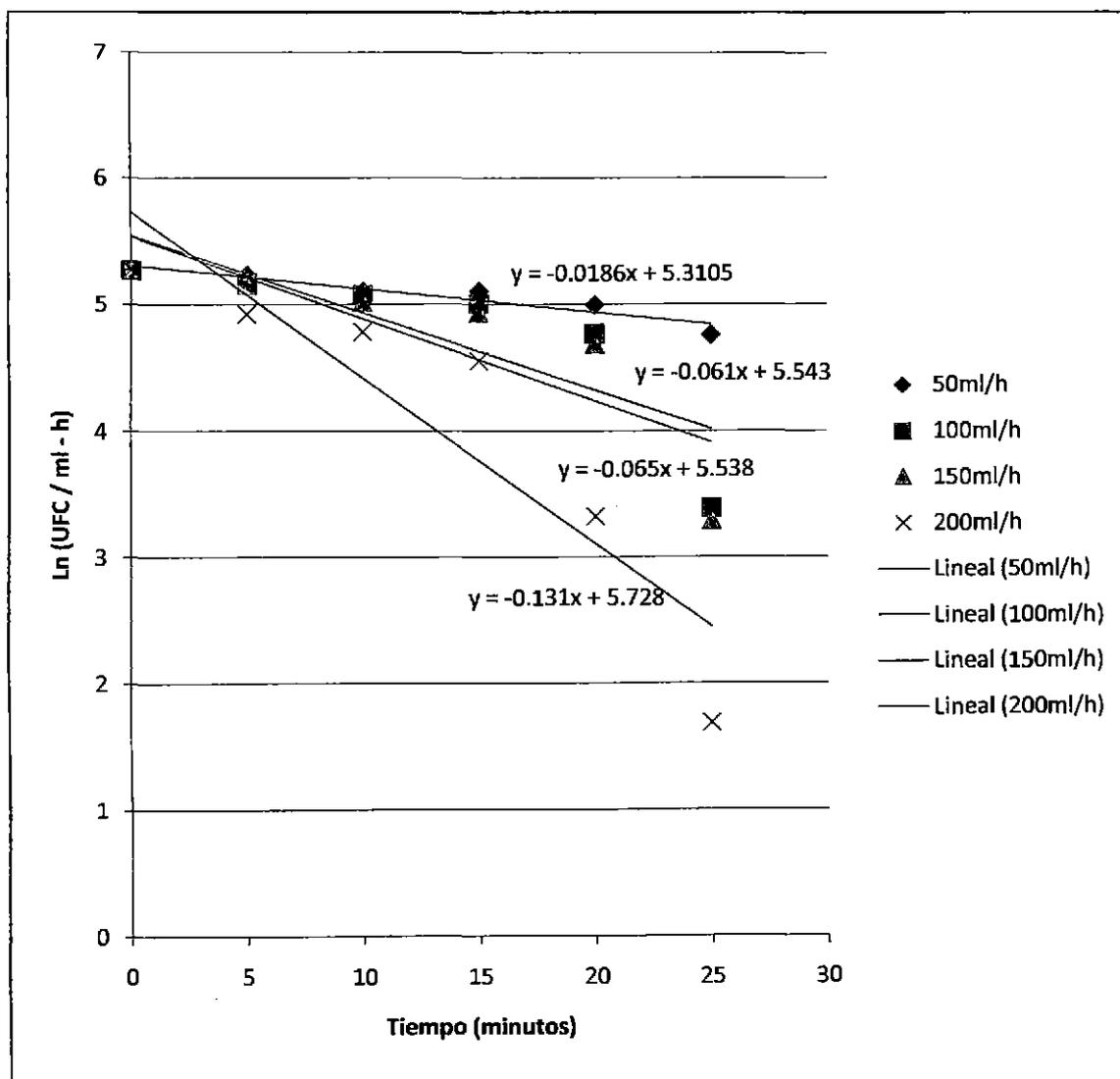


Figura 14. Rectas de ajuste de la disminución de los coliformes totales.

En la tabla 5 se muestra las diversas ecuaciones lineales de las rectas de ajuste cuando los coliformes totales disminuyen por acción de las diversas concentraciones de ozono.

Tabla 5. Rectas de ajuste para la disminución de los coliformes totales.

Concentración de ozono	Ecuación lineal de la recta de ajuste
50 ml / h	$y = -0.0186x + 5.3105$
100 ml / h	$y = -0.0611x + 5.5439$
150 ml / h	$y = -0.0651x + 5.5385$
200 ml / h	$y = -0.1311x + 5.7287$

En la tabla N° 6 se muestran los diversos factores de correlación para la disminución de los coliformes totales cuando son sometidas a diversas concentraciones de ozono.

Tabla 6. Factores de correlación en la disminución de los coliformes totales.

Concentración de ozono	Correlación lineal R^2
50 ml / h	0.8926
100 ml / h	0.6626
150 ml / h	0.6946
200 ml / h	0.8229

En la tabla 7 se muestra el valor de la pendiente para cada recta que representa la disminución de los coliformes totales cuando la muestra ha sido sometida a diversas concentraciones de ozono.

Tabla 7. Valores de las pendientes para cada recta en la disminución de los coliformes totales.

Concentración de ozono	Pendiente
50 ml / h	-0.0186
100 ml / h	-0.0611
150 ml / h	-0.0651
200 ml / h	-0.1311

En la figura 15 se muestra el conjunto de rectas de ajuste que representan la disminución de los coliformes fecales. A medida que aumenta la concentración de ozono a través de los tiempos: 0, 5, 10, 15, 20 y 25 minutos, se reduce la presencia de coliformes fecales. Asimismo a cada recta se le ha anexado de manera contigua su respectiva ecuación de la línea; ecuaciones que también se mostrarán en la tabla 8.

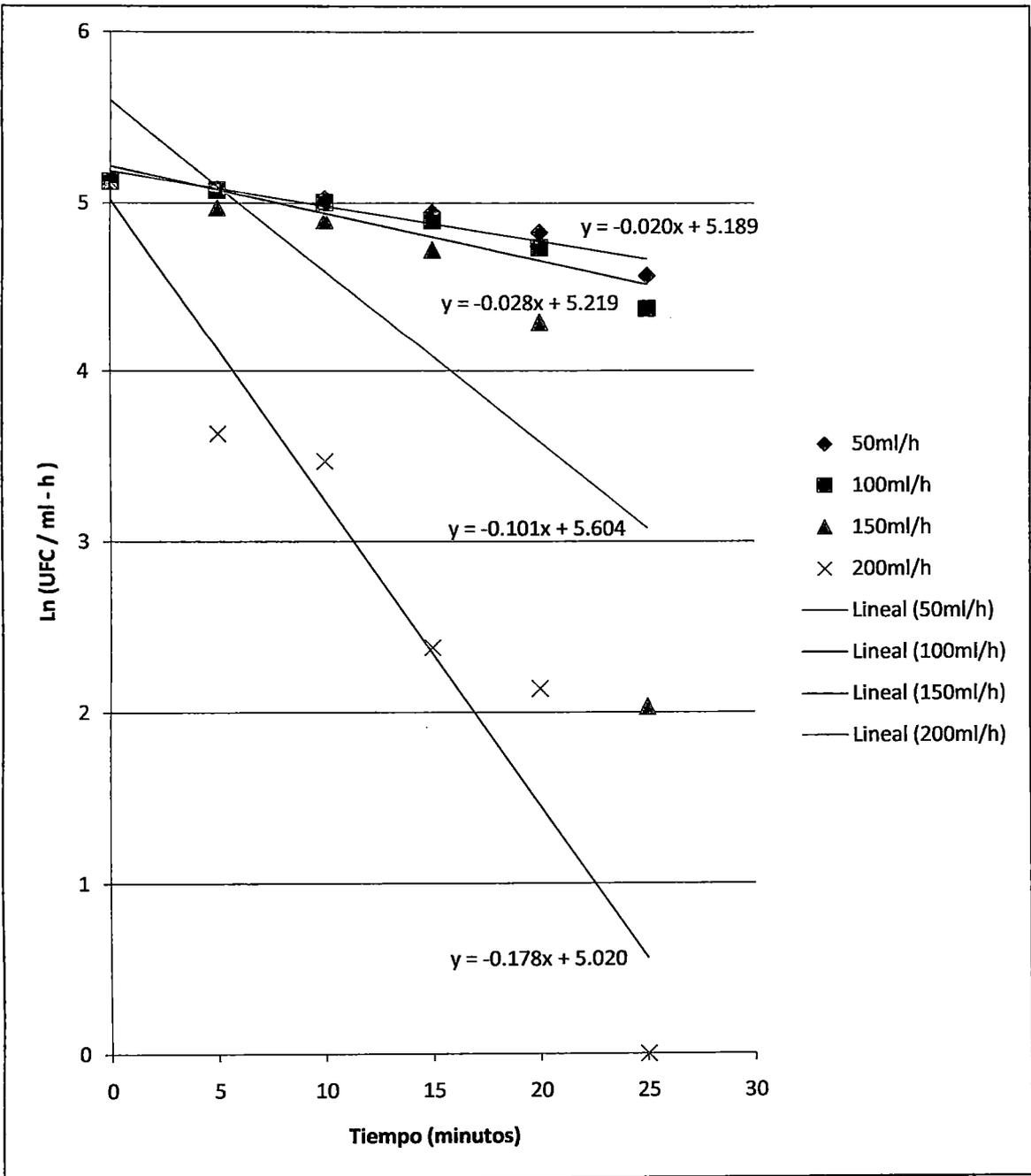


Figura 15. Rectas de ajuste de la disminución de los coliformes fécales.

En la tabla 8 se muestra las diversas ecuaciones lineales de las rectas de ajuste cuando los coliformes fecales disminuyen por acción de las diversas concentraciones de ozono.

Tabla 8. Rectas de ajuste para la disminución de los coliformes fecales.

Concentración de ozono	Ecuación lineal de la recta de ajuste
50 ml / h	$y = - 0.0208x + 5.1898$
100 ml / h	$y = - 0.028x + 5.2191$
150 ml / h	$y = - 0.1011x + 5.6044$
200 ml / h	$y = - 0.1783x + 5.0203$

En la tabla N° 9 se muestran los diversos factores de correlación para la disminución de los coliformes fecales cuando son sometidas a diversas concentraciones de ozono.

Tabla 9. Factores de correlación en la disminución de los coliformes fecales.

Concentración de ozono	Correlación lineal R²
50 ml / h	0.8929
100 ml / h	0.8756
150 ml / h	0.6568
200 ml / h	0.9267

En la tabla 10 se muestra el valor de la pendiente para cada recta que representa la disminución de los coliformes fecales, cuando la muestra ha sido sometida a diversas concentraciones de ozono: 50 ml/h, 100 ml/h, 150 ml/h y 200 ml/h.

Tabla 10. Valores de las pendientes para cada recta en la disminución de los coliformes fecales.

Concentración de ozono	Pendiente
50 ml / h	-0.0208
100 ml / h	-0.028
150 ml / h	-0.1011
200 ml / h	-0.1783

En la figura 16 se muestra las rectas de ajuste de la muerte celular de los coliformes totales, para las cuatro concentraciones de ozono: 50 ml/h, 100 ml/h, 150 ml/h y 200 ml/h en los seis tiempos indicados: 0 minutos, 5 minutos, 10 minutos, 15 minutos, 20 minutos y 25 minutos, respectivamente.

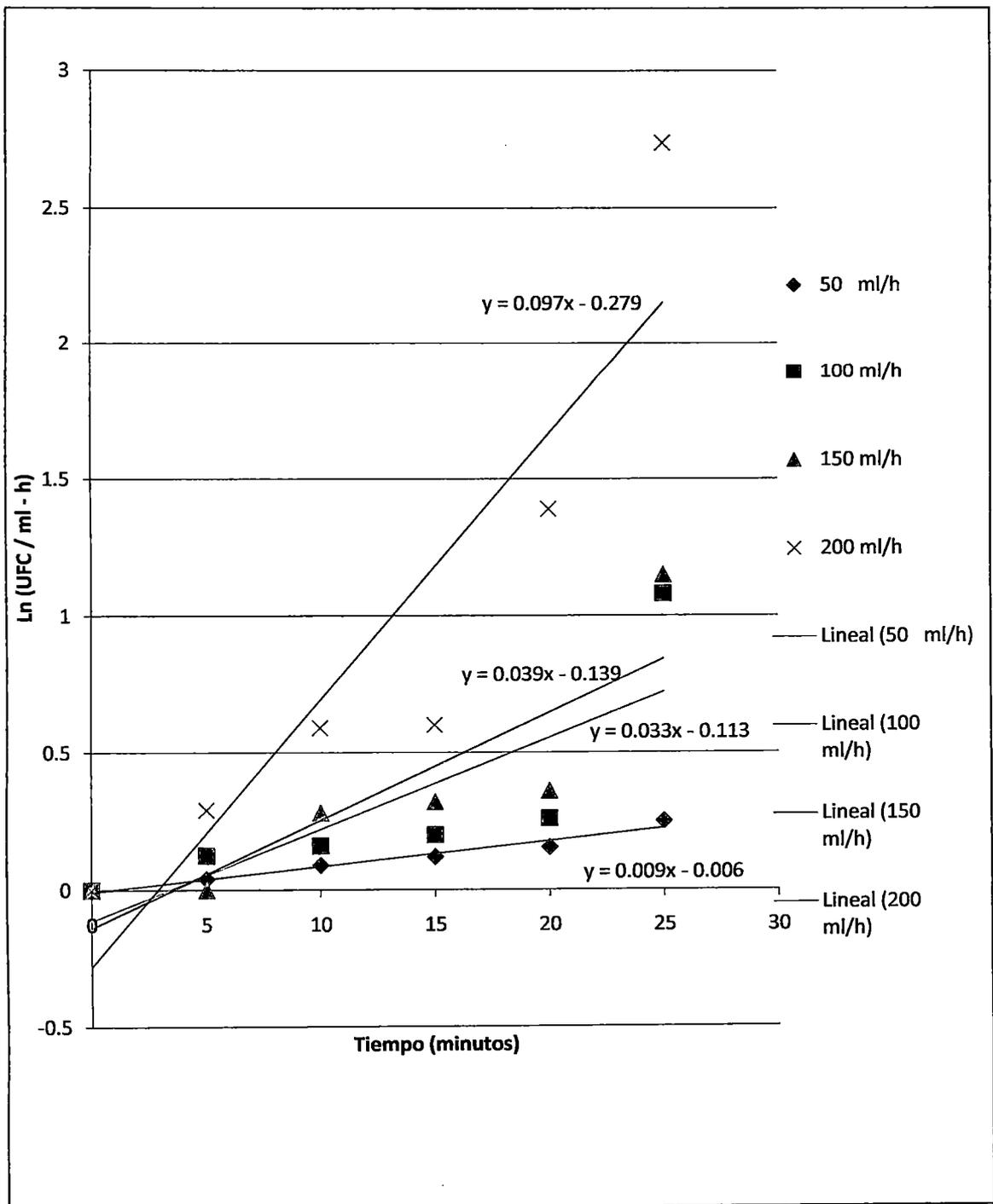


Figura 16. Rectas de ajuste de la muerte celular de los coliformes totales.

En la tabla 11 se muestra la tasa máxima de muerte celular de los coliformes totales, simbolizado con la letra “-K”, para las diversas concentraciones de ozono. Siendo (-K) un valor nominal que representa el incremento de la muerte celular, razón por la cual la gráfica 16 expresa dicho fenómeno.

Tabla 11. Tasa máxima de muerte celular (-K) UFC/ml/h de los coliformes totales.

Concentración de Ozono aplicado	Tasa máxima de muerte celular de los coliformes totales					
	Minutos de aplicación de ozono					
	0	5	10	15	20	25
50 ml / h	0	0.04	0.09	0.12	0.155	0.25
100 ml / h	0	0.125	0.16	0.2	0.26	1.08
150 ml / h	0	0.251	0.28	0.32	0.36	1.15
200 ml / h	0	0.291	0.59	0.6	1.39	2.74

En la tabla 12 se muestra las diversas ecuaciones lineales de las rectas de ajuste cuando se da la ocurrencia de la muerte celular de los coliformes totales por acción de las diversas concentraciones de ozono.

Tabla 12. Rectas de ajuste de la muerte celular de los coliformes totales.

Concentración de ozono	Ecuación lineal de la recta de ajuste
50 ml / h	$y = 0.0093x - 0.0069$
100 ml / h	$y = 0.0334x - 0.1133$
150 ml / h	$y = 0.0393x - 0.139$
200 ml / h	$y = 0.0972x - 0.2796$

En la tabla 13 se muestran los diversos factores de correlación para la muerte celular de los coliformes totales cuando son sometidas a diversas concentraciones de ozono.

Tabla 13. Factores de correlación en la muerte celular de los coliformes totales.

Concentración de ozono	Correlación lineal R^2
50 ml / h	0.9643
100 ml / h	0.6421
150 ml / h	0.7568
200 ml / h	0.8288

En la tabla 14 se muestra el valor de la pendiente para cada recta que se muestra en la figura 16, las cuales representan la muerte celular de los coliformes totales cuando la muestra ha sido sometida a diversas concentraciones de ozono. Tal es así que para la concentración de 50 ml/de ozono le corresponde el valor de 0.0093, para 100 ml/h de ozono le corresponde el valor de 0.0334, para 150 ml/h de ozono le corresponde el valor de 0.0393 y 200 ml/h de ozono le corresponde el valor de 0.0972.

Tabla 14. Valores de las pendientes para cada recta en la disminución de los coliformes totales.

Concentración de ozono	Pendiente
50 ml / h	0.0093
100 ml / h	0.0334
150 ml / h	0.0393
200 ml / h	0.0972

En la tabla 15 se muestra el análisis de varianza para los coliformes totales, elaborada con el programa Microsoft Office Excel.

Tabla 15. Análisis de varianza para los coliformes totales.

Origen de la variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F calculado	Probabilidad	F tabulado
Entre grupos	12.686177	5	2.5372354	9.0992	0.000902	3.10587523
Dentro de los grupos	3.3460809	12	0.2788400			
Total	16.032258	17				

En la figura 17 se muestra las curvas de la muerte celular de los coliformes fecales para cada concentración de ozono: 50 ml/h, 100 ml/h, 150 ml/h y 200 ml/h, en los seis tiempos: 0 minutos, 5 minutos, 10 minutos, 15 minutos, 20 minutos y 25 minutos respectivamente. Cabe recordar que la muerte celular se representa con el símbolo “-K”.

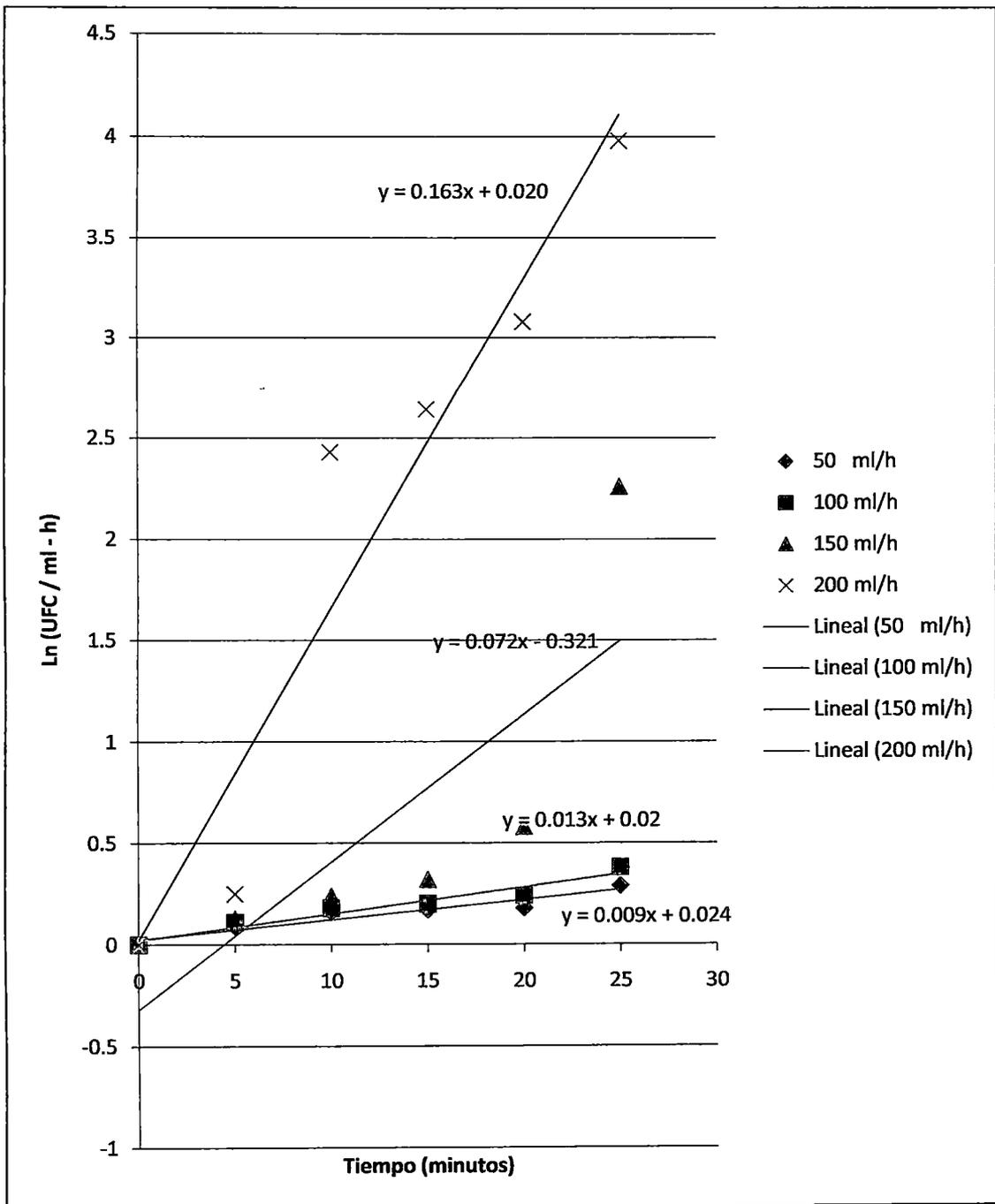


Figura 17. Rectas de ajuste de la muerte celular de los coliformes fecales.

En la tabla 16 se muestran los valores de la muerte celular para los coliformes fecales, para los tiempos: 0, 5, 10, 15, 20 y 25 minutos con diversas concentraciones: 50ml/h, 100ml/h, 150ml/h y 200ml/h, respectivamente.

Tabla 16. Tabla máxima de muerte celular (-K) celular de coliformes fecales.

Concentración de Ozono aplicado	Tasa máxima de muerte celular de los coliformes fecales					
	Minutos de aplicación de ozono					
	0	5	10	15	20	25
50 ml / h	0	0.09	0.16	0.17	0.18	0.29
100 ml / h	0	0.11	0.18	0.2	0.24	0.38
150 ml / h	0	0.13	0.24	0.32	0.58	2.26
200 ml / h	0	0.25	2.43	2.64	3.08	3.96

En la tabla 17 se muestra las diversas ecuaciones lineales de las rectas de ajuste cuando se da la ocurrencia de la muerte celular de los coliformes fecales por acción de las diversas concentraciones de ozono

Tabla 17. Rectas de ajuste de la muerte celular de los coliformes fecales.

Concentración de ozono	Ecuación lineal de la recta de ajuste
50 ml / h	$y = 0.0099x + 0.0248$
100 ml / h	$y = 0.0132x + 0.02$
150 ml / h	$y = 0.0727x - 0.321$
200 ml / h	$y = 0.1634x + 0.0205$

En la tabla 18 se muestran los diversos factores de correlación para la muerte celular de los coliformes fecales cuando son sometidas a diversas concentraciones de ozono.

Tabla 18. Factores de correlación en la muerte celular de los coliformes fecales.

Concentración de ozono	Correlación lineal R²
50 ml / h	0.9081
100 ml / h	0.9394
150 ml / h	0.6532
200 ml / h	0.9187

En la tabla 19 se muestra el valor de la pendiente para cada línea que representa la muerte celular de los coliformes fecales cuando la muestra ha sido sometida a diversas concentraciones de ozono.

Tabla 19. Valores de las pendientes para cada recta en la disminución de los coliformes totales.

Concentración de ozono	Pendiente
50 ml / h	0.0099
100 ml / h	0.0132
150 ml / h	0.0727
200 ml / h	0.1634

En la tabla 20 se muestra el análisis de varianza para los coliformes fecales realizada con el programa Microsoft Office Excel.

Tabla 20. Análisis de varianza para coliformes fecales.

Origen de la variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F calculado	Probabilidad	F tabulado
Entre grupos	16.0424931	5	3.208498634	1.9095286	0.16633	3.1058752
Dentro de los grupos	20.1630824	12	1.680256872			
Total	36.2055756	17				

CAPÍTULO V

DISCUSIÓN

La discusión de los resultados está centrada en dos conclusiones contundentes relativas a:

- El valor de la concentración efectiva del ozono por el método descarga corona.
- La velocidad de la muerte celular.

5.1 Del valor de la concentración efectiva del ozono por el método descarga corona:

A través del “Método Descarga Corona” se logra producir ozono en variadas concentraciones. En la tabla 2 se observa que por cada cápsula activada con la energía proveniente del elevador de voltaje, y de acuerdo a la fórmula experimental de Peek, se producen diferentes concentraciones del mencionado gas (50 ml/h, 100 ml/h, 150 ml/h y 200 ml/h). Cada cápsula ionizadora al poseer su propio elevador de voltaje e interruptor independiente, da lugar a que la producción de ozono ocurra como si se tratase de 4 generadores de ozono introducidos en una misma caja metálica.

En la figura 14 se muestra que a una concentración de 200 ml/h de ozono la concentración es más efectiva que en las otras. Tenemos:

- Para la concentración de 200 ml/h se observa que el efecto bactericida del gas sobre los coliformes totales es mayor en comparación con las otras concentraciones.
- Sólo la concentración más elevada logra en el tiempo de 25 minutos alcanzar el valor permisible de los coliformes totales (5000 UFC/100 ml), siendo necesario mayor cantidad de tiempo para eliminarlo totalmente.
- De esta gráfica se observa que en un tiempo de 25 minutos baja: 3,5 unidades logarítmicas para una concentración de 200 ml/h; 2,8 unidades logarítmicas para 150 ml/h; 2,7 unidades logarítmicas para 100 ml/h; y, 0,2 unidades logarítmicas para 50 ml/h.
- De la figura 14 se construye la tabla 6 de los valores de correlación para la disminución de los coliformes totales. A medida que se incrementa la concentración de ozono, el factor de correlación se aproxima a la unidad, lo cual corrobora su aproximación lineal

(para 200 ml /h de ozono corresponde 0.8229). De esta misma figura se construye la tabla 7 de los valores de la pendiente, de la cual se puede observar que la mayor pendiente corresponde a la concentración de 200 ml/h de ozono (-0.1311), cantidad que implica una disminución mayor de los coliformes totales.

De la figura 15 se observa también que a una concentración de 200 ml/h de ozono se obtiene la concentración más efectiva que en las otras, logrando eliminar por completo los coliformes fecales. Tenemos:

- Para la concentración de 200 ml/h se observa el efecto bactericida del gas sobre los coliformes fecales es mayor en comparación con las otras concentraciones.
- De esta gráfica se observa que en un tiempo de 25 minutos baja: 5 unidades logarítmicas para una concentración de 200 ml/h, 3 unidades logarítmicas para 150 ml/h, 0.7 unidades logarítmicas para 100 ml/h y 0.4 unidades logarítmicas para 50 ml/h, respectivamente.
- De la figura 15 se construye la tabla 9 de los valores de correlación de la disminución de los coliformes fecales. A medida que se incrementa la concentración de ozono, el factor de correlación se aproxima a la unidad, lo cual corrobora su aproximación lineal (para 200 ml /h de ozono corresponde 0.9267). De esta misma figura se construye la tabla 10 de los valores de la pendiente, de la cual se puede observar que la mayor pendiente corresponde a la concentración de 200 ml/h de ozono (-0.1783), cantidad que implica una disminución mayor de los coliformes fecales.

Respecto al análisis de varianza, hallamos:

- De la tabla 15 del análisis de varianza se observa que : $F_c > F_t$. De esta relación de desigualdad se puede afirmar que a mayor concentración de ozono más efectivo es el O_3 para eliminar coliformes totales; donde el primero es el F calculado, simbolizado por " F_c " y el segundo el F tabulado simbolizado respectivamente por " F_t ".
- De la tabla 20 del análisis de varianza se observa que: $F_c < F_t$. De esta relación de desigualdad se puede afirmar que a mayor concentración de ozono más efectivo es el O_3 para eliminar coliformes fecales; donde el primero es el F calculado (F_c) y el segundo el F tabulado (F_t) respectivamente.

De análisis de las tablas se puede concluir que la concentración es un factor efectivo respecto a la eliminación o muerte celular de los coliformes totales y fecales, no depende del tiempo. Esto muestra el hecho de que la función es lineal y no exponencial.

Asimismo, se puede afirmar entonces que a mayor concentración de ozono, mayor efectividad. Por ello se demuestra que la concentración de 200 ml/h de gas ozono resulta más efectiva.

5.2 De la velocidad de la muerte celular:

- De la figura 16, con respecto a la muerte celular de los coliformes totales, se observa:

- Para una concentración de 200 ml/h de ozono se alcanza la mayor cantidad de muerte celular en 25 minutos, en comparación con las otras concentraciones.
- Para la concentración de 200 ml/h se manifiesta una mayor velocidad de la muerte celular. En cambio para la concentración de 50 ml/h la muerte celular es muy lenta, se observa una insignificante velocidad; es decir para eliminar todos los coliformes totales se necesitaría mayor cantidad de tiempo que los 25 minutos.
- La tabla 13, que resulta de la figura 16, nos indica los valores de correlación de la muerte celular de los coliformes totales. A medida que se incrementa la concentración de ozono, el factor de correlación se aproxima a la unidad, lo cual corrobora su aproximación lineal (para 200ml /h de ozono corresponde 0.8288). De esta misma figura se construye la tabla 14 de los valores de la pendiente, de la cual se puede observar que la pendiente va aumentando a medida que se incrementa la concentración. La mayor pendiente corresponde a la concentración de 200 ml/h de ozono (0.0972), cantidad que implica una muerte acelerada de los coliformes totales.

- De la figura 17, con respecto a la muerte celular de los coliformes fecales, se observa:

- Para una concentración de 200 ml/h de ozono se alcanza la mayor cantidad de muerte celular en 25 minutos, en comparación con las otras concentraciones.
- Para la concentración de 200 ml/h se manifiesta una mayor velocidad de la muerte celular. En cambio para la concentración de 50 ml/h la muerte celular es muy lenta,

se observa una insignificante velocidad; es decir para eliminar todos los coliformes totales se necesitaría mayor cantidad de tiempo que los 25 minutos.

- En la tabla 18, que resulta de la figura 16, se muestra los valores de correlación de la muerte celular de los coliformes fecales. A medida que se incrementa la concentración de ozono, el factor de correlación se aproxima a la unidad, lo cual corrobora su aproximación lineal (para 200ml /h de ozono corresponde 0.9187). De esta misma figura se construye la tabla 19 de los valores de la pendiente, de la cual se puede observar que la pendiente va aumentando a medida que se incrementa la concentración. La mayor pendiente corresponde a la concentración de 200 ml/h de ozono (0.1634), cantidad que implica una muerte acelerada de los coliformes fecales.
- De las tablas 6 y 9, referentes a los factores de correlación (R^2) para los coliformes totales y fecales, se extrae el siguiente análisis:
- Los valores de R^2 implican que el efecto depende de la concentración y no del tiempo, porque la gráfica tiene un comportamiento lineal y no de otro tipo.
 - En el caso de la tabla 6, para coliformes totales, el hecho que la concentración de 200 ml/h tenga un R^2 lineal de 0.8229, significa que la muerte celular guarda una linealidad de 82,29%. Para el caso de la tabla 9, para coliformes fecales, la muerte celular mantiene una linealidad de 92,67%
- De la tabla 11 podemos afirmar:
- La aplicación de 25 minutos de ozono con una concentración de 200 ml/h a una muestra cuya contaminación con coliformes totales es elevada, está en la capacidad de incrementar la tasa de mortalidad celular (-K), siendo su tasa máxima experimental de 2.74 UFC/ml – h.
 - La tasa de velocidad de muerte celular tienen diferencias estadísticamente significativas, por lo tanto la causa de la muerte celular es la concentración de ozono.
- De la tabla 16 podemos afirmar:
- La aplicación de 25 minutos de ozono con una concentración de 200 ml/h a una muestra cuya contaminación con coliformes fecales es elevada, está en la capacidad

de incrementar la tasa de mortalidad siendo su valor máximo experimental de 3.98 UFC/ml – h.

- La tasa de velocidad de muerte celular tienen diferencias estadísticamente significativas, por lo tanto la causa de la muerte celular es la concentración de ozono.

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

- Se logró construir el equipo generador de ozono, para ello se tomaron en cuenta las recomendaciones de la empresa Ozono3Vida y manuales de la Universidad Nacional Autónoma de México. El equipo funciona a base de energía eléctrica alterna generando cuatro concentraciones diferentes.
- A través de experiencias documentadas, revisión bibliográfica y la construcción del equipo generador de ozono se logró demostrar el principio de generación de ozono artificial a partir del oxígeno impactado por la alta descarga eléctrica (método descarga corona).
- La concentración óptima de ozono es de 200 ml/h, la misma que para un tiempo de ozonización de 25 minutos logra reducir los coliformes totales cumpliendo los límites permisibles para aguas de tipo III, para el caso de los coliformes fecales los reduce al 100% en el tiempo de 25 minutos, demostrando la efectividad del ozono.
- Para concentraciones mayores de ozono a la producida en este ensayo, se requiere mayores niveles de disipación de potencia, además esto generaría un elevado nivel de ozono residual lo cual representa un riesgo de toxicidad.

6.2 RECOMENDACIONES

- El agua residual tratada con ozono puede ser caracterizada a fin de determinar su calidad que permita la re-utilización de la misma aprovechándola en riego de parques y jardines o también para el riego de campos de cultivo.

- La investigación desarrollada puede ser profundizada teniendo en cuenta otros parámetros y consideraciones de ingeniería que permitan proyectar un sistema de tratamiento a mayor escala del agua residual.
- La producción de ozono es muy útil para usos benéficos como en el tratamiento de aguas residuales, pero su producción no controlada contribuye al efecto invernadero o calentamiento global.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] APHA, GEOFFRAY, E. y KOVACSIK, L. *Microorganisms in the Environment Biochem World Magazine*, Englad, 2002.
- [2] APHA. *Standard Methods for the examination of water. American Public Health Association (APHA)/American Water Works Association (AWWA)/Water Environment Federation (ECF)*, Washington DC-USA. 20th Edition, 1998.
- [3] CORDOVA J. *Reutilización de aguas residuales para riego mediante oxidación con ozono: una alternativa ecológic. Riegos y Drenajes XXI. Año XXIII /Nº 152/ Enero-Febrero 20. Edición Reed Business Information. Barcelona-España, 2007.*
- [4] CORSINO O. *Química del Ozono, Generación de Ozono y Aplicaciones Industriales. Trailgaz Compagnie Générale de l'Ozone, France, Consulta 8 mayo 2008. Ubicado en: <http://www.ozono.cubaweb.cu/resumenes/quim13.htm>. 2000.*
- [5] DEININGER R., SKADSEN J., SANFORD L. y MYERS A. *Desinfección del agua con ozono*, ISBN. 1983.
- [6] DEMERS, L.D. *Ozone System Energy Optimization Handbook*, AWWA Research Foundation, ISBN 0-9648877-1-1, 1996.
- [7] ELOVITZ V. *Hydroxyl radical/ozone during ozonation processes*, Ozone Sci Eng. 2000.
- [8] FALCON C. *Manual de tratamiento de aguas negras. Publicación del Departamento de Sanidad del Estado de New York. AID. EE.UU, 1997.*
- [9] GEORGE D.B. *Case Studies of Modified Disinfection Practices for Trihalomethane Control*. AWWA Research Foundation, ISBN 0-89867-515-4, 1990.

- [10] GLAZE W., KANG J. *Advance oxidation processes for treating groundwater contaminated with TCE and PCE: laboratory studies*, Water Work Assoc, 1988.
- [11] HOIGNE, J, BADER H. *Rate constants of reactions of ozone with organic and inorganic compounds in water*, Edic. W. Res, 1983.
- [12] JIMENO B. *Análisis de Aguas y Desagües. Ediciones Banco de Libros-Universidad Nacional de Ingeniería*, Segunda Edición, 1988.
- [13] KINMAN y KESSEL. *Experimental Development of the Ozonation in the Elimination of Microorganisms*. Sanitary Engineering Institute of the University of Oklahoma. Prentice-Hall. 4th ed. U.S.A, 1987.
- [14] LINGJI X. *Uso de Ozono para mejorar la seguridad de frutas y vegetales frescos. Mundo Alimentario*. Edición Noviembre-Diciembre, México, Consulta 16 julio 2009, ubicado en:
http://www.alimentariaonline.com/media/ma027_ozono.pdf
- [15] LOPEZ A. *Reutilización de las aguas depuradas en la Provincia de Almería: El caso del aprovechamiento para el regadío agrícola en el bajo Andarax*. Nimbus, Revista de Climatología, Meteorología y Paisaje, N° 7, Editorial Univ. de Almería, Servicio de Publicaciones e Intercambio Científico, 123-124, 2001.
- [16] MALVINO A. *Principios de Electrónica*. Editorial McGraw Hill, España, 2000.
- [17] MASSCHELEIN W. *Ozonation Manual for Water and Wastewater Treatment*. John Wiley & Sons, ISBN 0-471-10198-2, 1982.
- [18] MOLEILO J. *Desarrollo de las Aplicaciones del Ozono en Cuba*. Centro de Investigaciones del Ozono, Cuba, Consulta 8 mayo 2008, ubicado en:
<http://www.ozono.cubaweb.cu/resumenes/quim13.htm>.

- [19] MONJE I., VALENCIA R., YAÑEZ N. *Uso del Ozono en el Tratamiento de Aguas Residuales para la remoción de Vibrio Cholerae, Fenotipo resistente al Cloro*. Instituto de Ingeniería de la UNAM, Consulta 28 agosto 2009, ubicado en:
<http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/mexico26/ii-097.pdf>
- [20] ORTA T., ROJAS V., FRANCO V. *Aprovechamiento de Residuos Selectivos y Aguas Residuales Tratadas para cultivos Urbanos*. Instituto de Ingeniería Sanitaria, UNAM. México, Consulta 20 agosto 2009, ubicado en:
http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/uruguay30/MX05139_Orta_de_Velasquez.pdf
- [21] POZNYAK T., BAUTISTA L. y CORDOVA. *Ozone for the decomposition of organic compounds in landfill Leachate*. Consulta 8 de mayo 2008, ubicado en:
<http://www.ozono.cubaweb.cu/resumenes/quim13.htm>.
- [22] RODRIGUEZ V. *Procesos de Potabilización del Agua e Influencia del Tratamiento de Ozonización*. Editorial Madrid, España, 2003.
- [23] RICE G. *Analytical Aspects of Ozone Treatment of Water and Wastewater*. Lewis Publishers, ISBN 0-87371-064-9, 1986.
- [24] SAAVEDRA D. *Limpian con Ozono aguas residuales*. Reforma, Ciencia. Mexico, Consulta 12 octubre 2009, ubicado en:
<http://www.contactopyme.gob.mx/cpyme/masnoticias.asp?id=2318>
- [25] SMITH G. y BODKIN. *Consideraciones Referentes a la Acción Bactericida del Cloro y el Ozono*. Instituto Oakland de Investigaciones del Agua, Oakland, EE.UU, 1964.
- [26] STAEHELIN J. *Descomposición de ozono in water; rate of initiation by hydroxide ions*. Environ Sci Technol, 1982.
- [27] URNANEJA S. Consulta: 12 agosto 2008, ubicado en:
<http://www.ilustrados.com/publicaciones/epzxe1.php>

- [28] VARGAS F. *Plan de Gestión Ambiental del Aeropuerto Internacional Jorge Chávez*. Impreso por la Corporación Peruana de Aeropuertos y Aviación Civil, Lima-Perú, 2001.
- [29] VON G., ELOVITZ E. *Calibration of full scale ozonation system with conservative and reactive tracer*. Water Supply Res Technol-Aqua, 1999.