UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA

ÁREA DE ENERGÍA, INDUSTRIAS Y RECURSOS NATURALES NO RENOVABLES

INGENIERÍA ELECTROMECÁNICA

"DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO GENERADOR DE OZONO PARA LA POTABILIZACIÓN DE AGUA".

TESIS DE GRADO PREVIA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO ELECTROMECÁNICO.

AUTORES: Wilson Javier Lozano Churo
Jhonny Fernando Soto Flores

DIRECTOR: Ing. Marco Vinicio Rojas Moncayo

LOJA – ECUADOR

2010

CERTIFICACIÓN

Ing. Marco Vinicio Rojas Moncayo.
DOCENTE DEL ÁREA DE LA ENERGÍA, LAS INDUSTRIAS Y LOS RECURSOS NATURALES NO RENOVABLES DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA.

CERTIFICA:

Haber asesorado y revisado durante todo el desarrollo, la tesis titulada: "**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO GENERADOR DE OZONO PARA LA POTABILIZACIÓN DE AGUA",** elaborada por los egresados Wilson Javier Lozano Churo y Jhonny Fernando Soto Flores, previo a la obtención del grado de ingenieros en electromecánica.

En tal virtud cumple con toda la reglamentación y políticas de investigación del área, por lo expuesto autorizo su presentación y posterior sustentación y defensa de la misma.

Loja, 15 de enero del 2010

Ing. Marco Vinicio Rojas Moncayo.
DIRECTOR DE TESIS

DECLARACIÓN DE AUTORÍAS.

Wilson Javier Lozano Churo, y Jhonny Fernando Soto Flores, autores únicos de este trabajo, certifican la propiedad intelectual a favor de la Universidad Nacional de Loja, la cual podrá hacer uso del mismo con fines convenientes.

…..……..	……..…….
Wilson Javier Lozano Ch.	Jhonny Fernando Soto F
Egdo. Ingeniería Electromecánica	Egdo. Ingeniería Electromecánica

AGRADECIMIENTO

Nuestra pública e imperecedera gratitud a la **UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA**, al equipo de profesionales y catedráticos que pertenecen al **ÁREA DE ENERGIA, LAS INDUSTRIAS Y RECURSOS NATURALES NO RENOVABLES** especialmente de la **CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECÁNICA**, donde nos hemos formado intelectualmente y por haber aportado decisivamente con sus invalorables y sabias enseñanzas en nuestra formación académica.

El agradecimiento especial a nuestro Director de Tesis Ing. Marco Vinicio Rojas Moncayo, quien con su asesoramiento y sabios consejos supieron guiar nuestro trabajo de tesis.

Agradecemos de manera especial a nuestros Padres por su apoyo incondicional.

A nuestros amigos y compañeros de la Carrera con quienes compartimos juntos muchos momentos de enseñanza, amistad y compañerismo.

GRACIAS

DEDICATORIA.

Dedico:

El presente trabajo lo dedico de manera especial a Dios, por bendecir cada día mi vida, a mi querida madre, por ser un ejemplo de vida, por estar siempre a mi lado dándome fuerzas y valor para seguir adelante, a mi querida abuelita, a mis queridos tíos, por su apoyo incondicional por permanecer siempre junto a mi apoyándome y ayudándome a cumplir este ansiado sueño, a mis primos, con quienes siempre hemos permanecido juntos, ya sea en momentos buenos y malos, se los agradezco infinitamente.

A todos mis familiares y amigos que me alentaron en todo momento para poder superarme y alcanzar este logro.

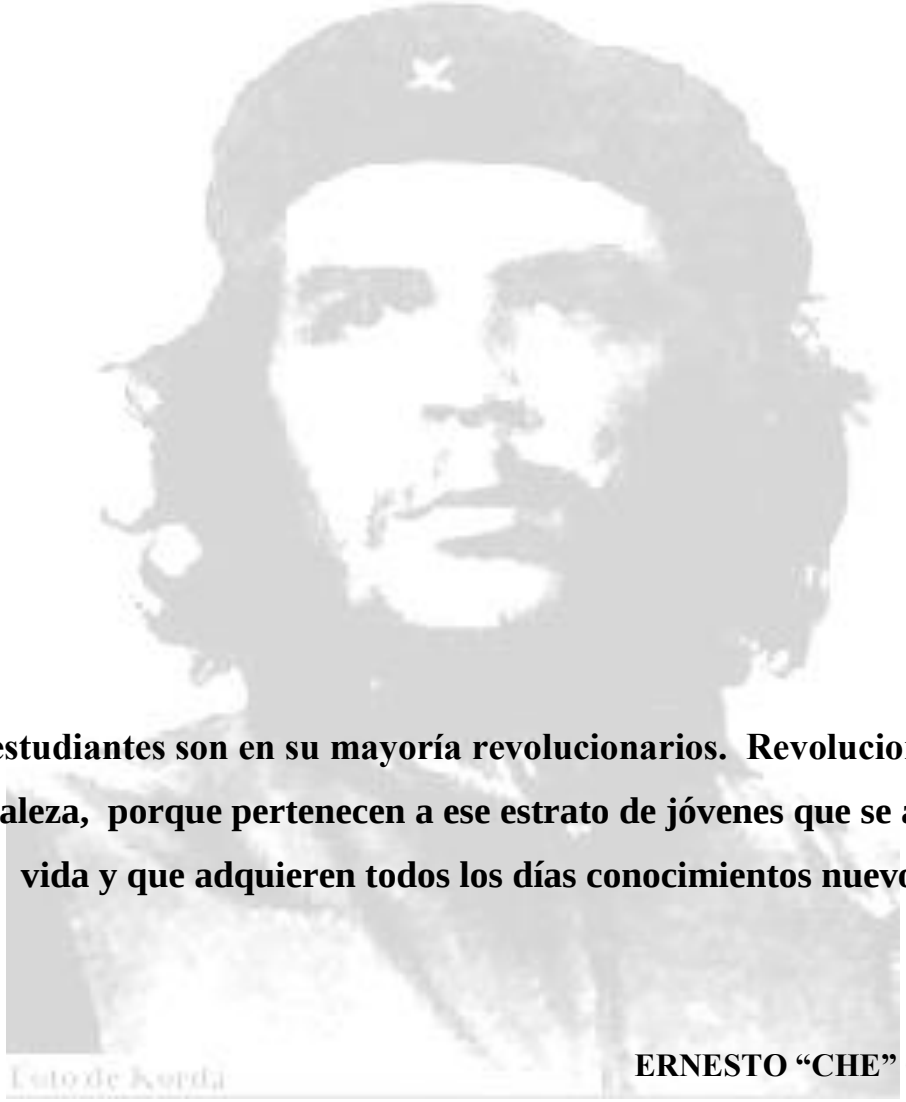
WILSON JAVIER LOZANO CHURO.

Dedico:

La presente investigación a Dios por ser quien me ha permitido saborear la belleza de la vida y enrumbarme por los mejores senderos que me condujeron a la culminación de este mi gran objetivo, también dedico este esfuerzo con todo mi amor a mis padres, mis familiares y amigos por ser ellos la inspiración y motivo para prepararme así como también por darme su cariño paciencia y apoyo incondicional a todos gracias

JHONNY FERNANDO SOTO FLORES.

PENSAMIENTO



“Los estudiantes son en su mayoría revolucionarios. Revolucionarios por naturaleza, porque pertenecen a ese estrato de jóvenes que se abren a la vida y que adquieren todos los días conocimientos nuevos”

ERNESTO “CHE” GUEVARA.

RESUMEN

El presente trabajo muestra los diferentes aspectos relacionados con el diseño de un generador de ozono; tales como, el principio físico, ecuaciones básicas que relacionan variables eléctricas, flujo y presión de aire, densidad de potencia, etc., con el objeto de tener una idea para la construcción de un generador, el cual se utilizará en el tratamiento de agua.

Se analizaron las ventajas y desventajas de la forma geométrica de la celda generadora de ozono, el efecto de la calidad del gas de alimentación sobre la eficiencia del generador.

Se propone una metodología de diseño para una celda generadora de ozono de placas paralelas que cuenta con un sistema de enfriamiento por aire, y su material dieléctrico es la mica.

Se presenta el procedimiento de diseño de la fuente de alimentación y mando para la celda generadora de ozono.

Se presentan las especificaciones técnicas del equipo generador de ozono que se construyó, y la descripción de las partes que lo integran.

Finalmente se presentan las pruebas de desinfección de agua que se realizaron con el equipo generador de ozono, mismas que se realizaron en el laboratorio de la UMAPAL (LOJA).

SUMMARY

The present work shows the different aspects related with the design of a generator of ozone; such as, the physical principle, basic equations that relate electric variables, flow and pressure of air, density of power, etc., in order to having an idea for the construction of a generator, which will be used in the treatment of water.

The advantages and disadvantages in the geometric way of the generating cell of ozone are analyzed, the effect of the quality of the feeding gas about the efficiency of the generator.

He/she intends a design methodology for a parallel generating cell of ozone of badges that has a cooling system for air, and their material insulating it is the mica.

It is presented the procedure of design of the feeding source and control for the generating cell of ozone.

The technical specifications of the generating team of ozone are presented that was built, and the description of the parts that you/they integrate it.

Finally the tests of disinfection of water are presented that they were carried out with the generating team of ozone, same that were carried out in the laboratory of the UMAPAL (LOJA).

INDICE

CERTIFICACIÓN I
DECLARACIÓN DE AUTORÍAS. II
AGRADECIMIENTO III
DEDICATORIA IV
PENSAMIENTO V
RESUMEN VI
INDICE 9
SIMBOLOGÍA 13
ABREVIATURAS 14
INTRODUCCIÓN 15
PROBLEMÁTICA 16
SITUACIÓN PROBLÉMICA 16
PROBLEMA GENERAL DE INVESTIGACIÒN 17
PROBLEMAS ESPECÍFICOS DE LA INVESTIGACIÓN 17
OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN. 18
OBJETIVO GENERAL. 18
OBJETIVOS ESPECÍFICOS. 18
PLANTEAMIENTO DE HIPOTESIS. 19
HIPÓTESIS GENERAL. 19
HIPÓTESIS ESPECÍFICAS. 19
REQUERIMENTOS Y CARACTERISTICAS PARA LA DESINFECCIÓN DE AGUA CON OZONO (O_3). 20
1.1 Generalidades del ozono. 20
1.1.1 Historia del uso del ozono en la desinfección del agua. 20
1.1.3 Características físico químicas del Ozono. 21
1.1.3 Cómo actúa el ozono 22
1.1.4 Métodos de medición de ozono 23
1.1.5 Reglamentaciones de seguridad toxicidad y normativa del ozono. 26
1.1.6 Ventajas y aplicaciones del ozono. 28

1.1.7 Otras aplicaciones 29
1.1.8 Usos del ozono 29
1.2 Aplicaciones del ozono en la potabilización de agua..... 30
1.2.1 Potabilización de agua. 30
1.2.2 Métodos de desinfección de agua. 31
1.2.3 Acción desinfectante del Ozono en el agua 32
1.2.4 Mecanismos de acción del ozono sobre microorganismos. 33
1.2.5 Factores que afectan la efectividad del ozono en la desinfección de agua. 35
1.2.6 Efectos de la temperatura..... 35
1.2.7 Dosificación de ozono para la desinfección de agua. 36
1.2.8 Cinética de consumo. 37
CONSIDERACIONES PRINCIPALES PARA EL CÁLCULO Y DISEÑO DE UN GENERADOR DE OZONO O_3. 38
2.1 Generación de Ozono..... 38
2.1.1 Formas de generar ozono. 39
2.1.2 Generación de ozono por descargas eléctricas. 40
2.1.3 Elementos que forman un generador de ozono. 44
2.1.4 Inyección de ozono al agua..... 47
METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO Y DISEÑO DE UN GENERADOR DE OZONO. 52
3.1 Diseño del equipo generador de ozono..... 52
3.1.1 Consideraciones y parámetros importantes 52
3.1.2 Parámetros de diseño 52
3.2 Metodología para el cálculo..... 53
3.3 Materiales dieléctricos. 53
3.3.1 Caracterización eléctrica de materiales dieléctricos...... 54
3.3.2 Selección del material dieléctrico...... 54
3.4 Diseño de una celda generadora de ozono de placas paralelas. 56
3.4.1 Cálculo de la producción de ozono requerida para desinfección de agua..... 56
3.4.2 Cálculo de potencia que debe consumir una celda generadora de ozono..... 56
3.4.3 Dimensionamiento de una celda generadora de ozono de placas paralelas...... 57
3.5 Diseño de un sistema de enfriamiento por aire para una celda generadora de ozono..... 61

3.6 Fundamentos de la transferencia de calor 61
3.6.1 Transferencia de calor por conducción 62
3.6.2 Transferencia de calor por convección. 63
3.7 Circuito térmico y las leyes que lo rigen. 64
3.7.1 Potencia disipada y temperatura de operación de una celda generadora de ozono ... 65
3.7.2 Cálculo del sistema de enfriamiento de una celda generadora de ozono. 66
3.8 Selección de la frecuencia de operación. 67
MATERIALES Y MÉTODOS. 70
4.1 DISEÑO METODOLÓGICO DEL PROYECTO DE LA INVESTIGACIÓN 70
4.2 MÉTODOS, MATERIALES Y TÉCNICAS DE TRABAJO 71
4.2.1 Métodos 71
4.3 Técnicas de trabajo 72
4.3.1 Técnica de la observación. 72
4.3.2 Técnica de la entrevista. 72
4.4 Instrumentos. 72
4.5 Equipos 73
4.5.1 Técnicos. 73
4.5.2 Tecnológicos 73
4.6 Resumen de cálculos. 74
4.6.1 Resumen el cálculo de las dimensiones físicas de la celda generadora de ozono. 74
4.6.2 Resumen del cálculo del sistema de enfriamiento del caso de estudio. 78
Construcción del prototipo y pruebas de desinfección 81
4.7 Elementos que conforman el generador de ozono. 81
4.7.1 Celda generadora de ozono. 81
4.7.2 Geometría de la celda. 82
4.7.3 Elección de la forma geometría de la celda. 85
4.7.4 Sistema de alimentación de aire. 85
4.7.5 Sistema de enfriamiento 87
4.7.6 Fuente de alimentación. 88
RESULTADOS 91
5.1 Operación del generador de ozono 91

5.2 Características de diseño del generador de ozono..... 94
5.3 Resultados de la experimentación de la acción del ozono en el agua..... 95
5.3.1 Pruebas de ozono residual...... 95
5.3.2 Pruebas de oxidación. 96
DISCUSIÓN 97
CONCLUSIONES 104
RECOMENDACIONES..... 105
ANEXOS 108

SIMBOLOGÍA

ΔT	Diferencia de temperaturas
Δx	Espesor de material
Er	Permitividad relativa del dieléctrico
Φg	Flujo del gas de alimentación a la celda
h	Eficiencia eléctrica de la celda
Ac	Área de contacto
C	Concentración de ozono
d1	Espesor del dieléctrico
d2	Espacio de descargas
Ds	Dosis de ozono
Ef	Eficacia real de la celda generadora de ozono
Ei	Eficacia máxima ideal
f	Frecuencia
h	Coeficiente de transferencia de calor por convección
Kp1	Constante de Paschen 1
Kp2	Constante de Paschen 2
Kt	Constante de conductividad térmica
If	Corriente de fuga
Ig	Corriente que circula por la celda generadora de ozono
P	Potencia
Pd	Producción de ozono deseada
Pg	Potencia consumida por la celda generadora de ozono
Pm	Presión manométrica del gas de alimentación
Ps	Presión absoluta del gas de alimentación
Pt	Potencia demandada
q_c	Flujo de calor transferido
qe	Potencia disipada en el electrodo
qd	Potencia disipada en el electrodo del dieléctrico
qt	Potencia total disipada en calor

Rcond	Resistencia térmica por conducción
Rconv	Resistencia térmica por convección
Rdiel	Resistencia térmica del dieléctrico
Rdis	Resistencia térmica del disipador-ventilador
Relec	Resistencia térmica del electrodo
Rsel	Resistencia térmica por convección forzada dada por el fabricante
Rt	Resistencia térmica
Ta	Temperatura ambiente
Td	Temperatura del espacio de descargas
Tp	Temperatura del sólido
Tm	Tiempo de descargas
T∞	Temperatura de fluido
Vcc	Voltaje de alimentación de CD
Vg	Voltaje aplicado a la celda generadora de ozono

ABREVIATURAS

ADN	Ácido desoxirribonucleico
DBD	Descarga en barrera dieléctrica
EPA	Environmental Protection Agency
IBWA	International Bottled Water Associations
Ph	Potencial de hidrógeno
ppm_v	partes por millón, expresado en volumen
LPM	Litros por minuto
THM	Trihalometanos
UV	ultravioleta.

INTRODUCCIÓN

El agua, es la principal fuente de vida en nuestro planeta y es, a la vez, una de las necesidades básicas de la humanidad; su abastecimiento actualmente, constituye uno de los problemas que afrontan las sociedades.

Hoy en día, estas necesidades no son suficientemente atendidas por tecnologías apropiadas, pues resultan incompatibles con los recursos del medio rural, son costosas, su aprovisionamiento es difícil en regiones alejadas de las ciudades y de las vías de comunicación. Por ello resulta relevante investigar sobre las posibilidades de tratamiento, más económica, con tecnología apropiada para este medio y aplicable en países en vías de desarrollo como el Ecuador.

El presente trabajo propone el uso de un generador de ozono, como solución al problema de la falta de nuevas alternativas en la potabilización de agua; y plantea que este sistema de tratamiento de agua constituya una alternativa más competitiva, en términos técnicos y económicos, frente a los sistemas aplicados en la actualidad.

Esta propuesta concibe la construcción de un generador de ozono para el tratamiento de agua con materiales y procesos locales, de funcionamiento sencillo y mantenimiento simple, de tecnología accesible y económica; y que principalmente resulte compatible con el medio ambiente preservando el equilibrio ecológico del lugar.

El objetivo del presente trabajo será el diseño y construcción de un prototipo generador de ozono para la potabilización de agua.

PROBLEMÁTICA

SITUACIÓN PROBLÉMICA

Un prototipo es un modelo o versión inicial de un producto, previsto para probar y desarrollar el diseño. Antes de invertir en el equipo necesario para fabricar en serie un producto, se debe estar convencido de que el diseño es seguro y fiable.

Los prototipos pueden ser muy sencillos, con sólo unos pocos componentes. A medida que el diseño avanza, los prototipos se hacen más complicados. Al aumentar gradualmente la complejidad del prototipo se pueden identificar y corregir posibles problemas del diseño.

El papel fundamental de un prototipo es reducir el riesgo de errores de diseño. Con los prototipos, se puede adquirir confianza en los diseños y justificar la inversión necesaria para su producción en serie.

El OZONO es un componente natural del aire limpio y seco, como también lo es el nitrógeno, oxigeno, argón, etc. Principalmente está formado por la unión de tres átomos de oxigeno (O_3), es generado por la exposición a una fuente alta de energía, del aire u otro gas conteniendo oxígeno normal (O_2), esta fuente puede ser en los equipos comerciales puede ser una descarga eléctrica a alto voltaje o una radiación ultravioleta.
Su presencia en el aire es casi simbólica pero resulta imprescindible para la vida en la tierra, en los espacios naturales, bosques, montañas prados, etc., se encuentra con mayor cantidad que en las ciudades o grandes aglomeraciones urbanas, en las que llega a desaparecer totalmente al no haber nuevo aporte de OZONO y aumentar progresivamente la contaminación.

PROBLEMA GENERAL DE INVESTIGACIÒN

"FALTA DE APLICACIÓN DE NUEVAS ALTERNATIVAS DE POTABILIZACIÓN DE AGUA, A TRAVÉS DE UN GENERADOR DE OZONO".

PROBLEMAS ESPECÍFICOS DE LA INVESTIGACIÓN

- Existe escasa información sobre nuevos sistemas de potabilización de agua mediante la utilización de ozono.
- Inexistencia de un generador de ozono de fabricación local.
- Falta de experiencia en los factores químicos que intervienen en la purificación de agua con ozono.
- Limitadas difusiones de los resultados de investigación acerca de la aplicación del ozono en la purificación del agua.

OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.

OBJETIVO GENERAL.

- ✓ Construcción de un prototipo generador de ozono para la potabilización del agua.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Sistematizar información que permita conocer las características y requerimientos para la construcción de un prototipo generador de ozono.
- Diseñar y construir un prototipo generador de ozono.
- Realizar pruebas y análisis para verificar el adecuado funcionamiento del prototipo generador de ozono.
- Socializar los resultados obtenidos en nuestra investigación.

PLANTEAMIENTO DE HIPOTESIS.

HIPÓTESIS GENERAL.

La construcción de un prototipo generador de ozono para la potabilización del agua admitirá estudiar detalladamente el proceso mediante el cual se produce el ozono"

HIPÓTESIS ESPECÍFICAS.

- Con mayor información acerca de los ozonizadores tendremos una visión más amplia sobre la obtención de ozono.

- Mediante el diseño y construcción de un prototipo generador de ozono se podrá determinar las diferentes especificaciones técnicas, de tal manera que garantice el rendimiento optimo del mismo

- Realizando las prácticas y monitoreo correspondiente lograremos obtener los resultados esperados y así poder socializar con datos reales.

- Dando a conocer los resultados obtenidos en nuestra investigación podemos determinar que el uso del ozono es más eficiente que los procesos empleados actualmente en la potabilización del agua.

CAPITULO I

REQUERIMENTOS Y CARACTERISTICAS PARA LA DESINFECCIÓN DE AGUA CON OZONO (O_3).

1.1 Generalidades del ozono.

1.1.1 Historia del uso del ozono en la desinfección del agua.

Por primera vez, en el año 1787, al científico holandés ARTINUS VAN MARUN (1750-1837) mientras provocaba descargas eléctricas de oxígeno, se le desprendió un intenso y característico olor que no puedo identificar. Fue el primer inicio de la experiencia del ozono. Más de medio siglo después en 1839, el químico alemán CHRISTIAN FRIEDRICH SCHONBEIN (1799-1868) descubre un gas, al que, por su intenso olor, da el nombre de ozono, que estaba formado por tres átomos de oxígeno O_3,ozono, en contraposición con la molécula de oxígeno del aire que únicamente tiene 2 átomos 0_2. En Mayo de 1929, CHARLES FABRI (1867-1945) convoca en París a todos los científicos investigadores del ozono, la reunión se conoce como Primera conferencia Internacional de Ozono. No obstante, el primer aparato industrial fue bajo la fabricación y supervisión de SIEMENS. A partir de entonces, los industriales aplicaron la tecnología moderna en perfeccionar esta carrera hacia la novedad de tantísimas aplicaciones en diferentes campos que puede cubrir el ozono. Aplicaron todo potencial en la perfección del útil ozonizador por mediación de lámparas de efluvios (Energía Fotoquímica).

Frente a otros sistemas de proyectos millonarios, de altas intensidades de energía eléctrica y grandes producciones de ozono aplicadas industrialmente; en este sistema es del todo imprescindible partir solamente de oxígeno inyectado al generador de ozono, o bien de costosas instalaciones para destruir el 78% de nitrógeno, que contiene el aire atmosférico inyectando solamente el 21% de oxígeno restante al aparato ozonizador, consiguiendo de nuevo lo mismo que a las lámparas de efluvios generadoras de ozono con el 100% de pureza. (B, 1991)

1.1.3 Características físico químicas del Ozono.

El ozono es una molécula formada por tres átomos de oxígeno (O_3), con una carga eléctrica negativa. La molécula de ozono es muy inestable y tiene una corta vida media. Por lo tanto, decaerá después de un tiempo a su forma original: oxígeno.

En su esencia el ozono no es más que oxígeno diatómico (O_2), con un átomo extra de oxígeno formado por una alta carga eléctrica. En la naturaleza el ozono se produce por algunas reacciones químicas. El ejemplo más conocido es por supuesto la capa de ozono, donde el ozono es producido por los rayos ultravioleta (UV) del sol. Pero el ozono también se produce durante las tormentas eléctricas y en las cascadas de agua. Los extremadamente altos voltajes alcanzados en las tormentas eléctricas producen ozono a partir de oxígenos. Ese olor especial de "frescor, limpieza, lluvia reciente" es resultado del ozono producido de forma natural.

La palabra ozono deriva del vocablo griego ***ozein***, que significa oler.

El ozono es solamente producido bajo circunstancias extremas. Éste también puede ser creado por generadores de ozono. Los generadores de ozono producen ozono con altos voltajes extremos o con luz UV. (Association, 1998, págs. 254 - 270)

Las propiedades del ozono son las siguientes:

- Peso molecular (PM).....48
- Temperatura de condensación.....- 112 º C
- Temperatura de fusión..... -192,5 º C
- Presión Crítica..... 54 átm.
- Densidad..... 1,32
- Densidad (líquido a -182 º C)..... 1.572 gr/cm 3
- Peso del litro de gas (a 0º y 1 átm.)..... 1,144 gr.

En condiciones normales de presión y temperatura, el OZONO es inestable; aumentando dicha inestabilidad por aumento de temperatura y humedad llegando a ser total por encima de los 200º C.

Su grado de mayor estabilidad lo alcanza a los -50º C y presión igual a 38 mm Hg, es decir, una venteaba parte de la presión atmosférica.

A temperatura ambiente, ataca lentamente a los compuestos orgánicos saturados aumentando dicho ataque a temperaturas de 78º C e incluso inferiores.

Frente a los compuestos orgánicos no saturados, forma ozónidos, compuestos muy inestables y que dan lugar a aldehídos, acetonas, ácidos carboxílicos, etc.

Después de lo anteriormente expuesto, podemos decir que EL OZONO es:

- Después del flúor, el compuesto más oxidante, debido a su facilidad para captar electrones.
- De fácil descomposición.
- En estado gaseoso es ligeramente azul, azul oscuro en fase líquida y rojo oscuro en fase sólida.
- Presenta estructura molecular típicamente angular entre los tres átomos de oxígeno que componen su molécula.
- En igualdad de condiciones, además, es más estable en el agua que en el aire.

1.1.3 Cómo actúa el ozono

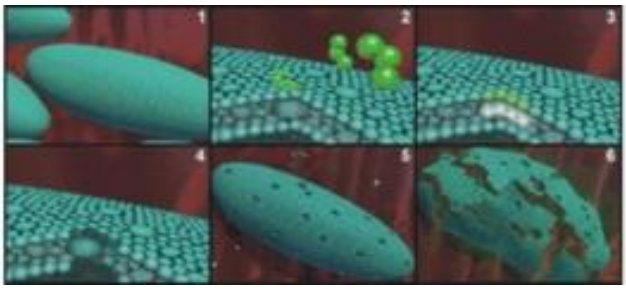


Figura 1.1 destrucción de bacterias con ozono

El ozono actúa de acuerdo con el principio de oxidación. Cuando la molécula de ozono (O3) cargada electrostáticamente se pone en contacto con algo oxidable, la carga de la molécula de ozono fluirá directamente hacia allí. Esto ocurre porque el ozono es muy inestable y tiende a volver a su forma original (O_2). El ozono puede oxidar todo tipo de materiales, pero también olor y microorganismos como virus, mohos y bacterias. El átomo extra de oxígeno se desprende de la molécula de ozono y se enlaza con el otro material. Finalmente permanece solamente la molécula de oxígeno pura y estable.

El ozono es uno de los agentes oxidantes más fuertes disponibles técnicamente para la oxidación de solutos. El átomo extra de oxígeno se acoplará (= oxidación) en menos de un segundo a cualquier componente que se ponga en contacto con el ozono.

El ozono puede ser usado para una amplia gama de purificación. La mayor parte del ozono es aplicado en las plantas de tratamiento de aguas residuales municipales y de agua potable (para desinfección). Sin embargo el ozono se usa cada vez más en la rama industrial. En la industria de la alimentación, por ejemplo, el ozono se usa para desinfección y en la industria del papel y textil se usa para la oxidación del agua residual. El principal beneficio del ozono es su carácter limpio, porque sólo oxida materiales, casi sin formar subproductos. Debido a que el ozono tiene un fuerte olor reconocible, se perciben pronto concentraciones muy bajas. Esto hace que trabajar con ozono sea generalmente seguro.

1.1.4 Métodos de medición de ozono

La medición de ozono consiste en determinar la concentración (mg/l o g/m^3) a la que se encuentra diluido en un gas o en un líquido. A la concentración de ozono disuelta en un líquido después de un proceso de ozonificación se le conoce como ozono residual. Existen varias técnicas de medición de concentración de ozono, tanto para fase gaseosa como para fase líquida. A continuación se presentan algunas de ellas. (Gottchalk C, 2002)

1.1.4.1Método Yodométrico.

Este método se usa para medir concentraciones de ozono en fase gas o en fase líquida. Para la medición de la concentración de ozono en fase gas primero se hace burbujear un volumen conocido de un gas con ozono dentro de una solución de ioduro de potasio KI. Para realizar la medición del ozono residual en fase líquida, simplemente se mezcla una muestra del líquido a medir con la solución de KI. La reacción producirá yodo (1.1), el cual debe ser titulado inmediatamente con tiosulfato de sodio $Na_2S_2O_3$ a un color amarillo pálido. La concentración de ozono puede ser calculada por el consumo de tiosulfato de sodio (Javier, 2003).

$$KI + O_3 + H_2O \rightarrow I_2 + O_2 + KOH \qquad (1.1)$$

$$3I_2 + 6S_2O_3^{2} \rightarrow 6I + 3S_4O_6^{2} \qquad (1.2)$$

1.1.4.2 Absorción de luz UV

El método de absorción de luz UV también conocido como método de fotometría UV, puede ser utilizado para medir la concentración de ozono en un gas o líquido. Esta técnica consiste en medir la atenuación de un haz de luz UV con longitud de onda de 254 nanómetros (1nm = 10^{-9}m) en una celda de absorción, la cual contiene una muestra del gas o líquido que se desea medir. La atenuación del haz de luz es determinada mediante la comparación de la señal proveniente del sensor de muestra y la proveniente del sensor de referencia.

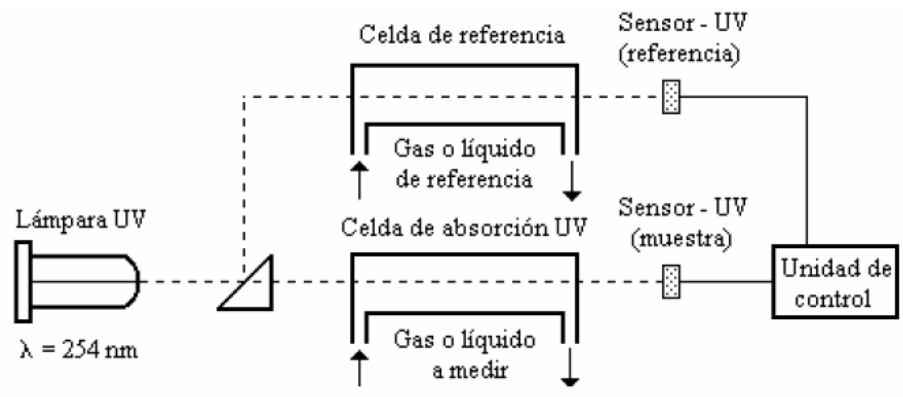


Figura 1.2 Diagrama de un monitor de ozono por absorción de luz UV

El método de absorción de luz UV presenta interferencias positivas con cualquier contaminante contenido en la muestra que absorba luz a 254 nanómetros. Dentro de estos compuestos se encuentran los hidrocarburos aromáticos, el vapor de mercurio y el dióxido de azufre. Con esta técnica se pueden medir concentraciones hasta de 600 g/m^3 de ozono en fase gas y hasta 150 g/m^3 de ozono residual en el agua.

1.1.4.3 Método amperométrico.

El método amperométrico tiene la posibilidad de ser empleado para mediciones continuas y automatizadas de ozono residual en el agua. El electrodo de membrana para medición de ozono residual está compuesto de un cátodo de oro, un ánodo de plata, un electrolito (AgBr, K_2SO_4 o KBr) y una membrana de Teflón. Varias compañías ofrecen tales electrodos en diferentes configuraciones. Los rangos de aplicación y la exactitud varían dependiendo del tipo de electrodo empleado. La operación de este tipo de dispositivos puede resumirse de la siguiente manera: El ozono disuelto en agua atraviesa la membrana y el electrolito hasta colocarse en la superficie del cátodo. Al aplicarle una diferencia de potencial eléctrico a las terminales del cátodo y ánodo, el ánodo liberará electrones al electrolito, dichos electrones atravesarán el electrolito hasta el cátodo en donde al encontrar una molécula de ozono la reducirán a oxígeno. El resultado es una conducción de corriente eléctrica la cual será proporcional a la concentración del ozono disuelto en el agua.

1.1.4.4 Colorimetría.

A continuación se presenta la descripción de los métodos colorométricos empleados en este trabajo de investigación.

- **N´N-Dietil-p-fenilendiamina (DPD)**

Consiste en hacer reaccionar la muestra de agua ozonificada con el compuesto N´N-Dietil-p-fenilendiamina (DPD). Al reaccionar el DPD con el ozono contenido en la muestra de agua, el agua tomará una coloración rosa. La tonalidad adquirida será proporcional a la concentración de ozono residual en la muestra. La muestra debe ser comparada contra una escala de ozono residual, que está graduada a distintas tonalidades de rosa.

- **Índigo carmín**

El índigo carmín ($C_{16}H_8N_2Na_2O_8S_2$) es un colorante ampliamente usado. El método de medición consiste en titular la muestra del agua ozonificada con una solución de índigo carmín hasta que el agua tome la coloración azul de la solución. El agua tomará color azul hasta que todo el ozono contenido en el agua sea consumido al oxidar el colorante, es decir, la concentración de ozono será proporcional a la cantidad de índigo carmín oxidado.

Según el manual de procedimientos, la solución de índigo carmín se prepara agregando 1.6 gramos de índigo carmín a 400 ml de agua destilada, se mezcla y se filtra. La solución preparada debe mantenerse en refrigeración. Cada 0.05 mililitros de esta solución que sea oxidada por el ozono contenido en 200 ml de muestra de agua ozonificada, equivaldrá a 0.06 mg/l de concentración de ozono residual.

1.1.5 Reglamentaciones de seguridad toxicidad y normativa del ozono.

El tratamiento con ozono es aceptable para el medioambiente. ***Elimina la necesidad de manipular, almacenar, mantener registros y desechar sustancias químicas tóxicas contempladas en las reglamentaciones gubernamentales cada vez más rigurosas*.** El uso del ozono se encuentra ampliamente difundido y está aprobado:

- El ozono se utiliza desde hace casi un siglo en Europa
- La FDA aprobó el uso del ozono para el agua embotellada en 1982
- La Agencia de Protección Ambiental (Environmental Protection Agency, EPA) permite el uso del ozono sin exigir informes ni registros
- La FDA aprobó la solicitud de su uso en frutas, verduras, carnes rojas, carnes de ave, etc. en junio de 2001 (solicitud de uso como aditivo alimentario)
- El Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (United States Department of Agriculture, USDA) aprobó el ozono como sustancia orgánica en virtud de la Norma sobre Sustancias Orgánicas (Organic Rule) del USDA en 2000.
- El ozono es una sustancia que se autorregula y que tiene un característico olor a limpio

- Los niveles de ozono efectivos son seguros, ya que se encuentran por debajo de los límites establecidos por la Administración de Seguridad y Salud Ocupacional (Occupational Safety and Health Administration, OSHA)

El ozono es un gas altamente tóxico y oxidante. El conocimiento acerca de los efectos que produce en el ser humano y la normatividad relacionada con los niveles máximos permitidos se presentan a continuación.

1.1.5.1 Inhalación.

Efectos agudos: La exposición al ozono en periodos cortos de tiempo a concentraciones superiores a unas décimas de ppm_v provoca dolor de cabeza, sequedad en la garganta, irritación de membranas mucosas y nariz. La exposición a altas concentraciones puede provocar edemas pulmonares, lasitud, dolor de cabeza frontal, sensación de enrarecimiento del aire, constricción u opresión, acidez en la boca y anorexia. En exposiciones más severas puede causar tos, sensación de sofocación, taquicardia, vértigo, presión sanguínea baja, severos calambres en el pecho y dolor de cuerpo. Se estima que 50 ppm_v por 30 minutos podría ser fatal.

Exposiciones prolongadas: Los síntomas a exposiciones prolongadas son similares a las exposiciones agudas con el decremento en la función pulmonar dependiendo de la concentración de ozono y la duración de la exposición. También se pueden observar la aparición de asma, alergias y otros desórdenes respiratorios. Algunas tumoraciones y daño genético directo o indirecto han sido encontrados en tejidos animales y/o humanos estudiados.

1.1.5.2 Cancerigenidad:

El ozono se encuentra bajo sospecha de tener potencial cancerígeno (clasificada dentro del grupo B).

1.1.5.3 Contacto con la piel y ojos

El contacto del ozono con la piel puede causar irritación y quemaduras. En concentraciones por encima de 0.1 ppm_v el ozono puede causar irritación de los ojos.

1.1.5.4 Límites permitidos

Son recomendados para áreas de trabajo los siguientes niveles máximos de ozono en el ambiente.

- 0.05 ppm_v trabajo pesado.
- 0.08 ppm_v trabajo moderado.
- 0.10 ppm_v trabajo ligero.

Sin embargo, si el trabajo se desempeña en periodos menores a 2 horas (para trabajos pesado, moderado y ligero) se permiten concentraciones de hasta 0.2 ppm_v.

La norma mexicana NOM-020-SSA1-1994 [SSA05], establece que no se debe rebasar el límite máximo normado de 0.11 ppm_v, en una hora, una vez al año, en periodos de tres años.

1.1.6 Ventajas y aplicaciones del ozono.

- La producción in situ elimina los inconvenientes propios del transporte
- Su explotación es sencilla y resulta muy fiable
- Con este sistema los costes de mantenimiento son mínimos
- No genera subproductos nocivos ni cancerígenos
- Es un oxidante muy eficaz
- No deja residuos
- No se generan sustancias químicas peligrosas

1.1.7 Otras aplicaciones

El ozono además de emplearse para desinfección de agua es ampliamente usado en los siguientes sectores.

- Medicina (ozonoterapia y desinfección de instrumental)
- Odontología
- Industria alimenticia
- Desinfección y deodorización de ambientes
- Industria del papel
- Sector agropecuario
- Industria química

1.1.8 Usos del ozono

- Desinfección de Albercas, Gimnasios, Clubes, Spas.
- Desinfección de Tuberías Industriales, Tanques, Cisternas.
- Laboratorios e Industria Farmacéutica.
- Restaurantes Hoteles, Lavado de Frutas, Legumbres y Vegetales
- Añejamiento de Vinos y Licores
- Plantas Purificadoras de Agua, Plantas Potabilizadoras.
- Tratamiento de Torres de Enfriamiento.
- Decoloración de Efluentes Textiles.
- Tratamiento de Aguas Negras y Grises.
- Eliminación de DQO.

1.2 Aplicaciones del ozono en la potabilización de agua.

1.2.1 Potabilización de agua.

La potabilización o purificación de agua puede ser definida como el conjunto de operaciones y procesos, físicos y/o químicos que se aplican al agua a fin de mejorar su calidad y hacerla apta para uso y consumo humano. El procedimiento típico de potabilización de agua se muestra en la figura 1.3. (Mexico, 1995)

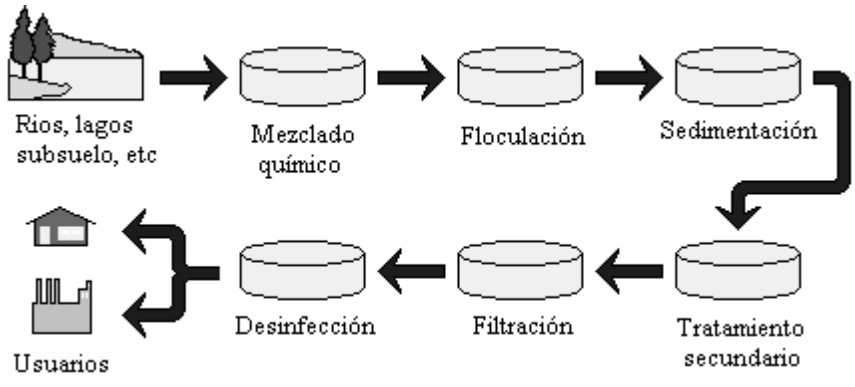


Figura 1.3 proceso de potabilización de agua

El agua es tomada de una fuente que puede ser de ríos, lagos o del subsuelo. A continuación se bombea a un primer tanque donde se le agregan *sustancias químicas* para quitarle impurezas, eliminar virus y bacterias dañinas, eliminar sabores y olores. Algunas de las sustancias químicas aplicadas al agua son: cal, sulfato férrico, cloraminas, carbón activado en polvo, ozono, dióxido de carbono y fluoruro. Después, el agua con sustancias químicas es trasladada a un tanque de *floculación*, donde el agua recibe un movimiento lento y constante a fin de mantener las sustancias químicas en suspensión para que estas actúen efectivamente. La función de las sustancias químicas es provocar que las partículas diminutas contenidas en el agua se agrupen y crezcan de tamaño, hasta que son lo suficientemente grandes y pesadas para hundirse. A continuación, el agua entra a un tanque de sedimentación donde el flujo es tan lento que permite que las partículas agrupadas en el procedimiento anterior, el cieno y otras sustancias suspendidas lleguen al fondo separándose del agua.

El agua recuperada de la etapa anterior pasa por un proceso llamado *tratamiento secundario* en donde se repite el ciclo anterior, es decir, mezclado químico, floculación y sedimentación final. Hasta este momento, la mayoría de las sustancias químicas añadidas al agua ya se han sedimentado y separado del agua, llevándose con ellas las impurezas que originalmente tenía el agua sin tratar.

El siguiente paso en la purificación de agua es la *filtración*, que consiste en hacer pasar el agua a través de lechos constituidos de antracita, arena y grava. Al escurrir el agua a través de ellos, todas las restantes partículas suspendidas en agua quedan atrapadas en los filtros, los cuales también sirven para removerlas.

El último paso en la purificación del agua es la *desinfección*, donde las bacterias son eliminadas. Existen varios métodos de desinfección de agua, entre los que podemos mencionar la cloración, ozonificación, radiación de luz ultravioleta, ósmosis inversa, entre otros. El método abordado en esta tesis es el de ozonificación. (Javier, 2003)

1.2.2 Métodos de desinfección de agua.

1.2.2.1 Cloración.

Consiste en el uso del cloro o algunos de sus compuestos como desinfectante. La cloración es el método de desinfección más popular alrededor del mundo debido a su bajo costo y su efecto residual. Las desventajas principales de este método es que deja un olor y sabor desagradable en el agua. Por otro lado, el cloro puede formar trihalometanos (THM) que tienen carácter cancerígeno. Sin embargo, existen técnicas para reducir los niveles de THM contenidos en el agua, estas técnicas consisten en eliminar los agentes precursores de estas sustancias antes de la cloración.

1.2.2.2 Ozonización.

El ozono es reconocido por su capacidad oxidante y germicida. El ozono elimina un espectro más grande de microorganismos que el cloro. A diferencia de la cloración la ozonificación elimina olores y sabores desagradables del agua. Su efecto residual es de

corto tiempo. La tecnología de generación de ozono es costosa, por lo que no se ha popularizado. Sin embargo, en algunos países europeos ha sido ampliamente usado.

1.2.2.3 Radiación de luz ultravioleta.

Este procedimiento consiste en someter al agua a radiación de luz ultravioleta alrededor de los 246 nanómetros. La máxima eficiencia germicida se encuentra en los 265 nm. La luz ultravioleta es aplicada empleando una lámpara de vapor de mercurio. La radiación con luz UV es un método más costoso que la cloración. El método no añade sustancias químicas al agua y por lo mismo es un método que carece de efecto residual. No altera el olor ni el sabor del agua. Se emplea en aplicaciones a pequeña escala. La radiación UV provoca algunas lesiones en el ADN de los microorganismos, impidiendo su reproducción. De esta forma son incapaces de producir daño al consumirlos.

1.2.2.4 Osmosis inversa.

El proceso de ósmosis inversa consiste en el uso de una membrana semipermeable para separar y eliminar sólidos disueltos, productos orgánicos, pirógenos, materia coloidal sub-microscópica, virus y bacterias del agua. El proceso es llamado de ósmosis inversa ya que se requiere de una presión para forzar que el agua pura pase a través de la membrana, dejando las impurezas detrás. (unitek.com)

1.2.3 Acción desinfectante del Ozono en el agua

1.2.3.1 Ventajas del uso del Ozono en el tratamiento de aguas.

La ozonización elimina el color causado por el hierro, manganeso o la materia carbonosa y los sabores y olores debido a la presencia de materia orgánica. Se produce una floculación.

El Ozono elimina la turbiedad, el contenido de sólidos en suspensión y las demandas químicas y biológicas de oxígeno. Además puede eliminar detergentes y otras sustancias tenso-activas. El grado de eliminación dependerá de la cantidad de Ozono utilizada.

El Ozono (O_3) es un poderoso desinfectante. No sólo mata las bacterias patógenas sino que además inactiva a los virus y otros microorganismos que no son sensibles a la desinfección

ordinaria con cloro. En definitiva, podemos afirmar que el Ozono (O3-oxígeno compuesto por tres átomos) realiza las siguientes funciones en el agua. La ozonización es más barata que la súper cloración seguida de una decloración y del mismo costo que la coloración ordinaria. Si no existe posterior recontaminación, el Ozono residual es suficiente para efectuar una desinfección común. Además el Ozono, no produce en el agua aumento en el contenido de sales inorgánicas ni subproductos.

1.2.3.2 Eliminación de turbidez.

La turbidez del agua se elimina por ozonización a través de una combinación de oxidación química y neutralización de carga. Las partículas coloidales que causan turbidez son mantenidas en suspensión por partículas de carga negativas que son neutralizadas por el ozono. El ozono además destruye los materiales coloidales por medio de la oxidación de materias orgánicas.

1.2.3.3 Eliminación de olores colores y sabores.

La oxidación de la materia orgánica, metales pesados, sulfuros y sustancias extrañas, produce la supresión de sabores y olores extraños que el agua pudiera contener, proporcionando una mejora en la calidad y el aspecto del agua, haciéndola más adecuada para su consumo y disfrute.

1.2.4 Mecanismos de acción del ozono sobre microorganismos.

1.2.4.1 Efectos sobre bacterias

La inactivación de bacterias con ozono es considerada como una reacción de oxidación. La membrana de la bacteria es el primer lugar de ataque de ozono, las vías de acceso pueden ser dos, por el camino de las glicoproteínas o glicolípidos, o a través de los aminoácidos. El ozono también rompe la actividad enzimática de la bacteria al actuar sobre los grupos de sulfhídrilos en ciertas enzimas. En este momento la bacteria pierde su capacidad de degradar azúcares y producir gases. El deshidrogenado de fosfato-6 de glucosa es afectado

del mismo modo que el sistema enzimático. La muerte de la bacteria puede ser debido a los cambios en la permeabilidad celular, posiblemente seguido de una lisis celular.

1.2.4.2 Efectos sobre virus

Los virus son microorganismos acelulares, compuestos solamente de ácido nucleico y una proteína que lo encierra llamada cápside. Los virus son organismos parásitos que solo pueden reproducirse dentro de una célula huésped. El primer objetivo del ataque del ozono sobre el virus es la ruptura del cápside. Si las concentraciones de ozono son altas el cápside será destruido totalmente. De esta forma el ácido nucleico es liberado dejándolo desprotegido del ozono, quien lo acabará de eliminar.

1.2.4.3 Efectos sobre otros organismos

Existen reportes de que el ozono tiene capacidad de inactivar a las esporas bajo condiciones de esterilización clínica. Sin embargo, no se reporta exactamente el mecanismo de actuación sobre ellas

1.2.4.4 Microorganismos patógenos que elimina el Ozono.

El ozono elimina un espectro grande de microorganismos patógenos, algunos de los cuales son presentados en la tabla. (aplications, 2004)

Tabla 1.1 Algunos microorganismos patógenos que el ozono elimina.

Aspergillus Niger	Coxsackie Virus A9	Influenza Virus	Salmonella typhimurium
Bacillus Bacteria	Diphteria Pathogen	Legionella pneumophila	Schistosoma Bacteria
Bacillus Anthracis	Eberth Bacillus	Mucor piriformis	Staph epidermidis
Bacillus cereus	Enterovirus virus	Mycobacterium foruitum	Staphylococci
Bacillus subtilis	Escherichia Coli B.	Penicillium Bacteria	Stomatitis Virus
Botrytis cinerea	Encephalomyocarditis	Phytophothora parasitica	Streptococcus Bacteria
Candida Bacteria	Endamoebic Cysts B.	Poliomyelitis Virus	Verticillium dahliae
Clavibacter michiganese	Fusarium oxysporum	Proteus Bacteria	Versicular Virus
Cladosporium	Hepatitis A virus	Pseudomonas Bacteria	Virbrio Cholera Bacteria
Clostridium Bacteria	Herpes Virus	Rhabdovirus virus	Vicia Faba progeny

1.2.5 Factores que afectan la efectividad del ozono en la desinfección de agua.

1.2.6 Efectos de la temperatura

El índice de destrucción de microorganismos crece con incrementos en la temperatura. De acuerdo con la teoría de Van´t Hoff-Arrhenius, la temperatura determina el índice al cual el desinfectante se difunde a través de la superficie del microorganismo y su índice de reacción con el sustrato. Se dice que un incremento de 10 ºC en la temperatura incrementa el índice de reacción en un factor de 2 o 3. Esta es la razón por la cual en aguas cálidas se puede lograr el mismo efecto de desinfección que en aguas frías con concentraciones de ozono residual menores.

1.2.6.1 Efectos del pH

El impacto del pH sobre la acción bactericida o virucida es considerado pequeño en rangos de pH de 5.8 a 8. Los cambios en la eficiencia de desinfección debido al pH son provocados por cambios en el índice de destrucción de ozono. Sin embargo, algunos estudios han demostrado que para diferentes valores de pH, a valores constantes de concentración de ozono residual, el grado de inactivación de bacterias prácticamente no sufre cambios.

1.2.6.2 Efectos de la turbiedad

Los microorganismos normalmente no están en estado libre en el agua, generalmente están adheridos a la superficie de minerales o materia orgánica. Las sustancias o minerales inoxidables prácticamente no reducen la eficiencia de desinfección del ozono. Sin embargo, los materiales orgánicos u oxidables consumen grandes cantidades de ozono limitando su acción sobre los microorganismos. Los virus asociados con células o fragmentos de ellas son protegidos del efecto del ozono. Lo recomendable en estos casos es mejorar la calidad del agua antes de desinfectarla, en términos de turbidez y materia orgánica disuelta para lograr una óptima desinfección.

1.2.7 Dosificación de ozono para la desinfección de agua.

La dosis de desinfectante aplicado al agua está relacionado con un factor llamado **"CT"** que es resultado de la multiplicación de la concentración residual del desinfectante en el agua (mg/l) por el tiempo de contacto (minutos). La práctica europea tiene contemplada la aplicación de 0.4 mg/l con un tiempo de contacto de 4 minutos, es decir, un CT = 1.6.

Sin embargo, la EPA (Environmental Protection Agency) en EE.UU, señala que un CT = 0.72 aplicados al agua a 20ºC es suficiente para desactivar 99.9 % de los quistes de *Giardia lamblia* (parásitos transmitidos por el agua muy difíciles de matar) y el 99.9% de virus entérico. La diferencia entre la práctica europea de desinfección y la americana depende principalmente de la temperatura del agua.

En la tabla 1.2 se muestran los CT recomendados por la EPA para distintas temperaturas de agua. (Carlos, 2002)

Tabla 1.2 Factor de CT requerido para desinfectar con ozono a distintas temperaturas de agua.

Temperatura del agua ºC	**CT**
<1	2.9
5	1.9
10	1.4
15	0.95
20	0.72
>25	0.48

La IBWA (International Bottled Water Asociations) recomienda una dosis de **1 a 2mg** de ozono por litro de agua aplicados en un tiempo entre 4 y 10 minutos, manteniendo un título de ozono residual de 0.1 a 0.4 mg/l por un tiempo de contacto de 4 a 10 minutos.

1.2.8 Cinética de consumo.

La cinética de consumo de ozono en el agua permite estimar la cantidad de ozono que se debe aplicar al agua para conseguir una cierta concentración de ozono residual. La cinética de consumo de ozono en el agua es un parámetro que depende de múltiples factores. Por ejemplo, las pérdidas de ozono por oxidación de materia orgánica contenida en el agua, la técnica de aplicación del ozono, la temperatura y el pH del agua, la presión parcial del gas sobre el líquido (ley de Henry), la difusión del ozono en el agua (ley de Fick), entre otros. Todos estos factores hacen imposible un cálculo de solubilidad. Bataller et al. recomiendan encontrar la cinética de consumo de ozono mediante la experimentación de cada caso en particular.

Generalmente una dosis de 1 a 2 mg de ozono por litro de agua aplicado de 4 a 10 minutos producirá el residual de 0.1 a 0.4 mg/l necesarios para la desinfección de agua.

CAPITULO 2

CONSIDERACIONES PRINCIPALES PARA EL CÁLCULO Y DISEÑO DE UN GENERADOR DE OZONO O_3.

2.1 Generación de Ozono.

La formación de ozono resulta de la excitación de moléculas de oxígeno que se separan en átomos de oxígeno sencillos y que luego se recombinan para formar moléculas de tres átomos de oxígeno: O_3. El ozono generado se puede, después, descomponer produciendo oxígeno altamente activado con una gran capacidad para oxidar. El aire limpio, seco y frío proveniente del sistema de preparación del gas o el oxígeno puro, se hace pasar entre electrodos de alta tensión. Estos electrodos funcionan con corriente alterna y solamente producen ozono durante el periodo de tensión creciente poco antes de la culminación. Si se eleva la frecuencia de la tensión alternante es posible aumentar la generación de ozono. Los electrodos se deben enfriar mediante agua o aire. (CLEMENTE SALAZAR, 2000)

Esta reacción electro física produce un gas con distintas concentraciones de ozono, que se utilizará acorde a la patología a tratar. El gas al entrar en contacto con el organismo, produce cambios celulares en el organismo, curando de esta manera mas de 200 enfermedades y destaca sus propiedades Oxigenantes, antisépticas, revitalizantes, antiinflamatorias, antioxidantes, germicidas y regeneradoras.

El ozono es inocuo porque no actúa directamente sobre la enfermedad sino que estimula al organismo a producir lo que le hace falta para curar, da buenos resultados curando enfermedades de asma, parálisis cerebral infantil, artritis, ulceras varicosas, pie diabético.

El ozono se forma cuando se aplica la energía suficiente a la molécula de oxígeno para disociarla y formar radicales libres de oxígeno; de esta forma se cumple la condición; para formar una reacción entre una molécula y un átomo de oxígeno y obtener la molécula de ozono.

En la siguiente figura se muestra el proceso de formación de la molécula de ozono.

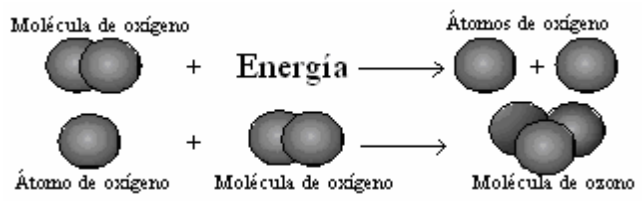


Figura 2.1 Formación de la molécula de ozono

La formación del ozono se describe como una reacción endotérmica, la cual se expresa como: (Javier, 2003).

$$3O_2 \leftrightarrow 2O_3 \ (\Delta H^o \text{ a 1 atm, } + 284.5 \text{ kJ}) \qquad (2.1)$$

2.1.1 Formas de generar ozono.

Las formas o métodos más utilizados para generar ozono son: descargas eléctricas, radiación ultravioleta y electrólisis. De estos tres métodos el más destacado, por el desempeño de su eficacia e implementación, es el método de la descarga corona. En la siguiente sección se describe su principio de funcionamiento y sus principales características.

La **Figura 2.2** muestra el diseño típico de una celda de descarga de corona.

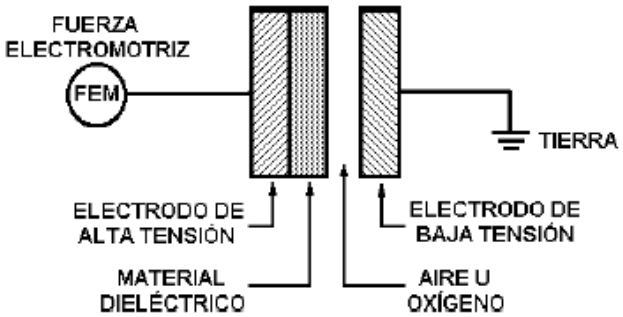


Figura 2.2 Configuración típica de una celda de descarga de corona para la generación de ozono

2.1.2 Generación de ozono por descargas eléctricas.

Para formar la molécula de ozono se requiere de una celda, como se muestra en la figura 2.3, formada por dos electrodos separados por una distancia, del orden de los milímetros; a este espacio se le conoce como espacio de descarga.

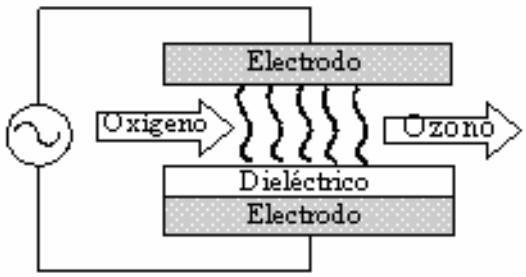


Figura 2.3 Celda generadora de ozono por descargas eléctricas

Sobre uno de los electrodos se coloca un material dieléctrico, y en el espacio de descarga se inyecta un flujo de aire o de oxígeno de alta pureza, el cual provee oxígeno para la formación del ozono. Para el funcionamiento de la celda, se conecta a los electrodos una señal eléctrica alterna, la cual permite la creación de un campo eléctrico intenso. Este campo eléctrico se encarga de acelerar los electrones que se encuentran en el espacio de descarga, de tal forma, que en la trayectoria del recorrido de estos electrones, colisionan con las moléculas de oxígeno y logran la disociación de sus átomos. El siguiente paso para la formación de la molécula de ozono es la reacción entre uno de estos átomos y una molécula de oxígeno.

La construcción de la celda generadora de ozono da lugar a la formación de dos capacitancias conectadas en serie, una de ellas es **Cd,** ésta se forma por el material dieléctrico que se encuentra adherido sobre uno de los electrodos de la celda, y la otra capacitancia **Ca**, se forma por la presencia del gas de alimentación que circula a través del espacio de descarga.

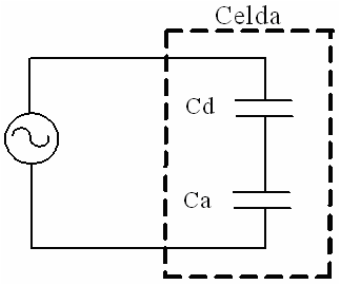


Figura 2.4 Circuito eléctrico equivalente de una celda generadora de ozono

En la generación de ozono sólo de un 4% a un 12% de la energía es aprovechada para la formación de ozono, el resto es transformado en calor y luz.

Este tipo de descarga eléctrica, que se realiza a través de un material aislante, da origen a la formación de delgados filamentos, que en su conjunto se denominan microdescargas. A este tipo de descarga eléctrica, se le conoce como ***descarga en barrera dieléctrica (DBD).*** La tabla 2.1 describe las principales características de estas microdescargas.

Tabla 2.1 Principales características de las microdescargas

Duración	1-10 ns
Radio del filamento	0.1 mm
Corriente máxima	0.1A
Densidad de corriente	100-1000 A/cm^2
Carga total	100-1000 pC
Densidad del electrón	10^{14}-10^{15} cm^{-3}
Energía del electrón	1-10 eV
Temperatura del gas	25-100 ºC

La generación de ozono por descarga en barrera dieléctrica es el método más eficaz y el más utilizado en aplicaciones de desinfección de agua. Es posible alcanzar producciones

del orden de 100 kg O_3/h, lo cual, resulta complejo alcanzar con los métodos mencionados anteriormente.

En la siguiente tabla se presenta un resumen comparativo de los principales métodos de generación de ozono.

Tabla 2.2 Comparación de los principales métodos de generación de ozono

Método	**Capacidad típica de generación de ozono. g/h**	**Implementación**	**Volumen agua a tratar**	**Consumo energía**
D. Eléctricas	100	Sencilla	Bajo a alto	El menor
R. Ultravioleta	2	Sencilla	Bajo	10 veces más que el primer método
Electrólisis	1 a 4	Complicada	Bajo	15 a 20 veces más que el primer método

Si bien en el mercado existen distintos tipos de diseños de generadores de ozono patentados, la mayoría son del tipo: (ENOHSa, 2003)

- De tubo.
- Placa de Otto.
- Placa de Lowther.

En la **Figura 2.5** y la **Figura 2.6** se ilustran los diagramas de los generadores de placa de Otto y de Lowther y del tipo de tubo, respectivamente. El diseño de la placa de Otto es el más antiguo y opera a presión atmosférica o negativa con la ventaja de que puede funcionar

hasta puntos de condensación de –30ºC sin que sufra daños importantes. Sin embargo, su eficiencia es menor que la de los otros dispositivos por lo que se la utiliza cada vez menos.

El dispositivo de placa de Lowther, se enfría por aire y puede utilizar aire atmosférico u oxígeno puro. Requiere de menos energía que todos los otros generadores y funciona, típicamente a una frecuencia de 2.000 Hz a 9.000 voltios a una presión de gas de cerca de 1.0 k/cm2. La información sobre la eficiencia de su funcionamiento a largo plazo es limitada.

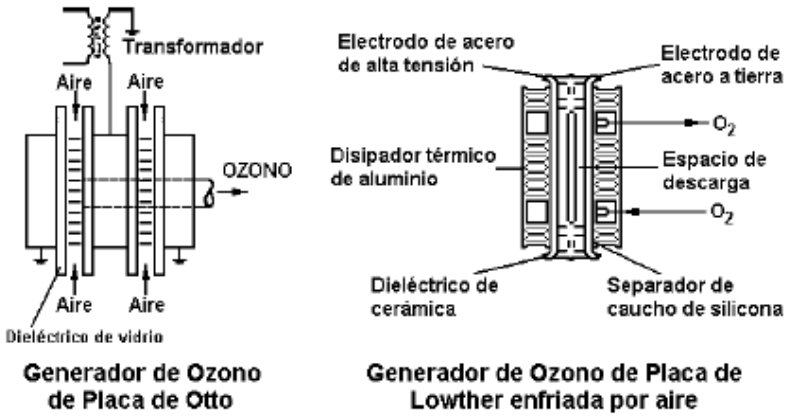


Figura 2.5 Generadores de ozono del tipo de placa: de Otto y de Lowther

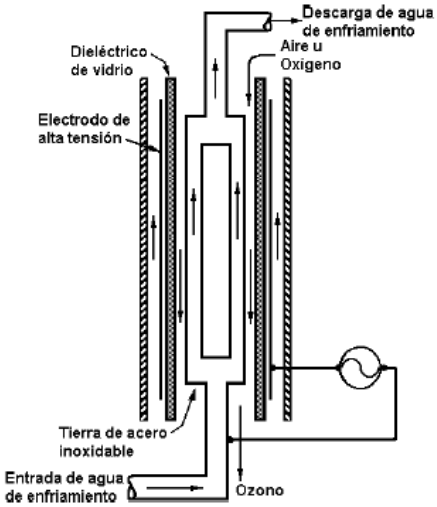


Figura 2.6 Generador de ozono del tipo de tubo

2.1.3 Elementos que forman un generador de ozono.

El generador comporta dos partes que nos son significativas internamente: La parte ***química-mecánica y la parte electrónica.*** La primera se compone de compresor, enfriador, secadores y generador de ozono. La segunda se compone de: rectificador-doblador, generador de señales, pre-amplificador, amplificador de potencia, transformador de alto voltaje. La parte electrónica comporta algunos circuitos secundarios para mejorar el desempeño. Los generadores consisten en: un tubo dieléctrico por el que se hace pasar oxígeno, éste recibe una descarga eléctrica constante (***llamado efecto corona***) y que se ha generado en un transformador. Este hecho provoca la transformación de la molécula de oxígeno (O_2) proveniente del aire, en una molécula de ozono (O_3). (L.F, 2002)

Este gas (Ozono) es succionado por un sistema venturi y es mezclado con el agua que va a ser tratada.

Un equipo generador de ozono para aplicaciones de desinfección de agua está constituido por los elementos que se muestran en la siguiente figura.

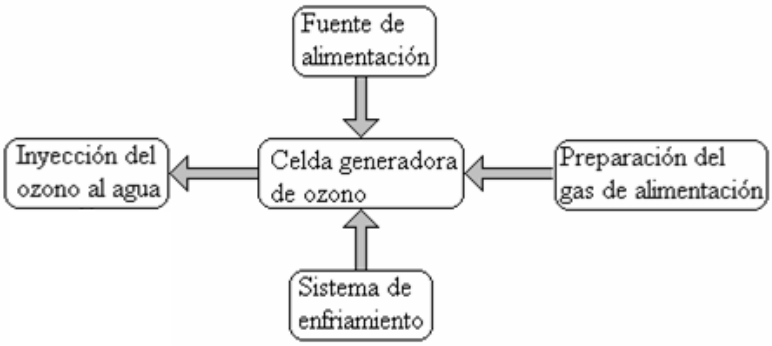


Figura 2.7 Partes que forman un equipo generador de ozono.

Como se observa en esta figura, para desarrollar un equipo generador de ozono se requiere del estudio de varias áreas de la física y química.

Cada una de las partes que componen el equipo generador de ozono desempeña un papel de importancia para lograr la producción de ozono requerida y también su correcta operación.

2.1.3.2 Preparación del gas de alimentación.

Para la generación del ozono se requiere suministrar oxígeno a la celda. Este gas puede ser oxígeno de alta pureza, o bien aire, cuya concentración de oxígeno en volumen es del 21 %.

El aire es una mezcla de varios gases, además del oxígeno se encuentra el nitrógeno en un 78% y en menor porcentaje aparecen el argón y el anhídrido carbónico.

Otro elemento presente en el aire, y al cual se debe prestar especial atención en la generación de gas ozono, es el vapor de agua o el grado de humedad presente en el aire.

La humedad contenida en el aire puede reaccionar con los óxidos de nitrógeno que se forman en el espacio de descarga de la celda y formar a su vez ácido nítrico, este compuesto químico causa daños en los electrodos de la celda. Por esta razón se debe controlar el grado de humedad presente en el aire, lo cual se consigue con secadores, tales como la silica gel.

El contenido de humedad del aire se expresa en una temperatura de punto de rocío, que se define como la temperatura en la cual el vapor de agua contenida en el aire se condensa. La temperatura de punto de rocío que utilizan los equipos industriales de ozono está en el rango de -60 y -80 ºC.

Otro aspecto importante en la preparación del gas de alimentación es la instalación de filtros que impidan el paso de partículas de polvo al interior de la celda.

Cuando el gas de alimentación es oxígeno de alta pureza se evita el problema de la humedad y dada la mayor presencia de oxígeno, en comparación con el aire, se pueden obtener concentraciones de ozono de dos hasta cuatro veces mayores.

La elección de utilizar aire u oxígeno de alta pureza depende de las exigencias de la aplicación. La mayoría de los generadores de ozono utilizan aire como gas de alimentación. Sin embargo, aunque en menor cantidad, se tienen generadores de ozono para aplicaciones de desinfección de agua a gran escala, en los cuales se justifica la inversión de equipo y costo de operación para trabajar con oxígeno de alta pureza.

2.1.3.2 Celda generadora de ozono.

La celda generadora de ozono, figura 2.2, es aquella donde se lleva a cabo la formación del gas ozono por medio del fenómeno de descarga en barrera dieléctrica.

Las celdas generadoras de ozono se fabrican en dos formas geométricas: celdas de placas paralelas y cilíndricas.

Los materiales que se utilizan en la construcción de una celda se eligen de tal forma que soporten la acción oxidante del ozono. Para el caso de los electrodos los materiales utilizados son el acero inoxidable, tungsteno y el titanio.

Para el material dieléctrico se utiliza el vidrio, alúmina y mica, entre otros. En lo que respecta a los accesorios y mangueras utilizadas en conexiones de la celda se puede utilizar el teflón, el cual posee excelentes propiedades de resistencia a los efectos oxidantes del gas ozono.

En la tabla 2.3 se presenta una clasificación de materiales en orden a su resistencia al efecto oxidante del gas ozono.

Tabla 2.3 Clasificación de materiales para trabajar con el ozono.

Material	Clasificación	Material	Clasificación
Silicón	Excelente	Vidrio	Excelente
A. Inoxidable 316	Excelente	Cobre	Bueno
Viton®	Excelente	Bronce	Bueno
Titanio	Excelente	PVC	Bueno
Teflón®	Excelente	Aluminio	Bueno
Tungsteno	Excelente		

2.1.4 Inyección de ozono al agua

Para lograr la desinfección del agua se requiere de una técnica adecuada de contacto del ozono con el agua. Existen varias formas de aplicar el ozono en el agua, de las cuales, destacan la difusión por burbujeo, la inyección por tubo Venturi, y para aplicaciones a mayor escala se lo realiza mediante tanques de contacto con burbujeo.

2.1.4.1 Difusión por burbujeo

Esta técnica consiste en utilizar un difusor, como el que se muestra en la figura 2.8, de material cerámico. Este dispositivo tiene en su superficie orificios del orden de las micras, por los cuales se libera el ozono en forma de finas burbujas que entran en contacto con el agua.

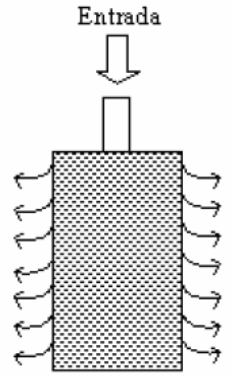


Figura 2.8 Difusor de gas ozono

La técnica de difusión de ozono por burbujeo es fácil de implementar, no tiene partes móviles, requiere bajo mantenimiento y tiene mucha aceptación.

Un difusor en cambio, trabaja bajo presión, creando una columna de burbujas. Sus ventajas son un alto rendimiento, construcción simple y ventajas para altas velocidades de flujo (por ejemplo en sistemas de agua potable). Como desventajas tiene la superficie que requiere y la necesidad de edificios altos para aumentar la eficiencia.

2.1.4.2 Inyector Venturi

El tubo venturi inyecta el gas en el agua vía un vacío. Su instalación es compacta y su rendimiento de hasta 90%. Usa un sistema de chorro de burbuja.

Consiste de una sección de tubería, como se muestra en la figura 2.9, por la cual circula el agua que se desea ozonificar; en esta sección de tubería se tiene una reducción de su diámetro, de tal forma, que se logra una caída de presión en este punto, lo que se aprovecha para instalar la entrada del gas ozono. La caída de presión en el tubo Venturi origina una fuerza de succión del gas ozono, de esta forma se logra el contacto y la mezcla del ozono con el agua.

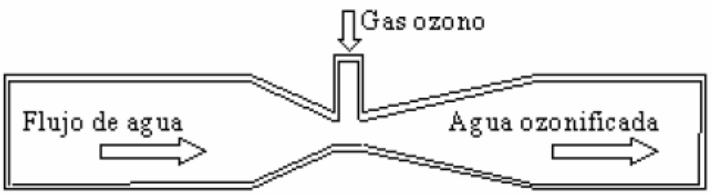


Figura 2.9 Inyector Venturi

2.1.4.3 Aplicaciones a mayor escala.

Mediante tanques de contacto con burbujeo del ozono gas a contracorriente. El tanque de contacto más común es un tanque con difusor a contracorriente. En este reactor el gas que contiene el ozono forma pequeñas burbujas al pasar por un medio poroso en el fondo del tanque. Al ascender las burbujas en el tanque, se transfiere el ozono de la fase gaseosa al agua. (ENOHSa, 2003)

Como el ozono es poco soluble en el agua, para introducirlo en la corriente de agua a tratar el gas debe entrar en estrecho contacto con la misma. Para lograr esto se utilizan distintos tipos de dispositivos con los que se pueden generar finas burbujas (de 1 mm de diámetro aproximadamente). El agua disuelve, preferentemente, el ozono presente en el gas agregado, mientras que casi todo el oxígeno y el nitrógeno que lo acompañan pasan por el agua sin llegar a disolverse. Ya en el agua, el ozono reacciona casi inmediatamente con la materia orgánica, especialmente con los microorganismos, pero, como se mencionó anteriormente, la mayor parte del ozono se descompone rápidamente en el agua. En el agua existen ciertos compuestos que catalizan esta descomposición.

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

- ***Reacciones rápidas:*** tales como las de inactivación de microorganismos; de oxidación del hierro, manganeso y sulfuros; y las de mejoramiento de la floculación.

- ***Reacciones lentas:*** como las de oxidación de los compuestos más difíciles de oxidar, tales como los plaguicidas, compuestos orgánicos volátiles y otros compuestos orgánicos complejos que, debido al tipo de cinética involucrada, tienden a requerir tiempos de reacción más prolongados. En este tipo de reacciones, la ozonación se suele complementar con luz ultravioleta o peróxido de hidrógeno ("procesos avanzados de oxidación"), lo que, como ya se indicó, acelera las reacciones.

Si el objetivo fundamental de la ozonación es la desinfección, lo que típicamente se suele hacer es agregar, lo más rápidamente posible, suficiente cantidad de ozono como para satisfacer la demanda de ozono y poder mantener un residuo de ozono durante un período de tiempo lo suficientemente largo como para asegurar la inactivación o destrucción de los microorganismos. Debido a que el ozono tiene un potencial de oxidación mayor que el del cloro, la demanda de ozono, para la mayoría de las aguas, suele ser mayor que la de cloro. Por lo general, ésta varía entre 3 y 9 mg/l.

Normalmente, durante la desinfección con ozono se trata de mantener un residual mínimo de 0,4 a 0,5 mg/l después de 10 a 20 minutos de contacto con el agua.

El diseño y calidad de construcción del generador es crítico y, en general, determina el éxito o el fracaso de los procesos de desinfección con ozono. Los tipos de contactores que habitualmente se emplean en las plantas potabilizadoras son los siguientes:

- Convencionales con difusores.
- De turbina.
- Columnas empacadas.
- Inyectores.
- Tubos en U profundos.

Si bien el tipo de contactor se selecciona en función de muchos factores, incluidos el terreno disponible para su instalación y el costo de los mismos, en general, la selección depende, como ya se dijo, de los objetivos específicos de la ozonación.

En la **Tabla 2.4** se indican las selecciones apropiadas para cada uso:

Tabla 2.4 Selección de contactores (Fuente: AWWA, 1998)

Objetivos del tratamiento	Contactor más apropiado
Desinfección primaria	Difusor (de burbuja fina) de niveles múltiples
Oxidación de hierro y manganeso	Inyectores (burbujas finas) de niveles múltiples
Remoción de color	Difusor (de burbujas finas) de niveles múltiples, inyector, tubo en U profundo, turbina.
Control de olor y sabor	Difusor (de burbujas finas) de niveles múltiples, tubo en U profundo.
Oxidación	Tubo en U profundo, inyector, difusor (de burbujas finas) de niveles múltiples.
Remoción de algas	Turbina

En la **Figura 2.10** se muestran tres diseños básicos de contactor:

- El de cámaras separadas con pantallas o tabiques y difusor
- El reactor agitado por turbina.
- El difusor de burbujas de columnas múltiples.

Ensayos realizados han demostrado que con el difusor de burbujas de columnas múltiples se alcanza la mayor eficiencia de transferencia.

En plantas potabilizadoras de menor capacidad, el ozono se produce, frecuentemente, a una presión de 1.0 k/cm2 y se lo dispersa en forma de burbujas finas que se introducen en una

columna de agua de 5 metros de altura en la cual la oxidación y la desinfección se producen simultáneamente.

Para acelerar la disolución del ozono y favorecer la mezcla, dispersando mejor las burbujas y aumentar el tiempo de contacto, se suelen utilizar columnas o cámaras de contacto llenas de trozos irregulares de material plástico o anillos cerámicos, o mezcladores estáticos y difusores de hélice.

Con un difusor de columna o cámara de contacto se pueden alcanzar eficiencias de transferencia del 90% o más. El tiempo de contacto que se utiliza para la oxidación y desinfección, varía, generalmente, de 10 a 20 minutos

En los tres tipos de contactores que se muestran en la Figura 2.10, se emplea flujo en contracorriente, en el que el agua fluye hacia abajo y las burbujas de aire ascienden de modo de lograr el máximo tiempo de contacto posible.

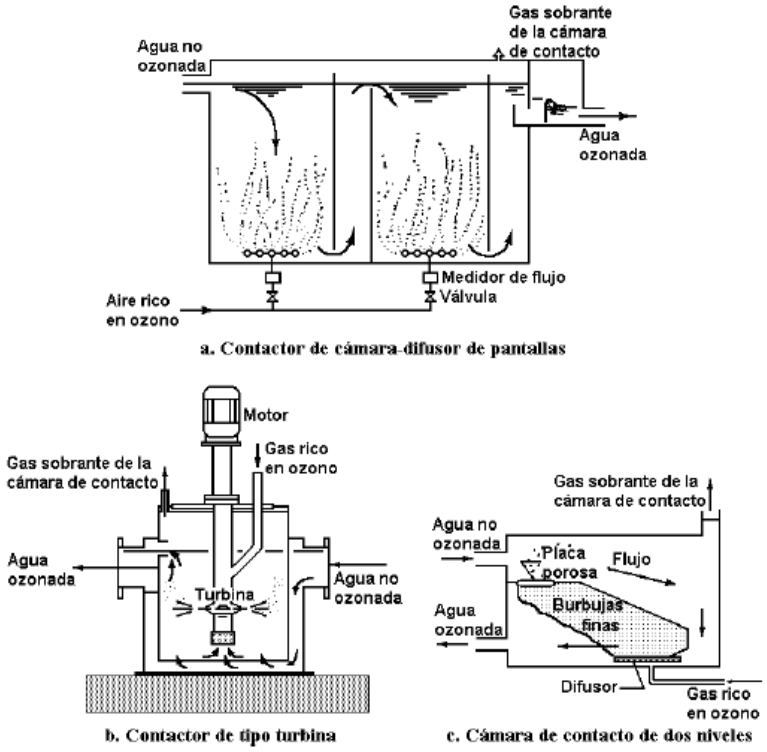


Figura 2.10. Diagramas de contactores de ozono (Fuente: Reiff y Witt)

CAPITULO 3

METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO Y DISEÑO DE UN GENERADOR DE OZONO.

3.1 Diseño del equipo generador de ozono.

3.1.1 Consideraciones y parámetros importantes

El tratamiento con ozono de aguas para el consumo se ha convertido en una vía muy aconsejable:

- Por la calidad del agua que se obtiene
- Por su efecto económico

Como el uso más difundido es la degradación de orgánicos, se extiende rápidamente esta aplicación a la industria de alimentos y bebidas como desinfectante estrella desfalcando a su ya posicionado rival: el cloro. Las ventajas que el ozono presenta frente éste son tan contundentes que casi ninguna industria que ha conocido su potencial ha continuado al margen. No genera residuos, no requiere un manejo especial, tiene un costo de producción muy bajo, se genera en el mismo sitio en el que se utiliza, son maquinarias simples de operar, es 90 veces más oxidante, etc.

3.1.2 Parámetros de diseño

Las dosis de ozono necesarias para desinfectar el agua cambian según la calidad de ésta, por ejemplo:

- Para aguas subterráneas de buena calidad con baja turbiedad y contenido mineral: 0.25 a 0.5 mg/L (ó g/m^3).
- Para aguas superficiales de buena calidad bacteriológica y el ozono aplicado después de la filtración: 2 a 4 mg/L
- Para aguas superficiales contaminadas y con el ozono aplicado después de la filtración: 2.5 a 5 mg/L

Los tiempos de contacto requeridos para que el ozono inactive los microorganismos a estas dosis es de unos 4 minutos (puede variar desde unos segundos a algunos minutos), a diferencia de los grandes tiempos de contacto característicos de la desinfección con cloro. Debido a la rapidez con que el ozono mata los microorganismos estos pequeños tiempos de contacto no crean mayor problema. (L.F, 2002)

3.2 Metodología para el cálculo.

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 dedicada a producir la descarga estará rigurosamente restringida por las disposiciones de refrigeración.

3.3 Materiales dieléctricos.

El material dieléctrico es un elemento de gran importancia para el correcto funcionamiento de una celda. Sus principales funciones son: evitar un arco eléctrico, distribuir las microdescargas y contribuir en la disipación del calor que se acumula en el espacio de descargas. (www.buenastareas.com, 2006)

Este trabajo de investigación contempló el estudio de dos geometrías de celdas generadoras de ozono: la de placas paralelas y cilíndrica. En el caso de la celda cilíndrica el material dieléctrico está restringido al uso de vidrio, ya que de los materiales comerciales es el único que se comercializa en forma tubular. Sin embargo, para la construcción de una celda de placas paralelas se encontró que existe gran variedad de materiales dieléctricos, empleados como aislamientos de motores eléctricos y transformadores, que pueden ser implementados en esta geometría. La presentación comercial de estos aislantes es en forma de láminas y soportan temperaturas mayores a los 100ºC. Los materiales evaluados para la elección del material dieléctrico para la celda generadora de ozono de placas paralelas fueron: Mica, Myler Dacrón, Nómex, Myler, Rag Myler y Vidrio Epóxico.

A continuación se presenta la caracterización eléctrica realizada sobre los materiales anteriormente mencionados.

3.3.1 Caracterización eléctrica de materiales dieléctricos.

Las propiedades eléctricas de mayor relevancia para estudiar en un material dieléctrico son: la constante dieléctrica, la rigidez dieléctrica y el factor de pérdida.

La constante dieléctrica o *permitividad relativa* se refiere a una cantidad que se asigna a un material para evaluar su capacidad para almacenar carga electrostática.

La *rigidez dieléctrica* corresponde al máximo gradiente de potencial que un material puede soportar sin que se produzca la ruptura dieléctrica, es decir, que el material conserve sus propiedades aislantes.

El *factor de pérdida* se refiere al comportamiento resistivo que presenta el material dieléctrico y que origina la circulación de una corriente de fuga **If** por este medio. La corriente **If** ocasiona un calentamiento del material que causa su deterioro y posterior destrucción. El factor de pérdida se mide en relación a la magnitud de **If**.

Las hojas de datos de los fabricantes de materiales dieléctricos ofrecen información acerca de los parámetros eléctricos del material. Sin embargo, para la elección del material dieléctrico se requirió información no contemplada en las hojas de datos. Ésta información consiste en encontrar el comportamiento del factor de pérdida y de la permitividad relativa a variaciones de frecuencia entre los 3 y 50 kHz a diferentes temperaturas de operación.

3.3.2 Selección del material dieléctrico.

Para la elección del material dieléctrico de la celda generadora de ozono se consideró que dicho material debería cubrir los siguientes requisitos: alta rigidez dieléctrica, permitividad relativa alta, factor de pérdida pequeño, resistencia a la erosión por acción de las microdescargas, resistencia a la acción oxidante del ozono, bajo costo y soporte mecánico adecuado que evite la deformación y facilite la construcción de la celda.

A continuación se presenta en la tabla 3.1 la comparación de los parámetros de mayor relevancia para la elección del material dieléctrico.

Tabla 3.1 Comparación para la elección del material dieléctrico

Parámetros	**Myler**	**Nómex**	**Myler Dacrón**	**Mica**	**Rag Myler**	**Vidrio epóxico**
Factor de pérdida mínimo a 25ºC	0.0075	0.015	0.01	0.015	0.025	0.034
Factor de pérdida máximo a 25ºC	0.013	0.0208	0.013	0.031	0.049	0.041
Permitividad relativa mínima a 25ºC	2.68	2.022	1.909	1.43	3.13	2.72
Permitividad relativa máxima a 25ºC	2.72	2.09	1.95	1.45	3.31	2.90
Factor de pérdida mínimo a 70ºC	0.006	0.016	0.01	0.014	0.05	0.058
Factor de pérdida máximo a 70ºC	0.01	0.019	0.017	0.036	0.096	0.064
Permitividad relativa mínima a 70ºC	2.72	2.11	2.22	1.44	3.5	3.5
Permitividad relativa máxima a 70ºC	2.83	2.13	2.27	1.47	3.5	3.63
Rigidez dieléctrica	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta
Resistencia al ozono	Bueno	Regular	Bueno	Bueno	Bueno	Bueno
Resistencia a la erosión por descargas	Malo	Regular	Malo	Bueno	Malo	Malo
Soporte mecánico	Malo	Malo	Malo	Bueno	Malo	Malo
Costo	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo

En la tabla 3.1 se puede observar que a pesar de que existen materiales con excelentes características eléctricas, la mayoría de ellos no cumplen con los requisitos de resistir la erosión de las descargas eléctricas y proporcionar el soporte mecánico adecuado para

construcción de la celda. Por esta razón, se eligió a la ***Mica*** como material dieléctrico, que ocupa el cuarto lugar en desempeño eléctrico, pero tiene una resistencia buena a la erosión por descargas eléctricas y ofrece un buen soporte mecánico.

3.4 Diseño de una celda generadora de ozono de placas paralelas.

La presente metodología es válida para el diseño de celdas de placas paralelas, para operar en frecuencias altas de 5kHz a 30kHz, con un consumo de potencia de hasta 10 Watts, enfriadas por aire y usando mica como material dieléctrico. Algunas consideraciones de diseño son resultado de la experimentación en este tipo de celdas.

3.4.1 Cálculo de la producción de ozono requerida para desinfección de agua

El cálculo de una celda generadora se basa en la cantidad de ozono que se desea producir para cubrir una aplicación específica de desinfección de agua. La producción puede ser calculada mediante la ecuación (3.1). (Bataller L.A., 2000)

$$Pd = DsCl \tag{3.1}$$

Donde **Pd** es la producción deseada (g/h), **Ds** es la dosificación de ozono (g/l), es decir, la cantidad de ozono (gramos) necesaria para desinfectar un litro de agua y **Cl** es la capacidad de desinfección del sistema (l/h), es decir, la cantidad de litros de agua que se desea desinfectar en una hora. La dosificación puede encontrarse experimentalmente, mediante la estimación de la cinética de consumo de ozono en el agua, para cada caso específico. Otra forma de estimarla es aplicando reglas de desinfección establecidas por los organismos que rigen estas aplicaciones.

3.4.2 Cálculo de potencia que debe consumir una celda generadora de ozono

El cálculo de la potencia consumida por la celda depende de la eficacia que se espera alcanzar con la celda. La eficacia de una celda generadora real queda determinada por el tipo de gas de alimentación y la temperatura de operación de la celda. La potencia que debe consumir una celda para generar la cantidad requerida de ozono para cierta aplicación puede ser calculada de la siguiente forma. (Bataller L.A., 2000)

$$Pg = \frac{Pd}{Ef}\left(\frac{1000W}{1KW}\right) \tag{3.2}$$

Donde **Pg** es la potencia consumida por la celda generadora de ozono, dada en Watts, **Pd** es la producción deseada, calculada por la ecuación (3.1), $\mathbf{E_f}$ es la eficacia real de la celda (g/kWh)

Si la producción de ozono deseada demanda una potencia de consumo mayor a 10W, se recomienda hacer un arreglo en paralelo de celdas de hasta 10W, de manera que quede satisfecha la demanda de ozono. El límite de potencia de 10 W fue establecido ya que construir una celda generadora de ozono de mayores dimensiones resulta impráctico para una implementación física.

3.4.3 Dimensionamiento de una celda generadora de ozono de placas paralelas.

El comportamiento de una celda generadora de ozono puede ser descrito por el modelo eléctrico no lineal mostrado en la figura 3.1

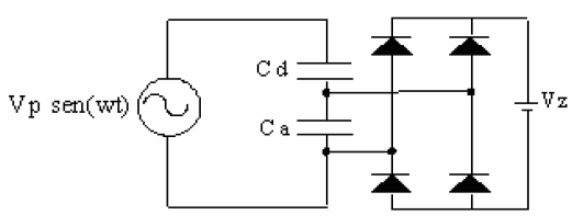


Figura 3.1 Representación eléctrica no lineal de la celda generadora de ozono.

Donde, **Vp** es el voltaje pico aplicado a la celda, **Ca** y **Cd** representan las capacitancias del espacio de descargas y la del dieléctrico respectivamente y **Vz** es el voltaje de mantenimiento de las descargas.

La potencia consumida en una celda generadora de ozono (**Pg**) puede ser calculada por la fórmula de Manley, ecuación (3.3). (Javier, 2003 , págs. 177-178)

$$Pg = 4\,fCdVz\left(Vp - \frac{Cd + Ca}{Cd}Vz\right) \tag{3.3}$$

Donde **f** es la frecuencia de operación.

El valor estático de **Ca** y **Cd**, cuando no hay descargas, puede estimarse tomando en cuenta la geometría, dimensiones físicas y materiales empleados en la celda generadora de ozono. Para el caso específico de una celda de placas paralelas éstas pueden ser calculadas con las ecuaciones (3.4) y (3.5).

$$Ca = \frac{\varepsilon_0 A}{d_2} \tag{3.4}$$

$$Cd = \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 A}{d_1} \tag{3.5}$$

Donde, $\boldsymbol{\varepsilon_r}$ es la permitividad relativa del material dieléctrico, $\boldsymbol{\varepsilon_0}$ es la permitividad del vacío (8.854×10^{-12} $C^2/N.m^2$), $\mathbf{d_1}$ y $\mathbf{d_2}$ son el espesor del dieléctrico y espacio de descarga respectivamente (m).

Los valores reales de las capacitancias **Ca** y **Cd** son resultado del efecto capacitivo promedio en la celda bajo ciertas condiciones de operación y por lo tanto, varían para distintos valores de excitación. Sin embargo, las capacitancias estáticas calculadas con (3.4) y (3.5) proporcionan una aproximación a los valores reales.

La variable $\mathbf{d_1}$ se determina por la rigidez dieléctrica del respectivo material. El criterio para su selección debe considerar que la rigidez dieléctrica debe ser al menos el doble del voltaje pico **Vp** aplicado a la celda. Otro factor a considerar es que el uso de un material dieléctrico más grueso implicará aplicar un mayor voltaje a la celda para originar el mismo efecto de ionización del aire. Por esto es recomendable el uso de un espesor más delgado que cumpla la condición de la rigidez dieléctrica. Los espesores comerciales y la rigidez dieléctrica de la mica se presentan en la tabla 3.2.

Tabla 3.2 Espesores comerciales y rigidez dieléctrica de la mica

Espesores comerciales de la mica (mm)	**Rigidez dieléctrica (fabricante)**	**Voltaje pico máximo recomendado (Vp max)**
0.2	18kV	9kV
0.3	27kV	13.5kV
0.5	45kV	22.5kV

La ecuación (3.3) establece una relación entre las magnitudes eléctricas y de construcción de una celda generadora de ozono. De esta forma se puede advertir que **Pg** es directamente proporcional a cuatro principales factores: voltaje de alimentación **Vg**, frecuencia de operación **f**, área de descarga **A** y permitividad relativa del material dieléctrico empleado ε_r. Por lo que, al usar altas frecuencias en celdas generadoras de ozono es posible disipar la misma potencia con voltajes y áreas de descarga menores a los empleados en baja frecuencia. Esta característica permite que los equipos generadores de ozono, a altas frecuencias, reduzcan drásticamente su tamaño. Sin embargo, la reducción del tamaño del área de descarga trae consigo un calentamiento mayor en los electrodos. Un calentamiento excesivo de la celda generadora de ozono hace necesario el uso de sistemas de enfriamiento más elaborados, para poder garantizar su correcto funcionamiento. Típicamente, la densidad de potencia en ozonizadores a alta frecuencia oscila entre 1 y 5 $kW/m^{2.}$ Según experimentaciones realizadas, para el uso de sistemas de enfriamiento por aire se recomienda una densidad de potencia de **1 kW/m^2**.

Una forma de estimar el área de descarga en una celda generadora es mediante la ecuación (3.6). Esta ecuación relaciona al área de descarga con la densidad de potencia. (al., 1988)

$$A = \frac{Pg}{Kd} \tag{3.6}$$

Donde, **A** es el área de descarga y **Kd** es la densidad de potencia recomendada de acuerdo al tipo de sistema de enfriamiento empleado.

El voltaje al que inician las microdescargas en el espacio de descargas depende de la presión del gas de alimentación, del tipo de gas y el espacio de descargas.

Este voltaje de inicio de descargas puede ser estimado mediante la ecuación de Paschen, (3.7) (Javier, 2003).

$$Vu = Kp_1\, d_2\, Ps + Kp_2 \tag{3.7}$$

Donde, **Vu** es el voltaje de inicio de descargas (volts), $\mathbf{Kp_1}$ y $\mathbf{Kp_2}$ son constantes que dependen del tipo de gas de alimentación, y **Ps** es la presión absoluta del gas de alimentación (kPa). $\mathbf{Kp_1}$ toma valores de 29.64 para aire y 26.55 para oxígeno y $\mathbf{Kp_2}$ toma valores de 1350 para aire y 1480 para oxígeno.

La fórmula de potencia (3.3) presenta la desventaja de que depende del voltaje de mantenimiento **Vz,** el cual es un parámetro que no se puede estimar de forma directa. Sin embargo, la potencia puede ser calculada empleando el voltaje de umbral **Vu**, de la siguiente manera (ENOHSa, 2003).

$$Pg = 4\, fCd \frac{Cd}{Cd + Ca} Vu(Vp - Vu) \tag{3.8}$$

Despejando el voltaje pico **Vp** de la ecuación (3.8) y sustituyendo en ella las ecuaciones (3.4), (3.5) y (3.7) tenemos.

$$Vp = \left[\frac{Pg}{4f\left(\frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r^{\,2} A d_2}{\varepsilon_r d_1 d_2 + d_1^{\,2}} \right)(Kp_1 d_2 Ps + Kp_2)} \right] + kp_1 d_2 Ps + kp_2 \qquad (3.9)$$

Proponiendo y sustituyendo los datos **f**, **Kp1**, **Kp2**, **d1**, ε_r, ε_o, **A**, **Pg** y **Ps** en la ecuación (3.9). El voltaje pico **Vp**, queda únicamente dependiente del espacio de descargas $\mathbf{d_2}$. Para elegir el valor de $\mathbf{d_2}$ se recomienda graficar el **Vp** contra varios valores de espacio de descarga. El voltaje de operación elegido deberá cumplir con la condición **Vp ≤ Vpmax,** donde **Vpmax** es el voltaje pico máximo recomendado (tabla 3.2). De no cumplirse la condición anterior se recomienda usar un dieléctrico más grueso y volver a graficar **Vp** contra $\mathbf{d_2}$, hasta que se cumplan todas las condiciones.

3.5 Diseño de un sistema de enfriamiento por aire para una celda generadora de ozono.

El sistema de enfriamiento de una celda generadora de ozono es fundamental para el buen desempeño de la misma. Parte de la energía eléctrica aplicada a una celda generadora de ozono es disipada en calor. Esto provoca un incremento considerable de la temperatura al interior del espacio de descargas. Dado que el ozono es termodinámicamente inestable, el que la celda opere a altas temperaturas origina un efecto negativo en la producción de ozono.

La metodología presentada a continuación aplica solamente a un sistema de enfriamiento por aire empleando disipadores de calor tipo aleta con ventilador.

3.6 Fundamentos de la transferencia de calor

El diseño de un sistema de enfriamiento o de un intercambiador de calor se fundamenta en el estudio de la transferencia de calor. Existen tres modos de transferir calor: conducción,

convección y radiación. De estos, los de mayor relevancia para el cálculo de un sistema de enfriamiento por aire son la conducción y la convección, puesto que a las temperaturas de operación de una celda generadora de ozono la transferencia por radiación es despreciable.

3.6.1 Transferencia de calor por conducción

La transferencia de calor a través de un material sometido a un gradiente de temperatura es conocida como transferencia de calor por conducción. El calor pasará del punto más caliente al más frío. La transmisión de calor por conducción debe tener en cuenta la conductividad térmica de las sustancias, es decir, la cantidad de calor transmitido por unidad de tiempo, superficie y gradiente de temperatura. Cada material posee distinta conductividad térmica.

En la **tabla 3.3** se muestran las conductividades térmicas de los materiales de interés empleados en el cálculo del sistema de enfriamiento de una celda generadora de ozono.

Tabla 3.3 Conductividades térmicas de algunos materiales

Material	**Conductividad térmica Kt (W/m.ºC)**
Acero inoxidable 316	46
Aire (27ºC)	0.026
Aluminio	2.37
Mica	0.44
Oxígeno (20 ºC)	0.026

La resistencia térmica por conducción depende de la conductividad térmica del material empleado y de sus dimensiones físicas. Ésta puede ser calculada con la ecuación (3.10).

$$Rcond = \frac{\Delta x}{AcKt} \tag{3.10}$$

Donde, **Rcond** es la resistencia térmica por conducción de un material (ºC/W), **Δx** es el espesor del material (m), **Ac** es el área de contacto con el material a enfriar (m^2) y **Kt** es la conductividad térmica del material (W/m ºC).

3.6.2 Transferencia de calor por convección.

Cuando existe una transferencia de calor entre un sólido y un fluido se dice que hay una transferencia de calor por convección. Existen dos tipos de convección: la natural y la forzada. La convección natural se presenta cuando el intercambio de calor se lleva a cabo entre un sólido y el fluido que lo rodea. En este caso, el fluido en contacto con el sólido se mueve únicamente a causa de las diferencias de densidad. Por el contrario, la convección forzada ocurre cuando el fluido que rodea al sólido se encuentra en movimiento por acción de un elemento externo.

La transferencia de calor por convección depende de la viscosidad del fluido además de las propiedades térmicas del fluido (conductividad térmica, calor específico, densidad). El efecto global de la convección puede ser expresado por la ley de Newton del enfriamiento, ecuación (3.11).

$$qc = h\,Ac\,(\mathrm{Tp} - \mathrm{T}\infty) \tag{3.11}$$

Donde, **qc** es el flujo de calor transferido (W), **h** se denomina coeficiente de transferencia de calor por convección (W/m^2 ºC), **Ac** es el área de la superficie de contacto entre el sólido y el fluido (m^2), $\mathbf{T_p}$ y $\mathbf{T_\infty}$ son la temperatura del sólido y la temperatura del fluido respectivamente (ºC).

El coeficiente de transferencia de calor por convección puede ser calculado analíticamente en algunas ocasiones.

Sin embargo, en situaciones complejas debe ser determinada experimentalmente. Algunos fabricantes de disipadores de calor o intercambiadores de calor ofrecen este dato para cada uno de sus dispositivos.

La resistencia térmica por convección puede expresarse con la ecuación (3.12)

$$Rconv = \frac{1}{hAc} \tag{3.12}$$

3.7 Circuito térmico y las leyes que lo rigen.

Al igual que en un circuito eléctrico básico, en un circuito térmico existen tres elementos fundamentales: flujo energético o corriente, diferencia de potencial y el elemento resistivo. Haciendo una analogía térmica a eléctrica, la temperatura cumple la función de la tensión eléctrica, las resistencias térmicas de las resistencias óhmicas y el flujo de calor a una corriente eléctrica. Para que se lleve a cabo el flujo de energía calorífica de un punto a otro en un circuito térmico, debe existir una diferencia de temperatura.

El calor pasará del punto más caliente al más frío. Sin embargo, existen factores que dificultaran esta transferencia. A estos factores se les denomina resistencias térmicas.

En la figura 3.2 se muestra la transferencia de calor unidimensional a través de una pared plana y su analogía eléctrica.

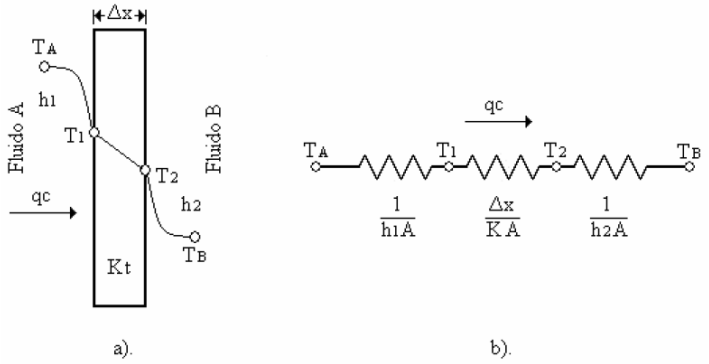


Figura 3.2 Transferencia de calor unidimensional a través de una pared y su analogía eléctrica.

La ley fundamental que rige a un circuito térmico es la ley de Fourier ecuación (3.13), similar a la ley de Ohm en un circuito eléctrico.

$$qc = \frac{\Delta T}{Rtermica} \tag{3.13}$$

El flujo de energía calorífica **qc** dado en Watts, la temperatura **ΔT** dada en ºC y la resistencia térmica **Rtérmica** dada en ºC/W.

3.7.1 Potencia disipada y temperatura de operación de una celda generadora de ozono

La potencia total disipada en calor depende principalmente de la densidad de potencia **Kd** a la que se diseña la celda. Para una celda construida con una densidad de potencia de 1kW/m^2, La potencia disipada en calor por la celda **qt** puede ser calculada de la siguiente manera:

$$qt = \frac{Pg\ (\%\ disipación)}{100\%} \tag{3.14}$$

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

Otro dato necesario para emprender el cálculo del sistema de enfriamiento es la temperatura del espacio de descarga a la que deseamos que opere la celda. Para un sistema de enfriamiento como el propuesto, la temperatura de operación nunca será menor a la temperatura ambiente. Adicionalmente, hay que considerar que la temperatura en algunos lugares supera los 40ºC en primavera. Para este caso crítico es recomendable que la temperatura de operación se mantenga debajo de los 50 ºC, ya que de lo contrario el ozono generado será destruido inmediatamente después de creado. Sin embargo, las mejores eficiencias eléctricas de una celda generadora de ozono se obtienen cuando la temperatura de operación de la celda se encuentra por debajo de los 33 ºC.

3.7.2 Cálculo del sistema de enfriamiento de una celda generadora de ozono.

La representación del circuito térmico de la celda generadora con y sin sistema de enfriamiento se presenta a continuación.

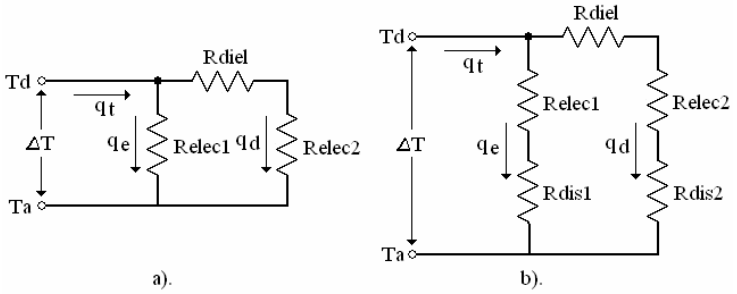


Figura 3.3 Circuito térmico de una celda generadora de ozono a) Sin sistema de enfriamiento b) Con sistema de enfriamiento.

Td y **Ta** son las temperaturas del espacio de descarga y ambiente respectivamente, **qt** es el calor total que la celda debe disipar, $\mathbf{q_e}$ y $\mathbf{q_d}$ son el calor a disipar en cada uno de los electrodos de la celda. **Rdiel** es la resistencia térmica por conducción que ofrece el material dieléctrico al flujo de calor, **Relec 1 y 2** de la figura 3.3. (a) representan las resistencias térmicas de los electrodos por conducción y convección natural con el ambiente. Mientras que **Relec 1 y 2** de la figura 3.3. (b) representan las resistencias térmicas de los electrodos únicamente por conducción. **Rdis 1 y 2** representan las resistencias térmicas producidas por el sistema disipador-ventilador, es decir, la resistencia térmica que ofrece el sistema de enfriamiento por conducción y convección forzada.

El cálculo del sistema de enfriamiento parte del circuito térmico de la figura 3.3 (b). Las resistencias **Rdiel**, $\mathbf{Relec_1}$ y $\mathbf{Relec_2}$ pueden ser calculadas en base a las dimensiones y conductividades térmicas de los materiales usados (tabla 3.4), mediante la aplicación de la ecuación (3.10).

El calor disipado en la celda y en cada uno de los electrodos puede ser estimado con la ayuda de ecuación (3.14). Se propone la diferencia de temperaturas **ΔT** a la que va a operar la celda generadora de ozono, tomando en consideración el caso crítico, es decir, una temperatura ambiente superior a 40 ºC.

Las resistencias térmicas equivalentes de cada rama del circuito de la figura 3.4 (b) pueden ser calculadas con las ecuaciones (3.15) y (3.16). (J.P., 1988)

$$Rtermica_1 = \frac{\Delta T}{q_e} \tag{3.15}$$

$$Rtermica_2 = \frac{\Delta T}{q_d} \tag{3.16}$$

Las resistencias térmicas equivalentes de cada rama **Rdis 1 y 2** pueden ser calculadas con las ecuaciones (3.17) y (3.18) respectivamente.

$$Rdis_1 = Rtermica_1 - Relec_1 \tag{3.17}$$

$$Rdis_2 = Rtermica_2 - Relec_2 - Rdiel \tag{3.18}$$

Conociendo el valor de **Rdis** de cada rama se elige el disipador y el ventilador cuya resistencia térmica **Rsel** sea igual o menor que **Rdis** calculada, y que físicamente pueda ser instalado. El disipador y el ventilador se eligen con ayuda de las curvas de selección proporcionadas por el fabricante.

3.8 Selección de la frecuencia de operación.

La selección de la frecuencia de operación consiste en encontrar la frecuencia en la cual la celda generadora de ozono presente la más alta eficacia (g/kWh), es decir, encontrar la frecuencia en donde se produzca la mayor cantidad de ozono, con la menor cantidad de energía invertida en operación de la celda de placas paralelas construida.

La eficacia se obtiene a partir de datos medidos con la ecuación (3.19).

$$E = \frac{C\phi g}{Pg}(1000) = 34.28 \text{ g/kWh} \tag{3.19}$$

Donde, **C** es la concentración de ozono dada en g/m^3, $ø_g$ es el flujo del gas de alimentación dada en m^3/h, y **Pg** es la potencia consumida por la celda en Watts. La eficacia $\mathbf{E_f}$ está dada en g/kWh.

La eficacia es un parámetro relacionado con la energía que consume celda generadora de ozono para producir cierta cantidad de ozono. La energía que se disipa en una celda depende principalmente de la energía que consume la reacción de síntesis de ozono ecuación (3.20).

$$3O_2 \leftrightarrow 2O_3 \ (\Delta H° \text{ a } 1atm, +284.5kJ) \qquad (3.20)$$

Según la reacción (3.20) se requieren 284.5 kJ para formar dos moles de ozono, es decir, para producir 96 g de ozono. La eficacia máxima teórica alcanzada con una celda sin pérdidas (100% eficiente), cuando se le aplica 1kWh de energía, puede calcularse de la siguiente forma.

$$Ei = \frac{\Pr}{Ec} = \left(\frac{96g}{284.5x10^{-3}J}\right)\left(\frac{1000W}{1kW}\right)\left(\frac{3600s}{1h}\right) = 1214.76\left(\frac{g}{kWh}\right) \qquad (3.21)$$

Donde, **Ei** es la eficacia máxima ideal, cuando la celda consume 1kWh, dada en g/kWh, **Pr** es la producción de ozono en la reacción (3.21), dada en gramos, **Ec** es la energía invertida en la reacción (3.20), dada en Joules.

La eficacia ideal es un parámetro que sirve de comparación con las celdas reales.

En la figura 3.4 se muestra la respuesta de eficacia a cambios de frecuencia.

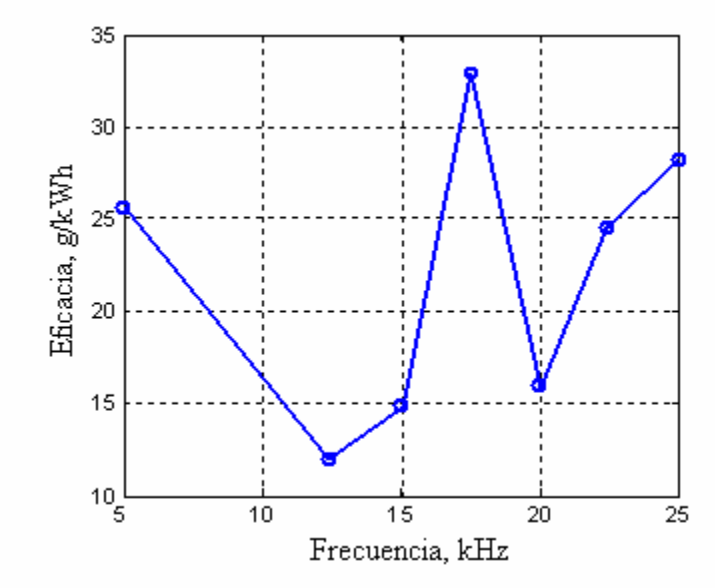


Figura 3.4 Respuesta de la eficacia a cambios de frecuencia.

La frecuencia de operación es uno de los factores que afectan directamente la potencia disipada en la celda. De la gráfica de la figura 3.4 se puede observar que en la frecuencia de 17.5 kHz, la eficacia presenta su máximo valor. El pico de eficacia se debe a que a esta frecuencia hay una buena relación entre la potencia disipada en la celda y el sistema de enfriamiento implementado. Lo cual favorece la reacción de síntesis de ozono. Por lo tanto, la frecuencia elegida para la operación de celda generadora de ozono fue de **17.5 kHz.**

MATERIALES Y MÉTODOS.

4.1 DISEÑO METODOLÓGICO DEL PROYECTO DE LA INVESTIGACIÓN

El proceso investigativo se lo realizó en la ciudad de Loja en las instalaciones del Área de la Energía, las Industrias y los Recursos Naturales no Renovables de la Universidad Nacional de Loja.

La investigación de la tesis se enmarcó en un estudio analítico, descriptivo y explicativo acerca de la generación de ozono empleada en la potabilización de agua; para ello fue necesario el diseño y construcción de una máquina ozonizadora para realizar el estudio antes mencionado; estableciendo una metodología adecuada la misma que consta de dos partes fundamentales, la primera encaminada a la búsqueda de información bibliográfica que permita la identificación del problema, objetivos e hipótesis de investigación; y la segunda dirigida a obtener, la información primaria, es decir directamente del campo investigativo, el mismo que realizará en empresas e industrias dedicadas a éste tipo de tareas, empleando la técnica de la observación.

Se indica que para la realización de la tesis se utilizó recursos como el humano (dos integrantes), financieros, técnicos (taller del A.E.I.R.N.N.R.) y materiales; los cuales nos permitieron alcanzar los objetivos establecidos.

Finalmente se comprobó la generación de ozono, determinando sus propiedades tanto físicas, químicas y mecánicas de ozonizador la que nos permitió garantizar la confiabilidad del trabajo.

4.2 MÉTODOS, MATERIALES Y TÉCNICAS DE TRABAJO

4.2.1 Métodos

Se tomaron en cuenta los siguientes métodos:

4.2.1.1 Metodología para alcanzar el Objetivo especifico 1.

- Se accederá a diferentes portales de internet, revistas y documentos técnicos.
- Se realizará un análisis teórico de las propiedades, beneficios y características del ozono.
- Se analizará las aplicaciones del ozono en la potabilización de agua.
- Se comparará los métodos de desinfección de agua.
- Estas actividades se desarrollarán de manera exploratoria y descriptiva, es decir se buscará familiarizarse con el tema planteado y de esta manera saber como es y cómo opera cada uno de sus componentes.

4.2.1.2 Metodología para alcanzar el Objetivo especifico 2

- Una vez teniendo un conocimiento claro se realizará un diseño acorde a las necesidades del equipo en cuanto a su capacidad de generación y procesos de purificación.
- Se analizará varias tecnologías utilizadas en la construcción de equipos de generación de ozono.
- Se realizará el Cálculo y selección de los materiales para el prototipo.
- Se diseñará y construirá el prototipo generador de Ozono.
- Se determinará las condiciones de trabajo del prototipo generador de Ozono.

4.2.1.3 Metodología para alcanzar el Objetivo especifico 3

- Se harán pruebas de funcionamiento del equipo en periodos prolongados.
- Se tomarán diferentes muestras de agua a las cuales se les aplicará ozono y se realizará el análisis químico en un laboratorio reconocido y confiable de la ciudad.
- Se visualizará plenamente la efectividad del sistema en cuanto a resultados obtenidos.

4.2.1.4 Metodología para alcanzar el Objetivo especifico 4

- Se dará a conocer los resultados físico, químico, y microbiológico obtenidos de la muestra de agua y analizados en el laboratorio.
- Se demostrará mediante software de simulación el correcto funcionamiento del sistema de control del equipo.
- Se presentará los planos de diseño del equipo generador de ozono.

4.3 Técnicas de trabajo

4.3.1 Técnica de la observación. Esta técnica fue muy importante ya que nos ayudo a tener bien claro y detallado el sistema que se va a implementar, con la finalidad de no dejar ningún factor fuera de análisis y que pueda influir en la efectividad del mismo.

4.3.2 Técnica de la entrevista. Existe en ella convenio del dar y obtener información a través de un proceso de pregunta –respuesta hasta llegar a la obtención de un resultado, tanto personal, técnico como empírico, sobre el objeto de transformación.

Aquí recopilamos experiencias a personas inmersas en el tema de investigación.

Este método se realizo con personas conocedoras del tema las mismas nos supieron orientar en este proceso investigativo y también nos aconsejaron investigar más sobre esta nueva tecnología de tratamiento ya que la misma es efectiva y no es perjudicial para el medio ambiente.

4.4 Instrumentos.

- Difusor de burbujas (oxido de aluminio)
- Mangueras de silicón
- Celda generadora de ozono
- Autotransformador de alto voltaje.
- Disipadores de calor.
- interruptor
- Bomba de aire, compresor
- Fuente de alimentación de 12V dc

- Circuitos electrónicos
- Secador de Aire (silica gel, Alumina activa)

4.5 Equipos

- Computadora
- Impresora
- Papel de impresión
- Cartuchos de tinta
- Cds
- Memorias USB
- Calculadora
- Cámara Fotográfica

4.5.1 Técnicos.

- Instrumentos de medición
- Manuales
- Internet
- Catálogos
- Libros

4.5.2 Tecnológicos

- Software Autocad
- Software Mathcad
- Microsoft Office.
- Isis Proteus 7.6.
- Microsoft excel.

4.6 Resumen de cálculos.

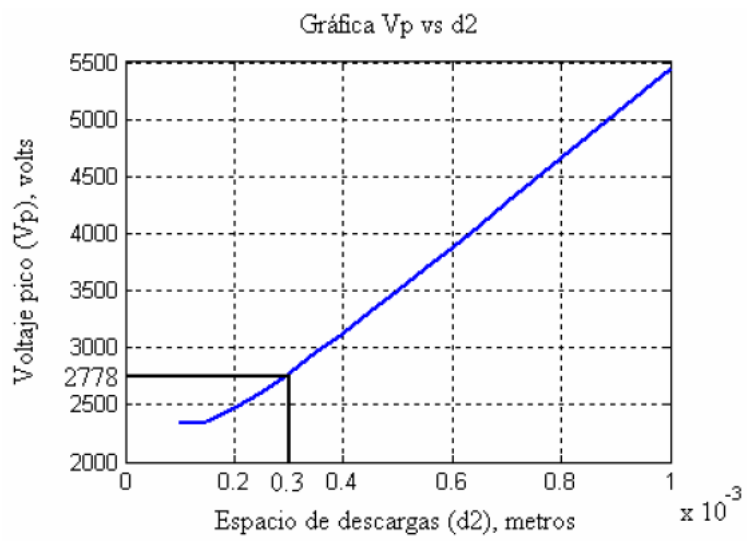
4.6.1 Resumen el cálculo de las dimensiones físicas de la celda generadora de ozono.

A continuación se presenta el cálculo de las dimensiones físicas de la celda generadora de ozono diseñada para este proyecto.

Cálculos de las dimensiones físicas de la celda generadora de ozono

Ds = 2mg/l	Dosis de ozono abalado por la IBWA
Cl = 120 l/h	Capacidad del sistema propuesta.
Aire, como gas de alimentación	Aire con +2ºC de punto de rocío (20.62% de humedad relativa). Representa una alternativa más económica en comparación con el oxígeno de alta pureza.
Ps =135.775 x 10^{3} Pa	Presión absoluta del gas de alimentación P_{atm} + P_{man}(34,47Kpa man)
E_f = 34.58 g/kWh	Eficacia real de la celda cuando se emplea aire como gas de alimentación y un flujo de 2 LPM.
Kd = 1000W/m^2	Presentó buenos resultados con un sistema de enfriamiento por aire.
f = 17500 Hz	Frecuencia.
d_1 = 0.3 x 10^{-3} m	Propuesto como dato inicial. Espesor del dieléctrico
ε_o = 8.854 x 10^{-12} C^2/N.m^2	Permitividad del vacío.
ε_r (mica) = 1.45	Permitividad relativa de la mica encontrada
Kp_1 (aire) = 29.64	Constantes de Paschen cuando se tiene aire como gas de alimentación.
Kp_2 (aire) = 1350	

No. Paso	Parámetro	Fórmula	Cálculo
1	Calcular la producción de ozono	Pd=DsCl ***Ec. (3.1)***	Si Ds= 2mg/l y Cl =120 l/h Pd = 0.24 g/h
2	Elegir gas de alimentación	------	Aire y Ps = 135.775kPa
3	Calcular la potencia a disipar en la celda (Pg) E_f	***Ec. (3.2)*** $Pg = \frac{Pd}{Ef}(\frac{1000W}{1KW})$	Si Pd =0.24 g/h y E_f = 34.58 g/kWh Pg = 6.94 Watts
4	Calcular área de descarga (A)	A=Pg/Kd ***Ec. (3.6)***	Si Pg = 6.94 W y Kd = 1000W/m^2 A= 6.94 mm^2
5	Elegir frecuencia (f), y espesor del dieléctrico (d_1)	------	f = 17.5 kHz y d_1 = 0.3 mm

6	Graficar Vp vs d_2 Aplicar la ecuación (3.9) <u>Datos:</u> f = 17500 Hz ε_o = 8.854 x 10^{-12} $C^2/N.m^2$ ε_r (mica) = 1.45 A = 6.94 x 10^{-3} m^2 d_1 = 0.3 x 10^{-3} m Kp_1 (aire) = 29.64 Kp_2 (aire) = 1350 Ps =135.775 x 10^3 Pa Pg = 6.94 Watts		
7	Elección del voltaje pico Vp y espacio de descarga d_2	------	Vp = 2778 y d_2 = 0.3 mm

8	Evaluación condición de voltaje de ruptura dieléctrica	$Vp \leq Vpmax$	$2778 \leq 13.5kv$ por lo tanto si cumple

9	En resumen las dimensiones físicas y punto de operación de la celda son:	
	Parámetro	
	Voltaje pico	2778 V
	Potencia disipada	6.94 W
	Área de descarga	6.94 mm^2
	Espesor del dieléctrico	0.3 mm
	Espacio de descarga	0.3 Mm

4.6.2 Resumen del cálculo del sistema de enfriamiento del caso de estudio.

Datos iniciales	**Observaciones**
Ac =7.6 mm^2	Área de contacto con el elemento a enfriar
Kt (mica) = 0.44 W/mºC	Conductividad térmica de la mica, tabla 3.3
Kt (acero inox.) = 46 W/mºC	Conductividad térmica del acero inoxidable, tabla 3.3

Δx (dieléctrico) = 0.3 mm	Espesor de la mica, tabla 3.2
Δx (electrodo) = 1mm	Espesor del electrodo de acero inoxidable
Pg = 7 Watts	Potencia eléctrica disipada en la celda. Anexo 1
qe % = 9.94 %	Porcentaje de la potencia **Pg** que se disipada en calor a través de uno de los electrodos, **qe**. Anexo 1
qd % = 10.15 %	Porcentaje de la potencia **Pg** que se disipada en calor a través de uno de los electrodos, **qd**. Anexo 1
ΔT = 1ºC	Diferencia de temperatura entre el espacio de descarga y la temperatura ambiente.

N.Paso	Parámetros	Fórmula	Cálculo
1	Calcular Rdiel, $Relec_1$ y $Relec_2$	$Rdiel = \frac{\Delta x(dielectrico)}{AcKt(mica)}$ $\mathrm{Re}\,lec_1 = \frac{\Delta x(electrodo)}{AcKt(aceroinox.)}$ $\mathrm{Re}\,lec_2 = \mathrm{Re}\,lec_1$	**Rdiel**= 89.24x10^{-3} ºC/W **$Relec_1$**= 2.84x10^{-3} ºC/W **$Relec_2$**= 2.84x10^{-3} ºC/W
2	Calcular qe y qd	$q_e = \frac{Pg(q_e\%)}{100\%}$ $q_d = \frac{Pg(q_d\%)}{100\%}$	**qe** = 0.69 W **qd** = 0.71 W
3	Proponer ΔT	-------	**ΔT** = 1ºC
4	Calcular $Rtermica_1$ y $Rtermica_2$	$Rtermica_1 = \frac{\Delta T}{q_e}$ $Rtermica_2 = \frac{\Delta T}{q_d}$	**$Rtermica_1$**= 1.45 ºC/W **$Rtermica_2$**= 1.4 ºC/W
5	Calcular $Rdis_1$ y $Rdis_2$	$Rdis_1 = Rtermica_1 - \mathrm{Re}\,lec_1$ $Rdis_2 = Rtermica_2 - \mathrm{Re}\,lec_2 - Rdiel$	**$Rdis_1$** = 1.44 ºC/W **$Rdis_2$** = 1.31 ºC/W
6	Elegir disipador-ventilador	Se eligió un disipador de la empresa AAVID THERMALLOY. Número de parte: **61060** , Longitud : 75 mm., Área de superficie: 6.23 mm^2 (THERMALLOY, 2004) Perfil del disipador elegido	

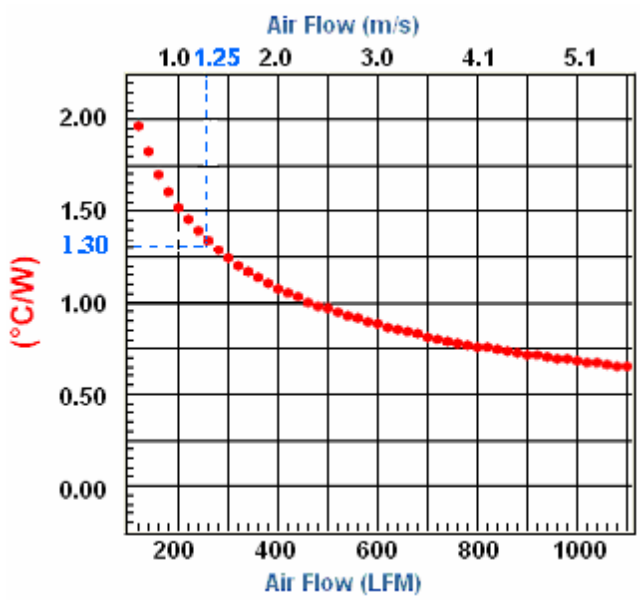
<table>
<tr>
<td></td>
<td></td>
<td colspan="3">


Figura 4.1 Resistencia térmica por convección forzada del disipador elegido

Se eligió el ventilador Modelo: **VN6A-012P** del catálogo Steren. (Steren, 2004.)

Tamaño (mm): 120x120x 25, Voltaje de alimentación: 12 V CD, Corriente de consumo: 450 mA

RPM:3000 , Velocidad del flujo del aire (m/s): 1.25 m/s

De la figura 3.7 se seleccionó como punto de operación una velocidad de **1.25 m/s** y una resistencia térmica **Rsel**. = **1.30 ºC/W**
</td>
</tr>
<tr>
<td>7</td>
<td>Verificar condición</td>
<td>$Rsel \leq Rdis_1$
Y
$Rsel \leq Rdis_2$</td>
<td>$1.30 \leq 1.44$
y
$1.30 \leq 1.425$</td>
<td>Se cumple para ambos casos.</td>
</tr>
</table>

Construcción del prototipo y pruebas de desinfección.

4.7 Elementos que conforman el generador de ozono.

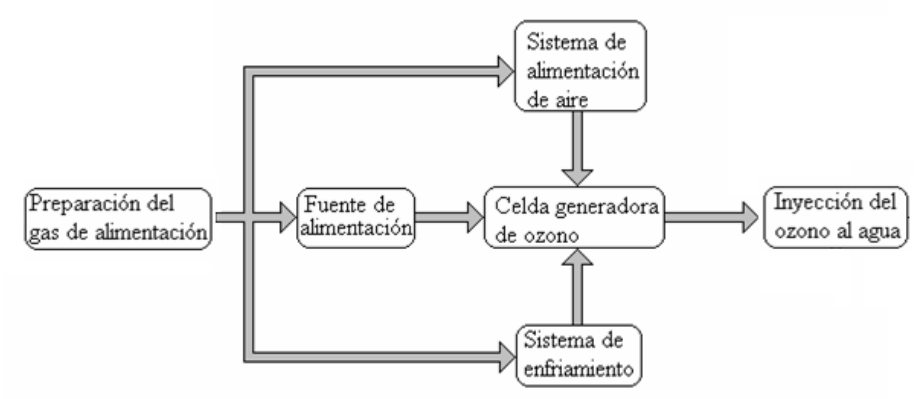


Figura. 4.2 Diagrama de bloques del equipo generador de ozono.

4.7.1 Celda generadora de ozono.

La celda es el elemento principal del equipo generador de ozono, ya que es la encargada de producir el ozono a partir del oxígeno presente en el gas de alimentación.

La metodología de diseño para la celda generadora de ozono se presenta en el capítulo IV. En la tabla 4.1 se presenta un resumen de las especificaciones técnicas de la celda fabricada para este proyecto, y en la figura 4.3 se muestra una foto de esta celda.

Tabla 4.1 Especificaciones técnicas de la celda generadora de ozono

Material de los electrodos	Acero inoxidable 316	Longitud del electrodo	95 mm
Material dieléctrico	Mica (papel pres pan)	Ancho del electrodo	80 mm
Espesor de los electrodos	1mm	Area de descarga	7.6 mm^2
Espacio de descarga	0.3mm	Potencia de consumo	7 W
Espesor del dieléctrico	0.3 mm	Eficacia	34.28 g/kWh

En la siguiente figura se muestra la celda construida para la generación de ozono.

Figura 4.3 Celda generadora de ozono

Para construir la celda de placas paralelas fue necesario seleccionar los materiales adecuados de los electrodos y del dieléctrico. En el caso de los electrodos se utilizó un material que soporta la acción oxidante del gas ozono, este material es el acero inoxidable 316. Para seleccionar el dieléctrico se realizó un estudio de materiales que se utilizan comúnmente en aislamientos de motores eléctricos.

El estudio de los materiales dieléctricos consiste en caracterizar su comportamiento en frecuencia, permitividad relativa y factor de perdida. Además se presenta el procedimiento para seleccionar la forma geométrica de la celda de placas paralelas y sus caracterizaciones eléctricas.

4.7.2 Geometría de la celda.

La geometría de la celda generadora de ozono es uno de los puntos de mayor interés en el diseño de un generador de ozono, ya que ésta determina el tipo de sistema de enfriamiento y la colocación de la misma en el prototipo. Para la selección de la forma geométrica de la celda se analizaron dos celdas una de placas paralelas y una de forma cilíndrica.

En la figura 4.4 se presenta el diagrama esquemático de cada una de las celdas.

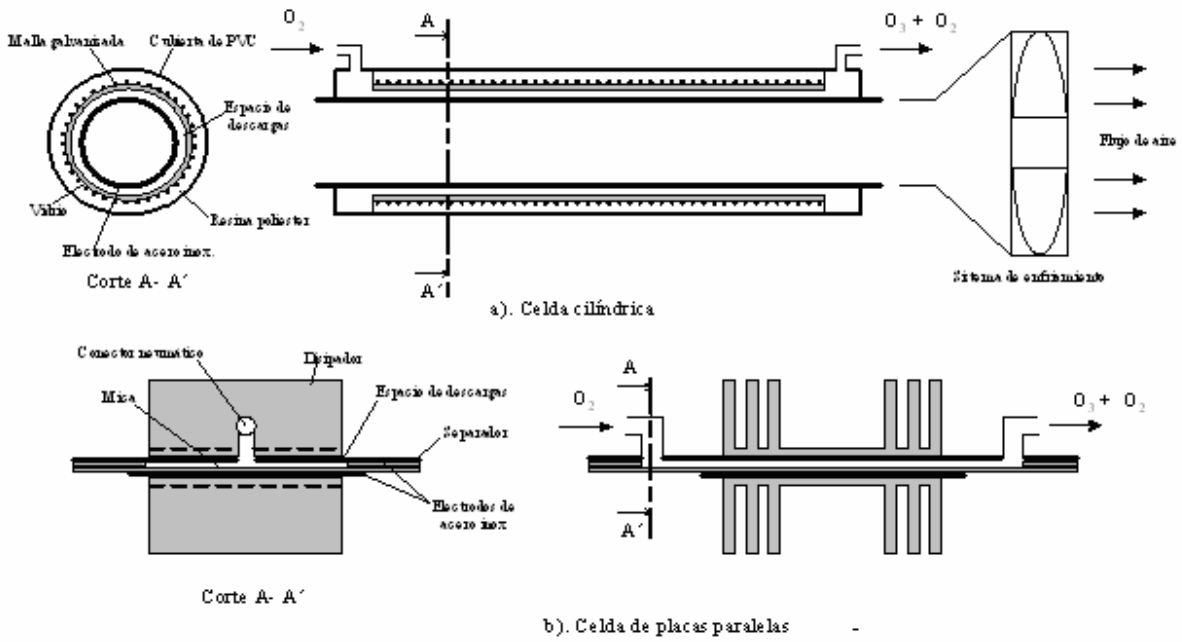


Figura 4.4 Diagrama esquemático. a) Celda cilíndrica b) Celda de placas paralelas

Tabla 4.2 Materiales y dimensiones físicas de las partes que componen las celdas de la figura 4.4

Geometría	**Parte**	**Material**	**Dimensiones**	**Observaciones**
Cilíndrica	Electrodo 1	Tubo de acero inox. 316	Φext = 25.4 mm Espesor = 1.5 mm Long. = 260 mm	----------
	Electrodo 2	Malla galvanizada	Φext = 30.8 mm Espesor = 0.5 mm Long. = 95 mm	----------
	Dieléctrico	Vidrio Pyrex	Φext = 29.8 mm Espesor = 1.2 mm	----------
	Espacio de descargas	----------	1 mm	----------
	Área de descarga	----------	A = 7.58 mm^2	----------
	Sistema de enfriamiento	Ventilador 12 VCD, 5Watt	90x90x25	Enfriamiento por aire
Placas paralelas	Electrodo 1	Lamina de acero inox.316	200 x 150 mm Espesor = 1 mm	----------
	Electrodo 1	Lamina de acero inox.316	95 x 95 mm Espesor = 1 mm	----------
	Dieléctrico	Mica	200 x 150 mm Espesor = 0.3 mm	----------
	Espacio de descargas	----------	0.3 mm	----------
	Área de descarga	----------	A = 7.6 mm^2	----------
	Sistema de enfriamiento	Ventilador 12 VCD, 5Watt	2 disipadores Long= 75mm Ventilador 120x120x25mm	Enfriamiento por aire

4.7.3 Elección de la forma geometría de la celda.

La elección de la forma geométrica de la celda se realizó en base al desempeño mostrado por las celdas analizadas para tal fin. En la tabla 4.2 se resume el procedimiento y los resultados de experimentación en ambas celdas.

Como resultado de la experimentación se encontró que el sistema de enfriamiento de la celda cilíndrica resultó insuficiente, lo cual produce un calentamiento excesivo de la celda y la degradación total del ozono generado.

La razón principal de este comportamiento se debe a que el electrodo interno de una celda cilíndrica se encuentra térmicamente aislado por el material dieléctrico, esta característica, dificulta la disipación de calor y favorece el incremento de la temperatura en la celda.

En contraste, los electrodos de la celda de placas paralelas son externos, esta característica facilita la implementación de disipadores de calor, haciéndola más apta para la generación de ozono.

La celda elegida para la aplicación fue la de ***placas paralelas,*** ya que ésta presentó una buena producción de ozono, estabilidad térmica y requirió 22% menos voltaje para lograr las descargas que en la celda cilíndrica.

4.7.4 Sistema de alimentación de aire.

En este trabajo de investigación se evaluó el desempeño de la celda generadora de ozono con dos gases de alimentación: oxígeno de alta pureza con 99.99% de concentración y aire del ambiente con aproximadamente 21% de oxígeno en volumen y punto de rocío de + 2 ºC (20.62% de humedad relativa).

La selección del gas de alimentación se hizo con respecto a tres factores: concentración de ozono, eficacia y costo.

Cuando el gas de alimentación es oxígeno de alta pureza se evita el problema de la humedad y dada la mayor presencia de oxígeno, en comparación con el aire, se pueden obtener concentraciones de ozono de dos hasta cuatro veces mayores.

La elección de utilizar aire u oxígeno de alta pureza depende de las exigencias de la aplicación. La mayoría de los generadores de ozono utilizan aire como gas de alimentación. Sin embargo, aunque en menor cantidad, se tienen generadores de ozono para aplicaciones de desinfección de agua a gran escala, en los cuales se justifica la inversión de equipo y costo de operación para trabajar con oxígeno de alta pureza.

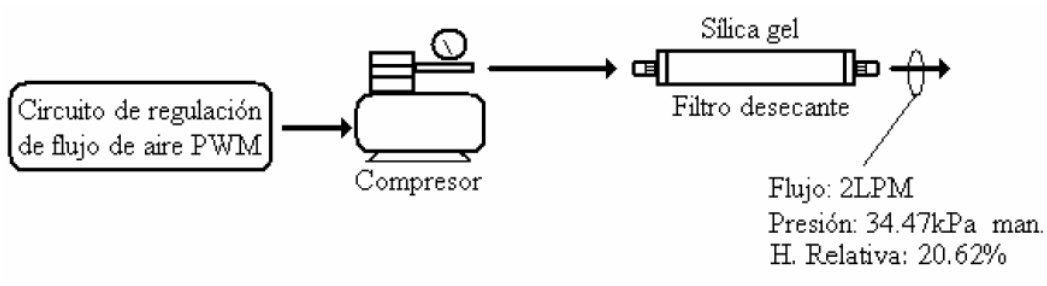


Figura 4.5 Diagrama de bloques del sistema de alimentación de aire

El sistema de alimentación de aire cuenta con un compresor que toma aire del ambiente y lo inyecta al sistema. El flujo de aire de salida del compresor es ajustado a los requerimientos por medio de un circuito PWM, el cual regula la potencia entregada al compresor. En el caso específico de esta aplicación, el PWM se ajustó para que el compresor entregue un flujo de 2 LPM de aire. En el anexo se presenta el diagrama del circuito PWM que se diseño.

El aire que sale del compresor pasa por un filtro desecante, el cual reduce la humedad del aire, obteniéndose en promedio, aire con punto de rocío de +2ºC (20.62% de humedad relativa).

El material empleado como desecante para tal fin es la sílica gel, la cual se comercializa en forma de granos.

Una mejora en el desempeño eléctrico de la celda generadora consiste en reducir el grado de humedad del aire de entrada a la celda. La evaluación de esta mejora puede formar parte de un trabajo futuro.

4.7.5 Sistema de enfriamiento

El sistema de enfriamiento cumple la función de mantener la temperatura de operación de la celda menor a los 50ºC. La capacidad de disipación de calor del sistema de enfriamiento está íntimamente relacionada con el área de descarga. El uso de sistemas de enfriamiento de mayor capacidad permite reducir el área de descarga de la celda, es decir, se puede obtener la misma producción de ozono con áreas de descarga menores, Sin embargo, el uso de sistemas de enfriamiento más elaborados implican costos mayores en su implementación. Se eligió un sistema de enfriamiento por aire, ya que resulta una opción de bajo costo.

El sistema de enfriamiento propuesto está compuesto de dos disipadores de calor colocados sobre los electrodos de la celda, los cuales son enfriados por un flujo de aire proveniente de un ventilador. Los cálculos relativos al sistema de enfriamiento se presentan en el capítulo II. (A., 2004)

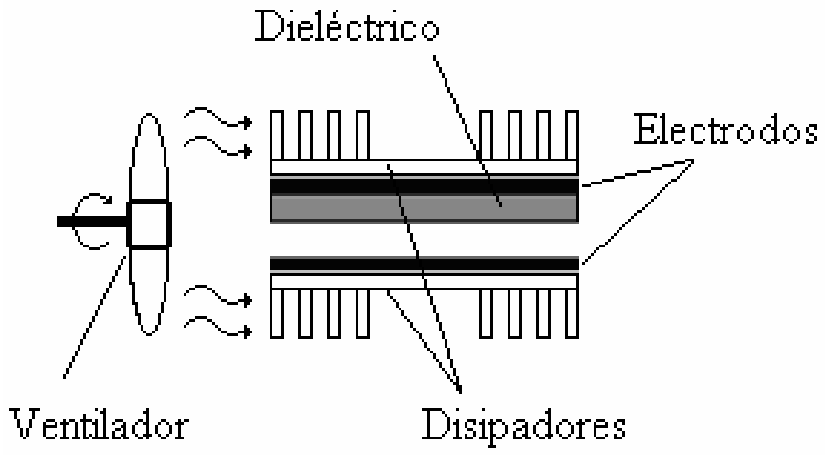


Figura. 4.6 Sistema de enfriamiento de la placa generadora de ozono.

4.7.6 Fuente de alimentación.

En la década de los años setentas las fuentes de poder para generadores de ozono trabajaban a bajas frecuencias (50 a 60 Hz) y los niveles de voltaje que se requerían eran de varios miles de Volts (5,000 a 10,000 Volts). Este tipo de fuentes eran bastante voluminosas, y por los niveles de voltaje de operación, se requería de un mayor grado de aislamiento en la celda y en el transformador de la fuente.

En la década de los años noventas, los fabricantes de generadores de ozono empezaron a utilizar los adelantos tecnológicos de la electrónica de potencia y diseñaron fuentes de poder que operaban en altas frecuencias (más de 1000 Hz). Los beneficios que se obtuvieron fueron: reducir considerablemente el tamaño de las fuentes, disminuir los niveles de voltaje y de aislamiento eléctrico e incrementar la eficiencia de la producción de ozono.

Actualmente, las topologías que más se utilizan en los generadores de ozono, en el rango de alta frecuencia, son: el convertidor flyback, y los inversores medio puente y puente completo.

La figura 4.7 (a) nos indica el circuito de control electrónico construido.

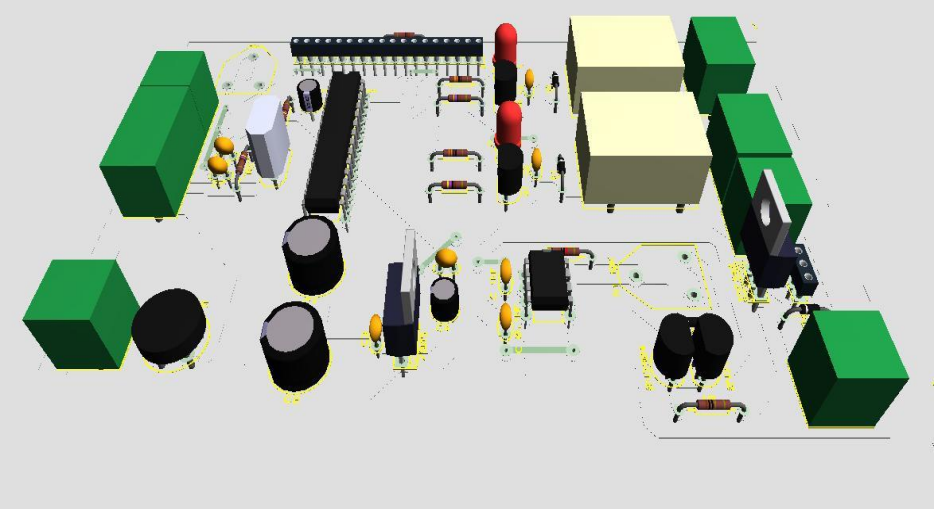


Figura 4.7(a) Fuente de alimentación

La figura 4.7 (b) nos indica el diseño del PCB realizado en ARES PROTEUS

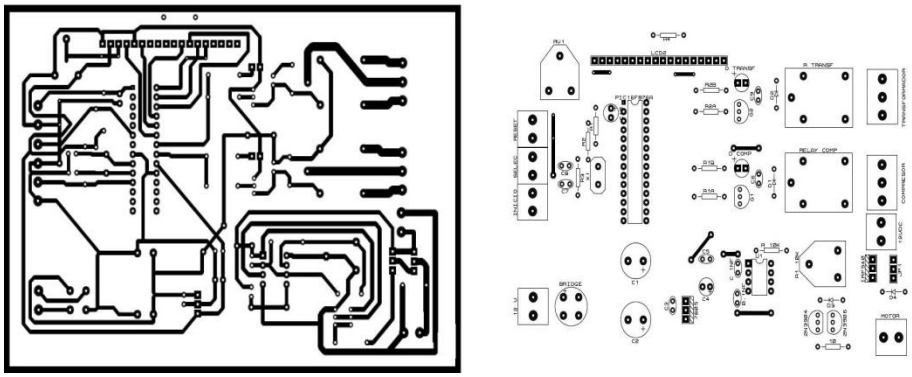


Figura 4.7 (b) Diseño de la placa realizada en Ares Proteus. (www.geocities.com)

A continuación se muestra los costos aproximados para la construcción del prototipo generador de ozono para la potabilización de agua. En la tabla 4.3 se describen los materiales y los costos aproximados del prototipo generador de ozono para la potabilización de agua.

Tabla 4.3 presupuesto del prototipo generador de ozono

Difusor de Burbujas	5,00
Mangueras de presión	20,00
Celda generadora de ozono	50,00
Autotransformador de alto voltaje	90,00
Disipadores de calor	25,00
Interruptores	10,00
Bomba de Aire	50,00
Fuente de 12 V	30,00
Circuitos electrónicos	100,00
Secador de aire	20,00
Extras	100,00
TOTAL	**500,00**

Tabla 4.4 muestra un resumen de los costos aproximados en la investigación realizada.

Consultas bibliográficas	200,00
Recopilación y sistematización de la información	100,00
Cálculos y diseño del generador de ozono	100,00
Materiales para la construcción	600,00
Movilización	300,00
Materiales de oficina	100,00
Gastos de impresión	100,00
Imprevistos	100,00
TOTAL	1500,00

Tabla 4.5 Comparación técnica económica frente a equipos existentes en el mercado

EQUIPO CONSTRUIDO	EQUIPO EXISTENTE EN EL MERCADO
Indicador de datos (LCD).	Marca: ALPINE BETTER LIVING
Circuito de control a través de microcontrolador (PIC).	Modelo: HMA – 300
Temporizador digital.	Procedencia: USA
Filtro secador de aire.	Bomba de aire.
Compresor de aire seco.	Inyección de ozono por medio de tubo venturi.
Electrodos de placas paralelas de acero inoxidable 316.	Temporizador analógico.
Disipadores de calor.	Generación de ozono
Ventilador	Costo aproximado desde $400 en adelante.
Difusor de burbujas.	Volumen de desinfección limitada
Capacidad de desinfección 120l/h	
Producción de ozono 240mg/h	

RESULTADOS

Una vez comprobado el correcto funcionamiento del equipo procedimos a realizar todas las pruebas correspondientes de laboratorio las mismas que se realizaron en el departamento de tratamientos de aguas de la UMAPAL (Loja) con la ayuda de la Ing. Química Rocío Minchala procedimos a realizar los exámenes físico, químicos y microbiológicos de tres muestras de agua las mismas que fueron recolectadas en varios sectores de cantón Paltas.

Con los resultados obtenidos se pudo concluir afirmando que la efectividad del ozono producido por el prototipo generador de ozono es más eficiente que cualquiera de los métodos tradicionales de desinfección.

Los informes de los resultados obtenidos se indican en anexos.

5.1 Operación del generador de ozono.

El equipo generador de ozono cuenta con capacidad de desinfección de 5, 10 y 20 litros de agua por ciclo de trabajo. En los siguientes puntos se plantea la forma en que se opera este equipo para realizar un servicio de desinfección.

1. Con la tecla de selección del panel de control, que se muestra en la figura 5.1, se elige el volumen de agua requerido.

2. El equipo empieza a trabajar en el momento en que se oprime la tecla "inicio" del panel de control. La secuencia de activación de los dispositivos del equipo generador de ozono suceden en el siguiente orden: ventilador, compresor y fuente de alimentación.

Figura 5.1 Panel de control del equipo generador de ozono

3. De acuerdo con el volumen de agua que se selecciona es el tiempo de funcionamiento del equipo generador de ozono, esto se puede apreciar en la tabla 5.1

Tabla 5.1 Tiempos de ozonificación

Volumen de agua (litros)	**Tiempo de ozonificación (minutos)**
20	10
10	5
5	2.5

4. Una vez terminado el tiempo de operación de un servicio de desinfección de agua, se desenergiza la fuente de alimentación y se mantiene trabajando el ventilador y el compresor durante tres segundos para terminar de enfriar la celda y evacuar los residuos de ozono en los mangueras de la celda.

5. El proceso de ozonificación del agua puede ser abortado en cualquier instante oprimiendo la tecla “paro”. Al interrumpir el proceso de ozonificación aparecerá un mensaje en el display que dirá la leyenda: “Incompleto”. Para volver a elegir un volumen de agua se deberá oprimir la tecla de inicio.

6. Después de ozonificar el agua es recomendable dejarla reposar por espacio de 20 minutos para que el ozono contenido en el agua se recombine y termine de actuar sobre los microorganismos patógenos.

La siguiente figura indica la simulación realizada en programa de diseño electrónico en la misma que se puede observar los componentes que se utilizaron en la elaboración del circuito.

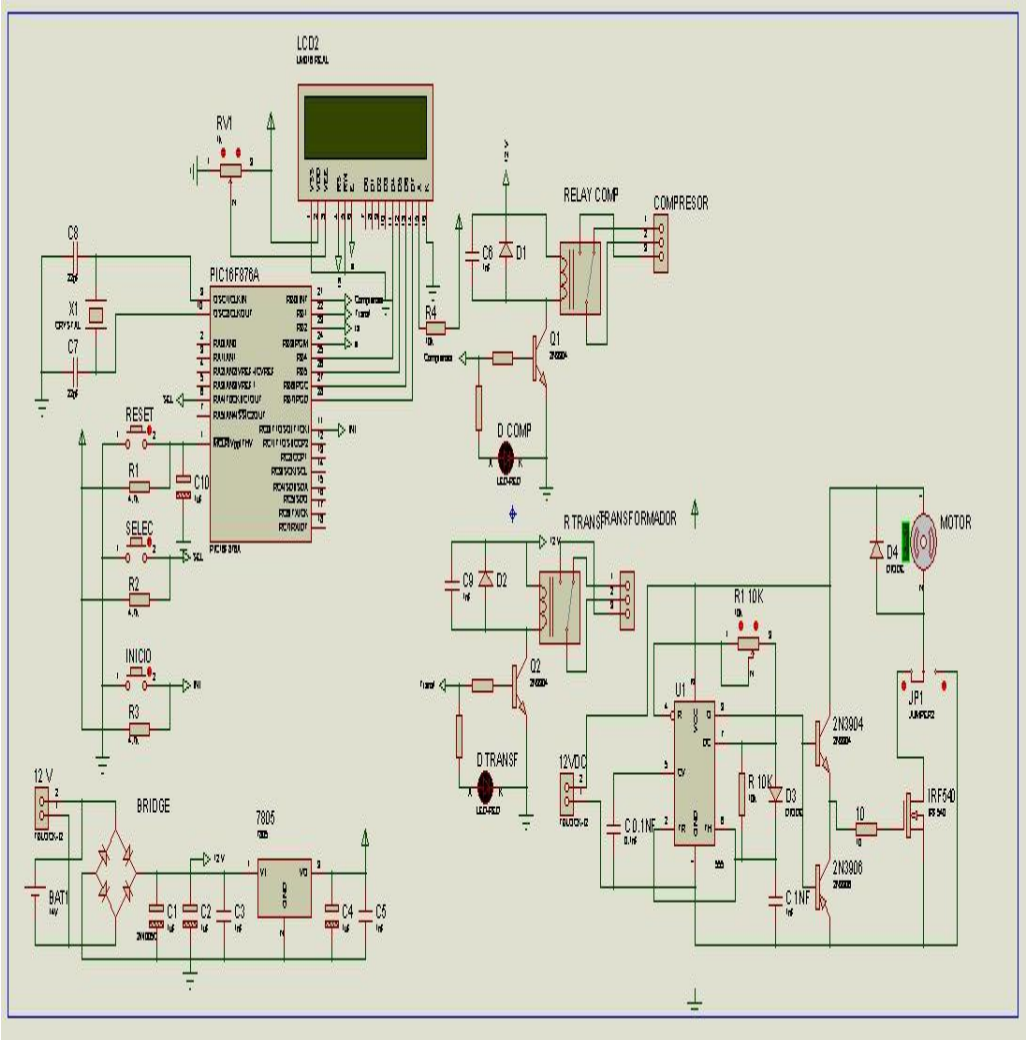


Figura 5 .2 Simulación del circuito de control en Isis proteus 7.6

5.2 Características de diseño del generador de ozono.

Las especificaciones del generador se resumen en la tabla 4.6

Tabla 5.2 Especificaciones técnicas del equipo generador de ozono

Voltaje operación	12 Vcd
Corriente de consumo	3.4 A
Potencia de consumo	40.8 W
Concentración de ozono generado	2mg/l
Producción de ozono	4mg/min
Eficacia del equipo generador de ozono	5.88 g/kWh
Flujo de aire del compresor	2 LPM
Potencia consumida por la celda generadora de ozono	7 W
Eficacia de la celda generadora de ozono	34.28 g/kWh
Punto de rocío promedio del gas de alimentación	+2°C (20.62% de humedad relativa)

En la figura 5.3 se muestra la fotografía el generador de ozono que se desarrollo para este trabajo de investigación.

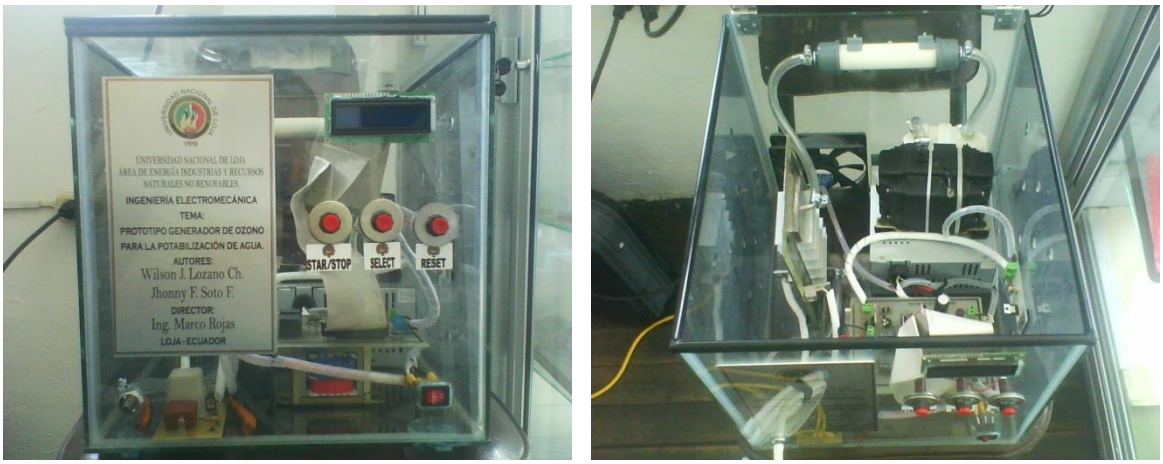


Figura 5.3 Generador de ozono construido.

5.3 Resultados de la experimentación de la acción del ozono en el agua.

5.3.1 Pruebas de ozono residual.

Como se mencionó en el capítulo 1 el proceso de integración del ozono al agua depende de múltiples factores, tales como: la técnica de aplicación del ozono, la temperatura y pH del agua, la presión parcial del gas sobre el líquido (ley de Henry), la difusión del ozono en el agua (ley de Fick), entre otros. Las pruebas de ozono residual ayudan a conocer la concentración máxima que es posible obtener bajo ciertas condiciones de aplicación del ozono al agua.

En la figura 5.4 se muestra el comportamiento de la concentración de ozono residual a variaciones en el tiempo de contacto.

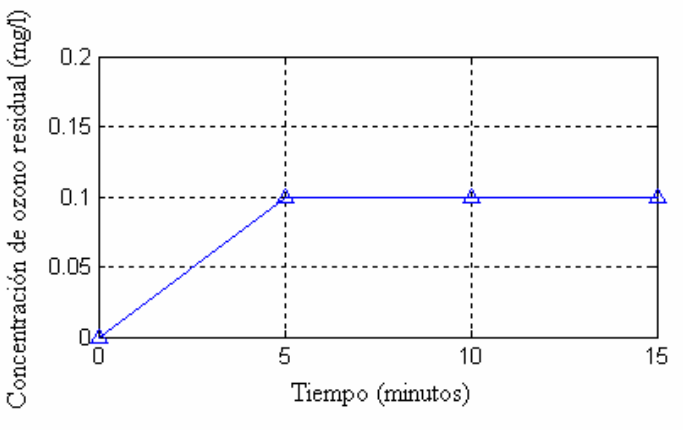


Figura 5.4 Comportamiento del ozono residual a variaciones en el tiempo de contacto

De la figura 5.4 se puede concluir que dada las condiciones de aplicación del ozono al agua evaluado, la concentración máxima de ozono residual que se puede obtener es de ***0.1 mg/l.***

La IBWA recomienda una dosis de 1 a 2mg de ozono por litro de agua aplicados en un tiempo entre 4 y 10 minutos, manteniendo un título de ozono residual de 0.1 a 0.4 mg/l por un tiempo de contacto de 4 a 10 minutos. En conclusión, la concentración máxima de ozono residual obtenida bajo las condiciones probadas se encuentra en el rango aprobado por la IBWA

5.3.2 Pruebas de oxidación.

Las pruebas de oxidación sirven para determinar la acción oxidante del ozono sobre la materia orgánica contenida en el agua. Con esta prueba es posible cuantificar el efecto del flujo del gas en la difusión del ozono en el agua y el efecto de la concentración de ozono en la acción oxidante.

Conclusión: Como resultado de las pruebas se determinó que la dosificación de ozono ideal para la aplicación propuesta es de **2mg de ozono por litro de agua.** Cabe destacar que esta dosificación de ozono está aprobada por la IBWA.

DISCUSIÓN

El propósito fundamental de este proyecto de Tesis fue diseñar y construir un prototipo generador de ozono para la potabilización de agua con materiales y procesos locales, de funcionamiento sencillo y mantenimiento simple, de tecnología accesible y económica, y que principalmente resulte compatible con el medio ambiente preservando el equilibrio ecológico del lugar.

El diseño se realizó en base a los conocimientos adquiridos en la Carrera de Ingeniería Electromecánica durante el transcurso de nuestra formación; cuya capacitación ofrecida por los diferentes docentes fue de gran ayuda para el desarrollo del presente trabajo.

Luego se procedió a la demostración del funcionamiento del sistema propuesto; la cual se la realizó en los laboratorios de la planta de tratamiento de agua de la UMAPAL – LOJA sector Pucará Para el análisis se presentaron 3 muestras tomadas de distintos sectores del cantón Paltas como son barrio "Macandamine", Captación de la estación de bombeo barrio San Pedro Mártir, Agua de pozo (Catacocha) las cuales que fueron analizadas por técnicos de la planta los mismos que dieron constancia del buen funcionamiento del Sistema de ozonificación

La cantidad de ozono producida por el prototipo generador de ozono es de 2mg de ozono por litro de agua la misma que se le aplico a las siguientes muestras en un tiempo 60sg. Con la cual se obtuvieron los siguientes resultados.

- Muestra tomada del sector de Catacocha (agua de pozo) antes de realizar el análisis tenia las siguientes características:

DETERMINACION	RESULTADOS	UNIDAD	METODO	LIMITES PERMISIBLES
COLIFORMES TOTALES	1780	UFC/100ml	MF	No existe
COLIFORMES FECALES	22	UFC/100ml	MF	No existe

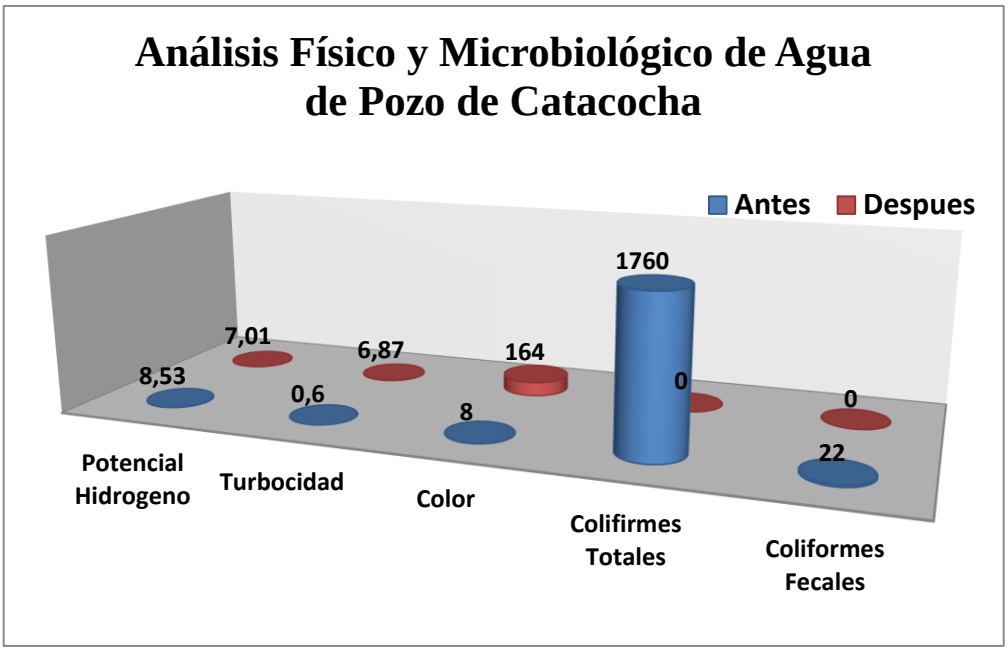
Según el resultado de esta muestra los índices de contaminación no están dentro de los límites permisibles para aguas crudas o sea no está apta para el consumo humano.

Y luego de realizarse el análisis se obtuvo los siguientes resultados:

DETERMINACION	RESULTADOS	UNIDAD	METODO	LIMITES PERMISIBLES
COLIFORMES TOTALES	0	UFC/100ml	MF	Ausencia
COLIFORMES FECALES	0	UFC/100ml	MF	Ausencia

El resultado del análisis nos indica que según el tratamiento realizado por el prototipo generador de ozono el agua purificada está dentro de los límites permisibles para aguas potables.

Tabla 5.3 Análisis físico y microbiológico de agua de pozo Catacocha



- Según los resultados del laboratorio de la muestra tomada del barrio Macandanine Cantón Paltas (agua entubada) antes de realizar el análisis tenia las siguientes características:

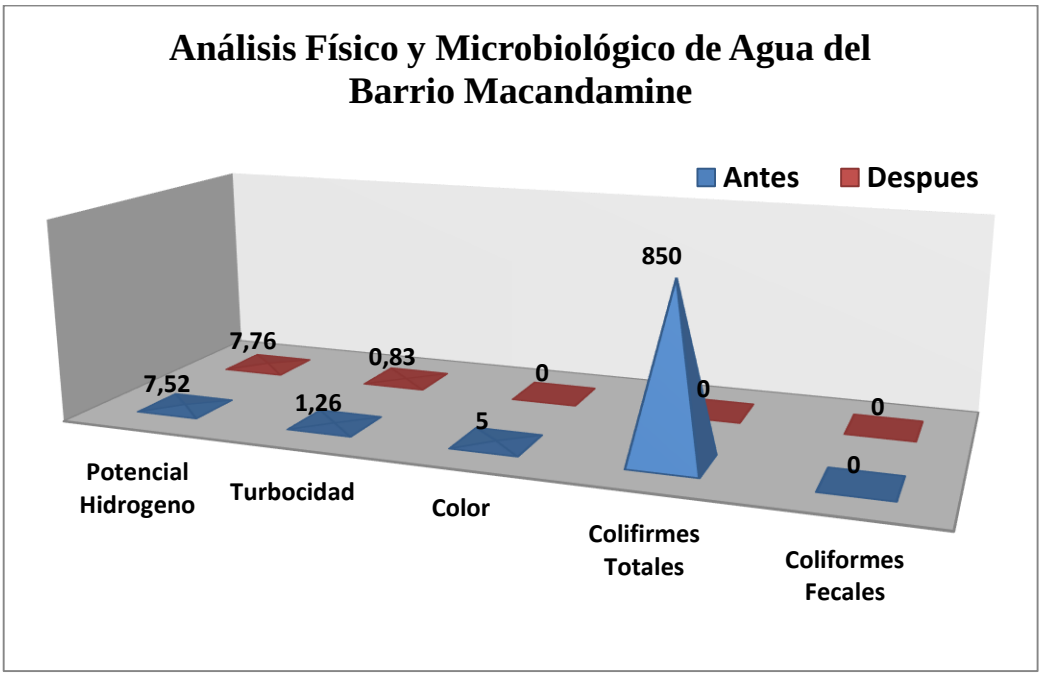
DETERMINACION	RESULTADOS	UNIDAD	METODO	LIMITES PERMISIBLES
COLIFORMES TOTALES	850	UFC/100ml	MF	No existe
COLIFORMES FECALES	0	UFC/100ml	MF	No existe

Y luego de realizarse el análisis se obtuvo los siguientes resultados:

DETERMINACION	RESULTADOS	UNIDAD	METODO	LIMITES PERMISIBLES
COLIFORMES TOTALES	0	UFC/100ml	MF	Ausencia
COLIFORMES FECALES	0	UFC/100ml	MF	Ausencia

El resultado del análisis nos indica que según el tratamiento realizado por el prototipo generador de ozono el agua purificada está dentro de los límites permisibles para aguas potables.

Tabla 5.4 Análisis físico y microbiológico de agua del barrio Macandamine



- Según los resultados del laboratorio de la muestra tomada de la estación de bombeo del Cantón Paltas (captación) antes de realizar el análisis tenia las siguientes características:

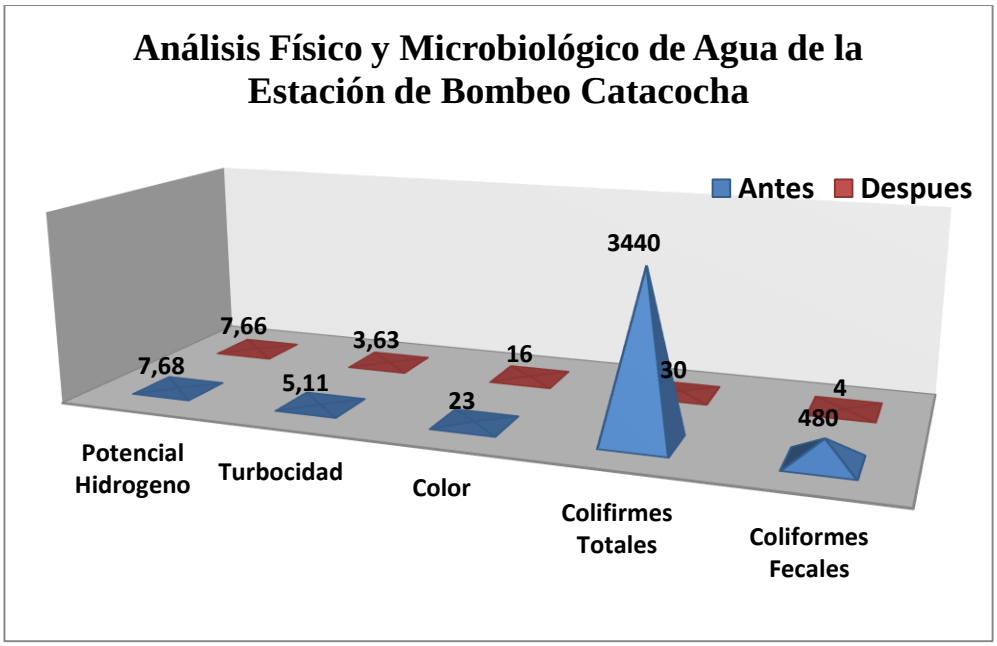
DETERMINACION	RESULTADOS	UNIDAD	METODO	LIMITES PERMISIBLES
COLIFORMES TOTALES	3440	UFC/100ml	MF	No existe
COLIFORMES FECALES	480	UFC/100ml	MF	No existe

Y luego de realizarse el análisis se obtuvo los siguientes resultados:

DETERMINACION	RESULTADOS	UNIDAD	METODO	LIMITES PERMISIBLES
COLIFORMES TOTALES	30	UFC/100ml	MF	Ausencia
COLIFORMES FECALES	4	UFC/100ml	MF	Ausencia

El resultado del análisis nos indica que según el tratamiento realizado por el prototipo generador de ozono el agua purificada está dentro de los límites permisibles para aguas potables.

Tabla 5.5 Análisis físico y microbiológico de agua de la Estación de bombeo Catacocha



De todo lo antes mencionado en los resultados podemos decir que el funcionamiento del prototipo y la generación de ozono están acordes con las normas establecidas por la IBWA para le desinfección de agua los mismos que se pueden verificar con los resultados obtenidos en los laboratorios de la UMAPAL.

- **SISTEMA DE ALIMENTACIÓN DE AIRE**

El sistema de alimentación de aire cuenta con un compresor de 12Vdc. que toma aire del ambiente y lo inyecta al sistema. El flujo de aire de salida del compresor es ajustado a los requerimientos por medio de un circuito electrónico PWM, el cual regula la potencia entregada al compresor. En el caso específico de esta aplicación, el PWM se ajustó para que el compresor entregue un flujo de 2 LPM de aire. En el anexo se presenta el diagrama del circuito **PWM** que se diseño.

El aire que sale del compresor pasa por un filtro desecante, el cual reduce la humedad del aire, obteniéndose en promedio, aire con punto de rocío de +2ºC (20.62% de humedad relativa). El material empleado como desecante para tal fin es la sílica gel, la cual se comercializa en forma de granos.

Una mejora en el desempeño eléctrico de la celda generadora consiste en reducir el grado de humedad del aire de entrada a la celda. La evaluación de esta mejora puede formar parte de un trabajo futuro.

- **GAS DE ALIMENTACIÓN**

La función principal del gas de alimentación es proveer el oxígeno necesario a la celda para generar ozono. El gas de alimentación es otro de los puntos importantes a considerar en el diseño de una celda generadora ozono, ya que éste es un factor que influye en producción de ozono y la eficiencia eléctrica de la celda.

Los cuatro factores principales a considerar en la elección del gas de alimentación son: La concentración de oxígeno, temperatura, humedad y costo.

Se analizaron dos tipos de gas de alimentación: Aire del ambiente con aproximadamente 21% de oxígeno en volumen y punto de rocío de +2 ºC (20.62% de humedad relativa) y oxígeno a 99.9% de pureza con punto de rocío de -60ºC, empleado comúnmente para aplicaciones médicas y de soldadura.

Tomando en cuenta que la concentración de ozono es inversamente proporcional a la presión del gas de alimentación. Al aumentar la presión del gas que se inyecta a la celda, sus moléculas se compactan cada vez más, lo cual limita la aceleración de los electrones que participan en la disociación de las moléculas de oxígeno. Lo anterior produce una débil ionización del gas de alimentación y como consecuencia una reducción en la concentración de ozono.

Un incremento en el flujo del gas de alimentación se traduce en un incremento en la velocidad de sus moléculas que atraviesan el espacio de descarga, lo cual, reduce la oportunidad de que estas moléculas sean ionizadas. Lo anterior ocasiona una menor ionización de este gas y también menor formación de moléculas de ozono.

- **PLACAS PARALELAS**

El presente diseño de celdas de placas paralelas, es para operar enfriadas por aire y usando mica como material dieléctrico.

La geometría de la celda generadora de ozono es uno de los puntos de mayor interés en el diseño de un generador de ozono, ya que ésta determina el tipo de sistema de enfriamiento y la colocación de la misma en el prototipo.

Para la selección de la forma geométrica de la celda se construyeron dos celdas una de placas paralelas y una de forma cilíndrica.

Como resultado de la experimentación se encontró que el sistema de enfriamiento de la celda cilíndrica resultó insuficiente, lo cual produce un calentamiento excesivo de la celda y la degradación total del ozono generado. La razón principal de este comportamiento se debe a que el electrodo interno de una celda cilíndrica se encuentra térmicamente aislado por el material dieléctrico, esta característica, dificulta la disipación de calor y favorece el incremento de la temperatura en la celda. A diferencia, los electrodos de la celda de placas paralelas son externos, esta característica facilita la implementación de disipadores de calor, haciéndola más apta para la generación de ozono.

- **SISTEMA DE CONTROL DEL PROTOTIPO GENERADOR DE OZONO.**

El sistema de control cuenta con un microprocesador **PIC 16F876** el mismo que está programado para temporizar el funcionamiento del compresor, el ventilador y el circuito de elevador de voltaje en varios periodos de tiempo dependiendo de la cantidad de agua que se desee desinfectar y este control se indica en un LCD TS1620A-17.

- **SISTEMA ELEVADOR DE VOLTAJE.**

Actualmente, las topologías que más se utilizan en los generadores de ozono, en el rango de alta frecuencia, son: el convertidor flyback, y los inversores medio puente y puente completo.

El generador de ozono tiene un circuito que genera un alto voltaje entre los electrodos separadas por un aislante, a modo de condensador para que el ozono pueda ser aprovechado utiliza placas paralelas las cuales provocan que las descargas de alto voltaje no sea un simple rayo sino que sean una gran cantidad de estas, ya que cada descarga provoca una pequeña cantidad de ozono.

El circuito multiplica y rectifica el voltaje de entrada de 120Vac a 300Vdc y por medio de un SCR esta carga almacenada en dos condensadores de 225K/2500V es pasada al primario de un transformador que genera a la salida una chispa de alto voltaje en su secundario.

CONCLUSIONES.

- Como conclusión de todos los resultados de los análisis de laboratorio se podrá decir que el funcionamiento del prototipo y la generación de ozono están acordes con las normas internacionales para la potabilización de agua los mismos que se pueden verificar con los resultados obtenidos en los laboratorios de la UMAPAL.
- También se podrá acotar que el rendimiento de nuestro generador de ozono en cuanto a la eliminación de hongos, bacterias, virus resultó eficiente lo cual queda demostrado en los análisis físicos-químicos, y microbiológicos.
- Una vez realizadas las prácticas correspondientes al funcionamiento del sistema, se podrá contrastar la teoría con la práctica y de ésta manera fortalecer e incrementar científica y técnicamente nuestras capacidades cognoscitivas.
- Para este proyecto de tesis, se eligió la celda de placas paralelas, ya que su forma geométrica permitirá una mejor disipación del calor de la celda, para mantener estable la producción de ozono.
- El material dieléctrico seleccionado para una celda de placas paralelas fue la mica, además de su buen desempeño eléctrico y mecánico es resistente a la acción oxidante del gas ozono y es de bajo costo.
- A pesar de la mejor eficiencia eléctrica obtenida con el oxígeno a 99.9% de pureza se eligió aire, con una humedad relativa de 20.62%. Esta decisión se basó en la consideración de análisis de costos, ya que el aire además de satisfacer los requerimientos de generación de ozono para este proyecto, es más económico permitirá un ahorro con respecto al uso del oxígeno.
- Finalmente, se concluyó que los objetivos del presente trabajo fueron cumplidos, y que el método utilizado en la desinfección de agua resulta eficiente, el prototipo resultó de bajo costo y construido con materiales de fácil acceso.

RECOMENDACIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos en la investigación se ha llegado a las siguientes recomendaciones:

1. El tratamiento con ozono es aceptable para el medioambiente. Elimina la necesidad de manipular, almacenar, mantener registros y desechar sustancias químicas tóxicas contempladas en las reglamentaciones gubernamentales que cada vez son más rigurosas.

2. Será necesario continuar el trabajo de investigación y desarrollo de esta tecnología, puesto que la generación de ozono no deja residuos peligrosos ni perjudiciales para la salud.

3. Realizar un rediseño del sistema de control del prototipo ya sea mediante la utilización del un sistema PLC, o a través de micro controladores.

4. Considerar la metodología empleada en la construcción de este prototipo para construir equipos de mayor capacidad tanto en volumen de agua como en generación de ozono.

5. Hacer extensiva la experiencia recogida en el presente trabajo, a los distintos sectores locales y rurales, con el fin aportar con nuevas alternativas para mejorar la calidad del abastecimiento de agua para el consumo humano.

BILIOGRAFÍA

LIBROS:

- Association, A. W. (1998). Water Treatment Plant Desing. xxx: Mc Graw Hill.
- B, L. (1991). Ozone in water treatment appliacation and engineering. Washington DC.: American Water Works Association, Lewis Publishers.
- Bataller L.A., e. (2000). Aplicación del ozono en el tratamiento de agua en embpotelladoras de agua en Cuba. Habana Cuba: centro de investigaciones del ozono.
- J.P., H. (1988). Transferencia de Calor 8.a edición. Madrid España: Mc Graw Hill.
- Javier, R. V. (2003). Procesos de potabilización del agua e influencia del tratamiento de ozonización. Mexico: Diaz de santos S.A.

SITIOS WEB:

- THERMALLOY, A. (2004). Extrusion Profile Catalog www.aavid.com . Recuperado el 13 de JULIO de 2009, de Extrusion Profile Catalog www.aavid.com: http://www.aavidthermalloy.com/
- Carlos, A. (... de marzo de 2002). Desinfeción efectiva de agua embotellada con ozono. Recuperado el ... de septimbre de 2009, de http://acsmedioambiente.com/Lo nuevo.htm
- www.buenastareas.com. (2006). materiales dielectricos. Recuperado el 2009, de http://www.buenastareas.com/ensayos/Materiales-Dielctricos/61125.html
- CLEMENTE SALAZAR, M. T. (.... de ... de 2000). Aspectos básicos para el diseño de un generador de ozono. Recuperado el ..... de marzo de 2009, de http://www.depi.itchihuahua.edu.mx/electro/archivo/electro2000/mem2000/articulos/IN3.pdf

- ENOHSa. (2003). Fundamentaciones de desinfección. Recuperado el junio de 2009, de http://www.frbb.utn.edu.ar/frbb/images/stories/frbb/materias/ingenieria_sanitaria/ENOHSa_Fundamentaciones_Desinfeccion.pdf

- www.geocities.com. (s.f.). Recuperado el 23 de 10 de 2009, de http://www.frino.com.ar/proteus.htm

- L.F, L. C. (2002). Mejora de un generador de ozono para la purificación de agua potable. Recuperado el 13 de noviembre de 2008, de http://lapham25.tripod.com/archivos/prototipo ozono.pdf

- aplications, O. (... de ... de 2004). Ozone effect on effects on specific bacteri, viruses and molds. Recuperado el ... de Octubre de 2009, de www.ozoneapplications.com/info/ozone-bacteria-mold-virus.htm

- A., M. M. (4 de julio de 2004). Introducción a los disipadores de calor en semiconductores de potencia. Recuperado el 22 de mayo de 2009, de http://www.redeya.com/electronica/cursos/disipa

- Mexico, S. d. (... de ... de 1995). Salud Ambiental, agua para uso y consumo humano limites permisibles de calidad y tratamieentos a que debe someterse el agua para su potabilización. Recuperado el .. de mayo de 2009, de www.salud.gob.mx/nom/127ssa.14,zip.

- Steren. (2004.). www.steren.com. Recuperado el 10 de agosto de 2009, de www.steren.com: http://www.steren.com.mx/catalogo/interior1.asp?familia=CABLES%20Y%20ACCESORIOS

- unitek.com. (s.f.). www.unitek.com. Recuperado el agosto de 2009, de http://www.unitek.com.ar/aplicaciones potabilizacion de agua.php

ANEXOS

ANEXO 1

Preparativos	Equipo	Cálculos
Se colocan disipadores de calor sobre los electrodos de la celda. Los disipadores son de la Marca AAVID THERMALLOY, No. de parte: 61060 Longitud: 75mm, Área de sup.: 6.23mm^2 con una resistencia térmica por convección forzada de Rsel = 1.35 °C/W. Se ajusta el consumo de potencia de la celda a 1kW/m^2 de electrodo, es decir, Pg = 7 Watts. Las mediciones de temperatura sobre la celda son tomadas 10 minutos después de haber iniciado su funcionamiento. Lo anterior para que la temperatura medida sea estable. Con ayuda de un termopar se miden las temperaturas: ambiente, de cada uno de los disipadores y de la entrada y salida del gas de alimentación. El gas de alimentación empleado es aire con + 2 °C de punto de rocío (20.62% de humedad relativa), con un flujo de 2 LPM y una presión manométrica de 34.47 kPa. La frecuencia es ajustada a 17.5 kHz y un voltaje eficaz de 2300Vrms.	La celda empleada es la de placas paralelas. Para las mediciones eléctricas se emplea un osciloscopio Tektronics TDS3054B. Termómetro digital con dos termopares Fluke/52-II.	**Cálculo de potencia disipada, qd** Datos: Temperatura ambiente = 25 °C Temperatura disipador = 25.96 °C ΔT= 0.96 °C Rsel.= 1.35 °C/W Pg = 7 W Resolviendo el circuito de la figura A.12a tenemos: $qd = \frac{\Delta T}{Rsel} = \frac{0.96°C}{1.35°C/W} = 0.71W$ $qd(\%) = \frac{qd(100\%)}{Pg} = \frac{0.71W(100\%)}{7W} = 10.15\%$ **Cálculo de potencia disipada, qe** Datos: Temperatura ambiente = 25 °C Temperatura disipador = 25.94°C ΔT= 0.94 °C Rsel.= 1.35 °C/W Pg = 7 W Resolviendo el circuito de la figura A.12b tenemos: $qe = \frac{\Delta T}{Rsel} = \frac{0.94°C}{1.35°C/W} = 0.69W$ $qe(\%) = \frac{qe(100\%)}{Pg} = \frac{0.69W(100\%)}{7W} = 9.94\%$ **Potencia disipada en el gas de alimentación** Datos: Temperatura de entrada: 25°C Temperatura de salida: 25°C ΔT: 0 °C De las mediciones de temperatura realizadas se puede apreciar que no existe un cambio aparente en el nivel energético del gas y por lo tanto la potencia disipada por este medio puede considerarse despreciable.

ANEXO 2

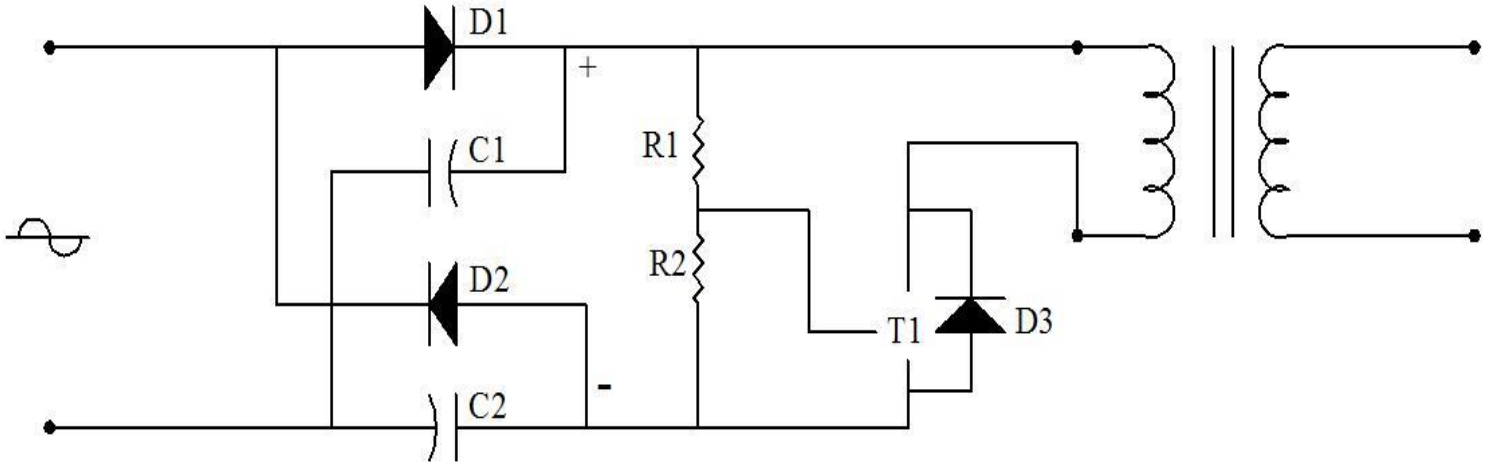


Figura.2 circuito elevador de voltaje

ANEXO 3

Resumen de parámetros y decisiones de diseño encontradas bajo experimentación

Parámetro	**Observación**	
Materiales para la construcción de la celda generadora de ozono		
Electrodos	Acero inoxidable 316	----
Dieléctrico	Mica	Buen desempeño eléctrico, adecuado soporte mecánico y resistencia a la degradación por descargas.
Dimensiones y geometría		
Geometría de la celda	Placas paralelas	Presenta excelente desempeño térmico y una buena producción de ozono.
Área de descarga, **A**	7.58 mm^2	----
Espacio de descargas, **d2**	0.3 mm	----
Espesor del dieléctrico, **d1**	0.3 mm	----
Parámetros neumáticos de operación		
Gas de alimentación	Aire del ambiente	Representa una alternativa más económica en comparación con el oxígeno.
Punto de rocío del gas de alimentación	+ 2 ºC (20.62% de humedad relativa)	----
Presión del gas de alimentación	Pm = 34.47 kPa man. Ps = 135.775 kPa abs.	----
Flujo del gas de alimentación, φ**g**	2 LPM	Favorece el proceso de oxidación y la eficacia de la celda generadora.
Parámetros eléctricos		
Frecuencia de operación, **f**	17.5 kHz	A esta frecuencia la celda presentó su valor máximo de eficacia.
Voltaje de alimentación, **Vg**	2300 Vrms	Voltaje necesario para generar una concentración de 2g/Nm^3.
Potencia de consumo de la celda generadora de ozono, **Pg**	7 W	Consumo de potencia de la celda generadora.
Eficiencia eléctrica máxima, **η**	2.88 %	Obtenidos empleando aire a +2 ºC de punto de rocío (20.62% de humedad relativa) como gas de alimentación.
Eficacia máxima, $\mathbf{E_f}$	34.58 g/kWh	
Densidad de potencia, **Kd**	1000W/m^2	Presentó buenos resultados con un sistema de enfriamiento por aire.
Parámetros térmicos		
Potencia total disipada en calor, **qt (%)**	20.09 %	Datos calculados cuando la celda opera con una densidad de potencia **Kd** de 1kW/m^2.
Potencia disipada por el electrodo adherido al dieléctrico, **qd (%)**	10.15 %	
Potencia disipada por el otro electrodo, **qe (%)**	9.94 %	
Potencia arrastrada por el gas de alimentación.	despreciable	

ANEXO 6

MUESTRA TOMADA ESTACIÓN DE BOMBEO CATACOCHA

MUNICIPIO DE LOJA

Unidad Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Loja

I. MUNICIPIO DE LOJA UMAPAL TRABAJANDO POR USTED LOJA PARA TODOS

ANALISIS FÍSICO - QUÍMICO

Solicitado por: Estudiantes de UNL Electromecánica	**INFORME Nro :** 2095
Procedencia: Estación de bombeo ANTES	**CODIGO:** LU-2081
Fecha y Hora de recolección de la muestra: 08/10/2009 08H40	
Fecha y Hora de recepción de la muestra: 08/10/2009 16H00	
Fecha y análisis de la muestra: 08/10/2009 16H30	
Presesntación y cantidad: Envase plástico estéril	
Tipo de muestra: Agua Entubada	
Muestreador: Wilson Lozano	

CARACTERISTICAS FÍSICAS

PARÁMETRO	UNIDADES	RESULTADOS	NIVEL RECOMENDADO	MÁXIMA CONCENTRACIÓN ADMISIBLE
Potencial Hidrógeno	pH	7,68	6,5 - 8,5	
Turbiedad	NTU	5,11	1	
Color	Pt/Co	23	1	

CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS

PARÁMETROS	UNIDADES	RESULTADOS	NIVEL RECOMENDADO	MÁXIMA CONCENTRACIÓN ADMISIBLE
Alc.Total como CaCO3	mg/L	45		200
D.Total como CaCO3	mg/L	35,02		
Manganeso	mg/L	0,01		
Hierro Total (Fe++)	mg/L	0,37	50	300
Cobre (Cu++)	mg/L	0	0	1
Sulfatos	mg/L	8	25	250
Nitrogeno Amoniaco	mg/L	0,29	0,05	0,5
Conductividad Eléctrica	µs/cm	89,2	400	1500
Fosfatos	mg/L	2,04	2,04	5
Fluoruros	mg/L	0	0	2

OBSERVACIONES:

Los Limites considerables corresponden exclusivamente para agua potable

RESPONSABLE:

Ing. Cristina Vélez
QUIMICO UMAPAL

Dr. Adalberto Gallo
QUIMICO UMAPAL

I. MUNICIPIO DE LOJA UMAPAL TRABAJANDO POR USTED

MUNICIPIO DE LOJA

Unidad Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Loja

I. MUNICIPIO DE LOJA UMAPAL TRABAJANDO POR USTED LOJA PARA TODOS

ANÁLISIS MICROBIOLOGICO

Solicitado por: Estudiantes de la UNL Electromecanica		**INFORME Nro** 2095
Procedencia: Estación de Bombeo ANTES		**CODIGO:** LU- 2081
Fecha y hora de recolecciòn de la muestra: 08/10/2009 08H40		
Fecha y hora de recepción de la muestra: 08/10/2009 16H00		
Fecha y Análisis de la muestra: 08/10/2009 16H30		
Presentación y Cantidad: Envase plástica esteril		
Tipo de muestra: Agua Entubada		
Muestreador: Wilson Lozano		

ANÁLISIS REALIZADO

DETERMINACION	RESULTADOS	UNIDAD	METODO	LIMITES PERMISIBLES
COLIFORMES TOTALES	3440	UFC/100ml	MF	No existe
COLIFORMES FECALES	480	UFC/100ml	MF	No existe

OBSERVACIONES:

No existen limites permisibles para aguas Crudas

RESPONSABLES:

UNIDAD MUNICIPAL DE AGUA POTABLE Y ALCANTARILLADO UMAPAL LABORATORIO «LOJA»

Rocío Minchala de R.

Ing. Rocio Minchala S.
QUIMICO UMAPAL

I. MUNICIPIO DE LOJA UMAPAL TRABAJANDO POR USTED

MUNICIPIO DE LOJA

Unidad Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Loja

ANALISIS FÍSICO - QUÍMICO

Solicitado por: Estudiantes de UNL Electromecánica	**INFORME Nro :** 2096
Procedencia: Estación de bombeo DESPUES	**CODIGO:** LU-2081
Fecha y Hora de recolección de la muestra: 08/10/2009 08H50	
Fecha y Hora de recepción de la muestra: 08/10/2009 16H00	
Fecha y análisis de la muestra: 08/10/2009 16H30	
Presesntación y cantidad: Envase plástico estéril	
Tipo de muestra: Agua Ozonificada	
Muestreador: Jhony Soto	

CARACTERISTICAS FÍSICAS

PARÁMETRO	UNIDADES	RESULTADOS	NIVEL RECOMENDADO	MÁXIMA CONCENTRACIÓN ADMISIBLE
Potencial Hidrógeno	pH	7,66	6,5 - 8,5	
Turbiedad	NTU	3,63	1	
Color	Pt/Co	16	1	

CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS

PARÁMETROS	UNIDADES	RESULTADOS	NIVEL RECOMENDADO	MÁXIMA CONCENTRACIÓN ADMISIBLE
Alc.Total como CaCO3	mg/L	50		200
D.Total como CaCO3	mg/L	30,9		
Manganeso	mg/L	0,27		
Hierro Total (Fe++)	mg/L	1,62	50	300
Cobre (Cu++)	mg/L	0,03	0	1
Sulfatos	mg/L	0	25	250
Nitrogeno Amoniaco	mg/L	0,4	0,05	0,5
Conductividad Eléctrica	µs/cm	98,1	400	1500
Fosfatos	mg/L	0,27	0,4	5
Fluoruros	mg/L	0,16		2

OBSERVACIONES:

Los Limites considerables corresponden exclusivamente para agua potable

RESPONSABLE:

Ing. Cristina Vélez	Ing. Rocio Minchala	Dr. Adalberto Gallo
QUIMICO UMAPAL	**QUIMICO UMAPAL**	**QUIMICO UMAPAL**

UNIDAD MUNICIPAL DE AGUA POTABLE Y ALCANTARILLADO UMAPAL LABORATORIO «LOJA»

MUNICIPIO DE LOJA

Unidad Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Loja

I. MUNICIPIO DE LOJA
UMAPAL
TRABAJANDO POR USTED
LOJA PARA TODOS

ANÁLISIS MICROBIOLOGICO

Solicitado por: Estudiantes de la UNL Electromecanica	**INFORME Nro** 2096
Procedencia: Estación de Bombeo DESPUES	**CODIGO:** LU- 2082
Fecha y hora de recolecciòn de la muestra: 08/10/2009 08H50	
Fecha y hora de recepción de la muestra: 08/10/2009 16H00	
Fecha y Análisis de la muestra: 08/10/2009 16H30	
Presentación y Cantidad: Envase plástica esteril	
Tipo de muestra: Agua Ozonificada	
Muestreador: Jhonny Soto	

ANÁLISIS REALIZADO

DETERMINACION	RESULTADOS	UNIDAD	METODO	LIMITES PERMISIBLES
COLIFORMES TOTALES	30	UFC/100ml	MF	Ausencia
COLIFORMES FECALES	4	UFC/100ml	MF	Ausencia

OBSERVACIONES:
Los limites permisibles corresponden a aguas potables.

RESPONSABLES:

UNIDAD MUNICIPAL DE AGUA POTABLE Y ALCANTARILLADO UMAPAL LABORATORIO LOJA

Rocío Minchala de R

Ing. Rocio Minchala S.
QUIMICO UMAPAL

I. MUNICIPIO DE LOJA
UMAPAL
TRABAJANDO POR USTED

ANEXO 4

MUESTRA TOMADA BARRIO MACANDAMINE - PALTAS

MUNICIPIO DE LOJA

Unidad Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Loja

ANALISIS FÍSICO - QUÍMICO

Solicitado por: Estudiantes de UNL Electromecánica	**INFORME Nro :** 2093
Procedencia: Barrio Macandamine Cantón Paltas ANTES	**CODIGO:** LU-2079
Fecha y Hora de recolección de la muestra: 08/10/2009 07H30	
Fecha y Hora de recepción de la muestra: 08/10/2009 16H00	
Fecha y análisis de la muestra: 08/10/2009 16H30	
Presesntación y cantidad: Envase plástico estéril	
Tipo de muestra: Agua entubada	
Muestreador: Wilson Lozano	

CARACTERISTICAS FÍSICAS

PARÁMETRO	UNIDADES	RESULTADOS	NIVEL RECOMENDADO	MÁXIMA CONCENTRACIÓN ADMISIBLE
Potencial Hidrógeno	pH	7,52	6,5 - 8,5	
Turbiedad	NTU	1,26	1	
Color	Pt/Co	5	1	

CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS

PARÁMETROS	UNIDADES	RESULTADOS	NIVEL RECOMENDADO	MÁXIMA CONCENTRACIÓN ADMISIBLE
Alc.Total como CaCO3	mg/L	152		200
D.Total como CaCO3	mg/L	167,89		
Manganeso	mg/L	0		
Hierro Total (Fe++)	mg/L	0	50	300
Cobre (Cu++)	mg/L	0	0	1
Sulfatos	mg/L	17	25	250
Nitrogeno Amoniaco	mg/L	0,15	0,05	0,5
Conductividad Eléctrica	µs/cm	321	400	1500
Fosfatos	mg/L	0,22	0,4	5
Fluoruros	mg/L	0,02		2

OBSERVACIONES:

Los Limites considerables corresponden exclusivamente para agua potable

RESPONSABLE:

Ing. Cristina Vélez
QUIMICO UMAPAL

Dr. Edalberto Gallo
QUIMICO UMAPAL

UNIDAD MUNICIPAL DE AGUA POTABLE Y ALCANTARILLADO UMAPAL LABORATORIO LOJA

MUNICIPIO DE LOJA

Unidad Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Loja

I. MUNICIPIO DE LOJA UMAPAL TRABAJANDO POR USTED LOJA PARA TODOS

ANÁLISIS MICROBIOLOGICO

Solicitado por: Estudiantes de la UNL Electromecanica		**INFORME Nro** 2093
Procedencia: Barrio Macandamine Cantón Paltas ANTES		**CODIGO:** LU- 2079
Fecha y hora de recolecciòn de la muestra: 08/10/2009 07H30		
Fecha y hora de recepción de la muestra: 08/10/2009 16H00		
Fecha y Análisis de la muestra: 08/10/2009 16H30		
Presentación y Cantidad: Envase plástica esteril		
Tipo de muestra: Agua entubada		
Muestreador: Wilson Lozano		

ANÁLISIS REALIZADO

DETERMINACION	RESULTADOS	UNIDAD	METODO	LIMITES PERMISIBLES
COLIFORMES TOTALES	850	UFC/100ml	MF	No existe
COLIFORMES FECALES	0	UFC/100ml	MF	No existe

OBSERVACIONES:

No existen limites permisibles para aguas Crudas

RESPONSABLES:

UNIDAD MUNICIPAL DE AGUA POTABLE Y ALCANTARILLADO UMAPAL LABORATORIO «LOJA»

Rocío Minchala de R

Ing. Rocio Minchala S.
QUIMICO UMAPAL

I. MUNICIPIO DE LOJA UMAPAL TRABAJANDO POR USTED

MUNICIPIO DE LOJA

Unidad Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Loja

I. MUNICIPIO DE LOJA
UMAPAL
TRABAJANDO POR USTED
LOJA PARA TODOS

ANALISIS FÍSICO - QUÍMICO

Solicitado por: Estudiantes de UNL Electromecánica — **INFORME Nro :** 2094
Procedencia: Barrio Macandamine Cantón Paltas DESPUES — **CODIGO:** LU-2080
Fecha y Hora de recolección de la muestra: 08/10/2009 08H30
Fecha y Hora de recepción de la muestra: 08/10/2009 16H00
Fecha y análisis de la muestra: 08/10/2009 16H30
Presesntación y cantidad: Envase plástico estéril
Tipo de muestra: Agua Ozonificada
Muestreador: Jhony soto

CARACTERISTICAS FÍSICAS

PARÁMETRO	UNIDADES	RESULTADOS	NIVEL RECOMENDADO	MÁXIMA CONCENTRACIÓN ADMISIBLE
Potencial Hidrógeno	pH	7,76	6,5 - 8,5	
Turbiedad	NTU	0,63	1	
Color	Pt/Co	0	1	

CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS

PARÁMETROS	UNIDADES	RESULTADOS	NIVEL RECOMENDADO	MÁXIMA CONCENTRACIÓN ADMISIBLE
Alc.Total como CaCO3	mg/L	145		200
D.Total como CaCO3	mg/L	131,84		
Manganeso	mg/L	0		
Hierro Total (Fe++)	mg/L	0,01	50	300
Cobre (Cu++)	mg/L	0	0	1
Sulfatos	mg/L	30	25	250
Nitrogeno Amoniaco	mg/L	0,24	0,05	0,5
Conductividad Eléctrica	µs/cm	324	400	1500
Fosfatos	mg/L	0,29	0,4	5
Fluoruros	mg/L	0		2

OBSERVACIONES:
Los Limites considerables corresponden exclusivamente para agua potable
RESPONSABLE:

Ing. Cristina Vélez
QUIMICO UMAPAL

Dr. Adalberto Gallo
QUIMICO UMAPAL

UNIDAD MUNICIPAL DE AGUA POTABLE Y ALCANTARILLADO UMAPAL LABORATORIO LOJA

MUNICIPIO DE LOJA

Unidad Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Loja

I. MUNICIPIO DE LOJA
UMAPAL
TRABAJANDO POR USTED
LOJA PARA TODOS

ANÁLISIS MICROBIOLOGICO

Solicitado por: Estudiantes de la UNL Electromecanica	**INFORME Nro** 2094
Procedencia: Barrio Macandamine Cantón Paltas DESPUES	**CODIGO:** LU- 2080
Fecha y hora de recolecciòn de la muestra: 08/10/2009 08H30	
Fecha y hora de recepción de la muestra: 08/10/2009 16H00	
Fecha y Análisis de la muestra: 08/10/2009 16H30	
Presentación y Cantidad: Envase plástica esteril	
Tipo de muestra: Agua Ozonificada	
Muestreador: Jhonny Soto	

ANÁLISIS REALIZADO

DETERMINACION	RESULTADOS	UNIDAD	METODO	LIMITES PERMISIBLES
COLIFORMES TOTALES	0	UFC/100ml	MF	Ausencia
COLIFORMES FECALES	0	UFC/100ml	MF	Ausencia

OBSERVACIONES:
Los limites permisibles corresponden a aguas potables.

RESPONSABLES:

UNIDAD MUNICIPAL DE AGUA POTABLE Y ALCANTARILLADO UMAPAL LABORATORIO « LOJA »

Rocío Minchala de P.

Ing. Rocio Minchala S.
QUIMICO UMAPAL

I. MUNICIPIO DE LOJA
UMAPAL
TRABAJANDO POR USTED

ANEXO 5

MUESTRA TOMADA POZO CATACOCHA

MUNICIPIO DE LOJA

Unidad Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Loja

ANALISIS FÍSICO - QUÍMICO	
Solicitado por: Estudiantes de UNL Electromecánica	**INFORME Nro :** 2097
Procedencia: Pozo en Catacocha ANTES	**CODIGO:** LU-2083
Fecha y Hora de recolección de la muestra: 08/10/2009 08H00	
Fecha y Hora de recepción de la muestra: 08/10/2009 16H00	
Fecha y análisis de la muestra: 08/10/2009 16H30	
Presesntación y cantidad: Envase plástico estéril	
Tipo de muestra: Agua Subterranea	
Muestreador: Wilson Lozano	

CARACTERISTICAS FÍSICAS

PARÁMETRO	UNIDADES	RESULTADOS	NIVEL RECOMENDADO	MÁXIMA CONCENTRACIÓN ADMISIBLE
Potencial Hidrógeno	pH	6,53	6,5 - 8,5	
Turbiedad	NTU	0,6	1	
Color	Pt/Co	8	1	

CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS

PARÁMETROS	UNIDADES	RESULTADOS	NIVEL RECOMENDADO	MÁXIMA CONCENTRACIÓN ADMISIBLE
Alc.Total como CaCO3	mg/L	120		200
D.Total como CaCO3	mg/L	14,42		
Manganeso	mg/L	1,08		
Hierro Total (Fe++)	mg/L	0	50	300
Cobre (Cu++)	mg/L	0,06	0	1
Sulfatos	mg/L	56	25	250
Nitrogeno Amoniaco	mg/L	0,19	0,05	0,5
Conductividad Eléctrica	µs/cm	1261	400	1500
Fosfatos	mg/L	0,45	0,4	5
Fluoruros	mg/L	0,07		2

OBSERVACIONES:

Los Limites considerables corresponden exclusivamente para agua potable

RESPONSABLE:

Ing. Cristina Vélez	Ing. Rocio Minchala	Dr. Adalberto Gallo
QUIMICO UMAPAL	**QUIMICO UMAPAL**	**QUIMICO UMAPAL**

MUNICIPIO DE LOJA

Unidad Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Loja

I. MUNICIPIO DE LOJA UMAPAL TRABAJANDO POR USTED LOJA PARA TODOS

ANÁLISIS MICROBIOLOGICO

Solicitado por: Estudiantes de la UNL Electromecanica		**INFORME Nro** 2097
Procedencia: Pozo en Catacocha ANTES		**CODIGO:** LU- 2083
Fecha y hora de recolecciòn de la muestra: 08/10/2009 09H00		
Fecha y hora de recepción de la muestra: 08/10/2009 16H00		
Fecha y Análisis de la muestra: 08/10/2009 16H30		
Presentación y Cantidad: Envase plástica esteril		
Tipo de muestra: Agua Subterranea		
Muestreador: Wilson Lozano		

ANÁLISIS REALIZADO

DETERMINACION	RESULTADOS	UNIDAD	METODO	LIMITES PERMISIBLES
COLIFORMES TOTALES	1760	UFC/100ml	MF	No existe
COLIFORMES FECALES	22	UFC/100ml	MF	No existe

OBSERVACIONES:

No existen limites permisibles para aguas Crudas

RESPONSABLES:

UNIDAD MUNICIPAL DE AGUA POTABLE Y ALCANTARILLADO UMAPAL LABORATORIO LOJA

Rocío Minchala de P.

Ing. Rocio Minchala S.

QUIMICO UMAPAL

I. MUNICIPIO DE LOJA UMAPAL TRABAJANDO POR USTED

MUNICIPIO DE LOJA

Unidad Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Loja

I. MUNICIPIO DE LOJA UMAPAL TRABAJANDO POR USTED LOJA PARA TODOS

ANÁLISIS MICROBIOLOGICO

Solicitado por: Estudiantes de la UNL Electromecanica		**INFORME Nro** 2098
Procedencia: Pozo de Catacocha DESPUES		**CODIGO:** LU- 2084
Fecha y hora de recolecciòn de la muestra: 08/10/2009 09H10		
Fecha y hora de recepción de la muestra: 08/10/2009 16H00		
Fecha y Análisis de la muestra: 08/10/2009 16H30		
Presentación y Cantidad: Envase plástica esteril		
Tipo de muestra: Agua Ozonificada		
Muestreador: Jhonny Soto		

ANÁLISIS REALIZADO

DETERMINACION	RESULTADOS	UNIDAD	METODO	LIMITES PERMISIBLES
COLIFORMES TOTALES	0	UFC/100ml	MF	Ausencia
COLIFORMES FECALES	0	UFC/100ml	MF	Ausencia

OBSERVACIONES:

Los limites permisibles corresponden a aguas potables.

RESPONSABLES:

UNIDAD MUNICIPAL DE AGUA POTABLE Y ALCANTARILLADO UMAPAL LABORATORIO LOJA

Rocío Minchala de R

Ing. Rocio Minchala S.

QUIMICO UMAPAL

I. MUNICIPIO DE LOJA UMAPAL TRABAJANDO POR USTED

MUNICIPIO DE LOJA

Unidad Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Loja

ANALISIS FÍSICO - QUÍMICO

Solicitado por: Estudiantes de UNL Electromecánica	**INFORME Nro :** 2098
Procedencia: Agua del pozo de Catacocha DESPUES	**CODIGO:** LU-2084
Fecha y Hora de recolección de la muestra: 08/10/2009 09H10	
Fecha y Hora de recepción de la muestra: 08/10/2009 16H00	
Fecha y análisis de la muestra: 08/10/2009 16H30	
Presesntación y cantidad: Envase plástico estéril	
Tipo de muestra: Agua Ozonificada	
Muestreador: Jhony Soto	

CARACTERISTICAS FÍSICAS

PARÁMETRO	UNIDADES	RESULTADOS	NIVEL RECOMENDADO	MÁXIMA CONCENTRACIÓN ADMISIBLE
Potencial Hidrógeno	pH	7,01	6,5 - 8,5	
Turbiedad	NTU	6,87	1	
Color	Pt/Co	164	1	

CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS

PARÁMETROS	UNIDADES	RESULTADOS	NIVEL RECOMENDADO	MÁXIMA CONCENTRACIÓN ADMISIBLE
Alc.Total como CaCO3	mg/L	191		200
Manganeso	mg/L	0,94		
Hierro Total (Fe++)	mg/L	0,19	50	300
Cobre (Cu++)	mg/L	0	0	1
Sulfatos	mg/L	51	25	250
Nitrogeno Amoniaco	mg/L	0,96	0,05	0,5
Conductividad Eléctrica	µs/cm	1259	400	1500
Fosfatos	mg/L	4,3	0,4	5
Fluoruros	mg/L	0,21		2

OBSERVACIONES:

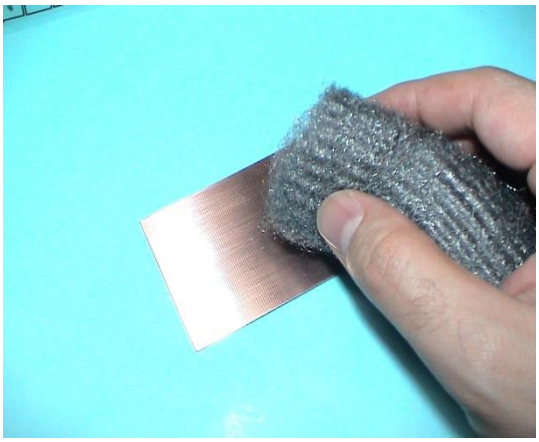
Los Limites considerables corresponden exclusivamente para agua potable

RESPONSABLE:

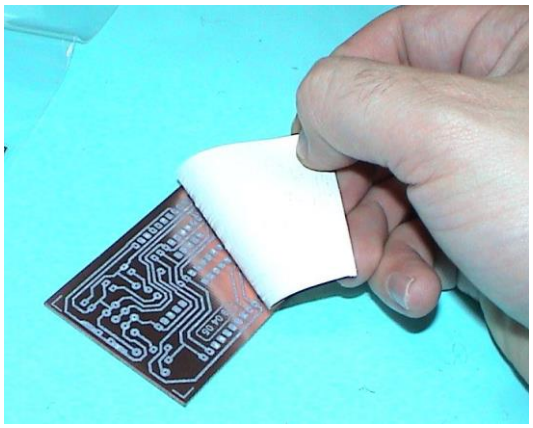
Ing. Cristina Velez	Ing. Rocio Minchala	Dr. Adalberto Gallo
QUIMICO UMAPAL	**QUIMICO UMAPAL**	**QUIMICO UMAPAL**

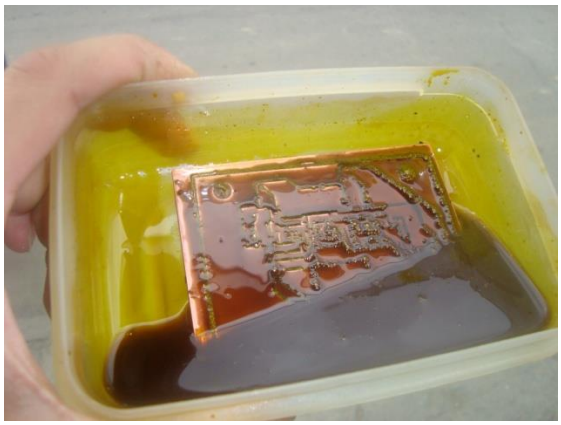
UNIDAD MUNICIPAL DE AGUA POTABLE Y ALCANTARILLADO U.M.A.P.A.L. LABORATORIO « LOJA »

ANEXO 7

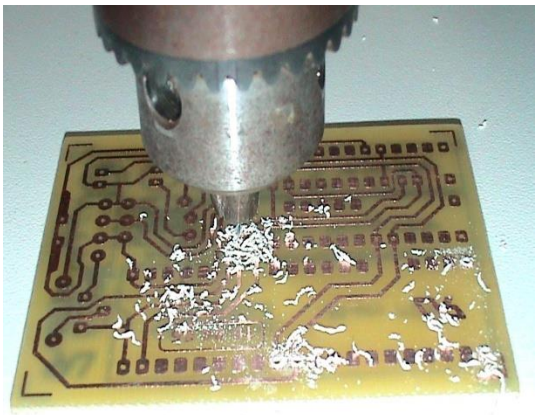
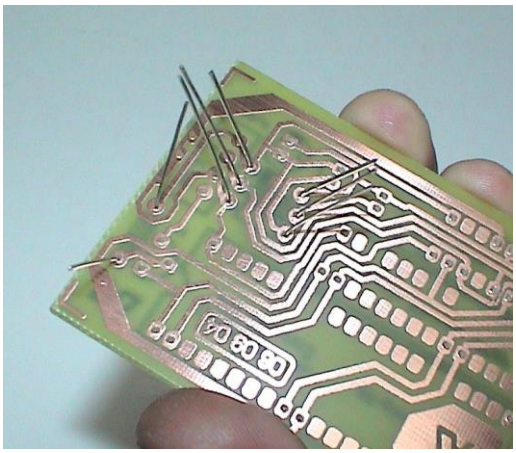


CORTADO Y LIMPIEZA DE LA PLACA

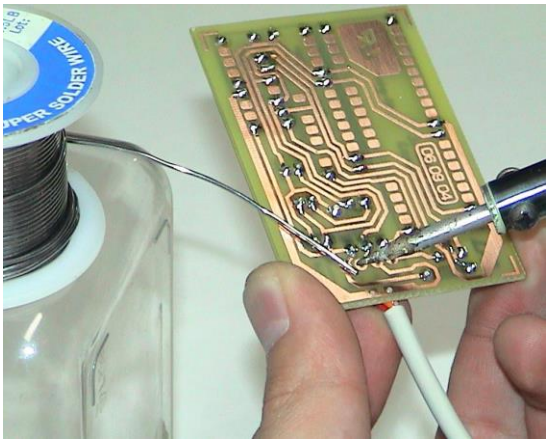
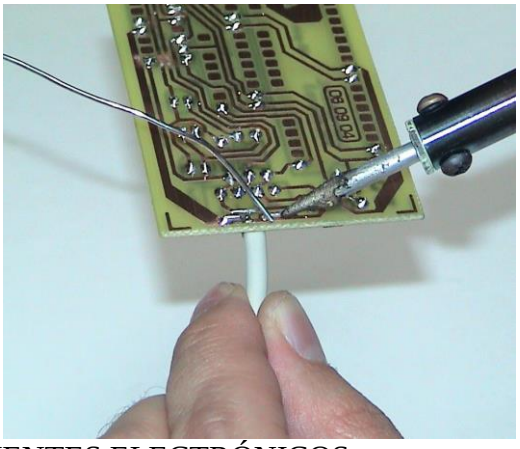




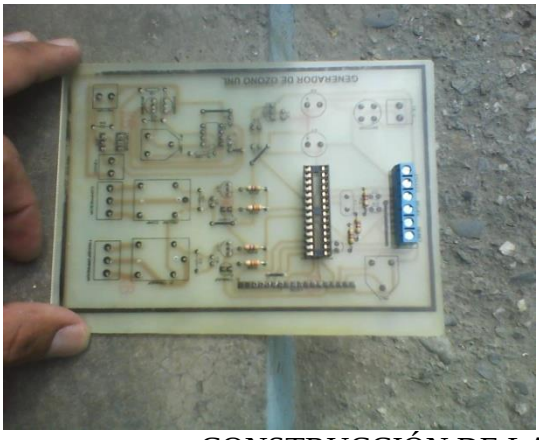
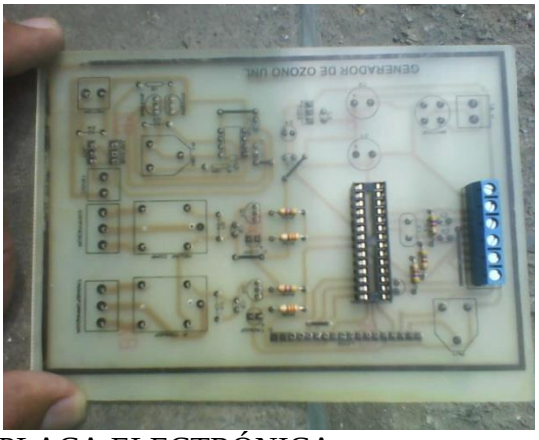
ESTAMPADO Y OXIDACION DE LA PLACA

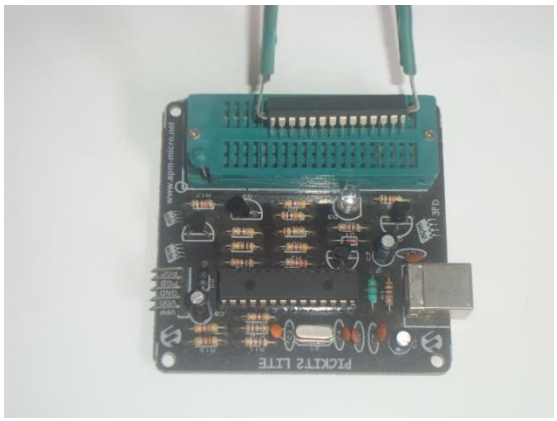
PERFORACIÓN Y COLOCACIÓN DE LOS COMPONENTES

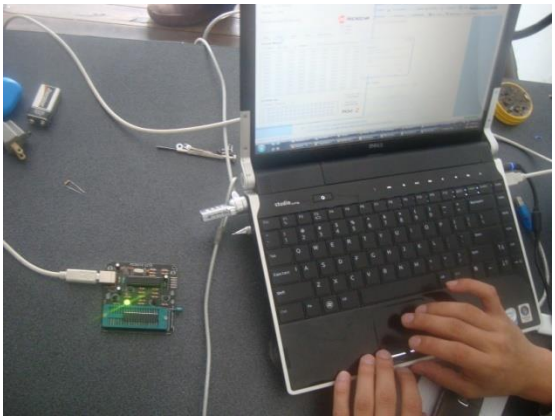



SOLDADO DE LOS COMPONENTES ELECTRÓNICOS

CONSTRUCCIÓN DE LA PLACA ELECTRÓNICA





GRABADO DEL SOFTWARE EN EL MICROCONTROLADOR PIC