



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

TEMA:

“IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO OZONIFICADOR DE LAS AGUAS DE ACEQUIAS PARA LA ALIMENTACIÓN A UN INVERNADERO HIDROPÓNICO”

Trabajo de grado previo a la obtención de título de Ingeniero en Mecatrónica

LINEA DE INVESTIGACIÓN: Producción industrial y tecnología sostenible

AUTOR:

Sr. Roberto Alexis Cuasque Cacuango

DIRECTOR:

Ing. Diego Luis Ortiz Morales.

ASESOR:

MSc. Cosme Damián Mejía Echeverría.

Ibarra – Ecuador 2025



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

1 IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	1004610489		
APELLIDOS Y NOMBRES:	Cuasque Cacuango Roberto Alexis		
DIRECCIÓN:	Natabuela - Atuntaqui		
EMAIL:	racuasquec@utn.edu.ec alexiscuasque25@gmail.com		
TELÉFONO FIJO:		TELÉFONO MÓVIL:	0979312793

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	“IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO OZONIFICADOR DE LAS AGUAS DE ACEQUIAS PARA LA ALIMENTACIÓN A UN INVERNADERO HIDROPÓNICO”
AUTOR (ES):	Cuasque Cacuango Roberto Alexis
FECHA: DD/MM/AAAA	23 de julio de 2025
PROGRAMA:	<input checked="" type="checkbox"/> PREGRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO
TITULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniero en Mecatrónica
DIRECTOR:	Ing. Ortiz Morales Diego Luis

2 CONSTANCIAS

El autor (es) manifiesta (n) que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es (son) el (los) titular (es) de los derechos patrimoniales, por lo que asume (n) la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá (n) en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 23 días del mes de julio de 2025

EL AUTOR:

(Firma).....

Nombre: Cuasque Cacuango Roberto Alexis



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICAS
CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Ibarra, 18 de julio de 2025

Ing. Diego Luis Ortiz Morales

DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

CERTIFICA:

Haber revisado el presente informe final del Trabajo de Integración Curricular, el mismo que se ajusta a las normas vigentes de la Universidad Técnica del Norte; en consecuencia, autorizo su presentación para los fines legales pertinentes.

(f).....

Ing. Diego Luis Ortiz Morales

C.C.: 1001586997



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICAS
CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

APROBACIÓN DEL COMITÉ CALIFICADOR

El Comité Calificado del trabajo de Integración Curricular “IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO OZONIFICADOR DE LAS AGUAS DE ACEQUIAS PARA LA ALIMENTACIÓN A UN INVERNADERO HIDROPÓNICO” elaborado por CUASQUE CACUANGO ROBERTO ALEXIS, previo a la obtención del título de INGENIERO EN MECATRÓNICA, aprueba el presente informe de investigación en nombre de la Universidad Técnica del Norte:

(f).....

Ing. Ortiz Morales Diego Luis

C.C.: 1001586997

(f).....

MSc. Mejía Echeverría Cosme Damián

C.C.: 1002641288

DEDICATORIA

Quiero dedicar este trabajo principalmente a Dios, a mis padres y a mis hermanos, que han sido un pilar fundamental en mi vida, por su apoyo incondicional a lo largo de mi etapa universitaria, por sus consejos y valores inculcados.

También quiero dedicar al más allá a mis dos primos Elvis y Javier que ya no están más con nosotros, siempre me esforzado y seguido adelante por cumplir mis metas para algún día ayudar a todos mis familiares.

“Yo no vine a la universidad solo para pasar por las aulas, yo vine aquí a cimentar mi futuro para alcanzar todas mis metas”

AGRADECIMIENTO

Al finalizar esta etapa de mi vida quiero agradecer a Dios por darme la vida y por el regalo más valioso que tengo en mi vida que son mis padres, a mis queridos padres quienes han estado en mis triunfos y derrotas apoyándome a lo largo de mis estudios con sus consejos, a mis hermanos porque me transmiten esa confianza para poder resolver cualquier problema que se presente y continuar adelante juntos en familia. A mi novia Mayte por haber llegado y cambiado el rumbo de mi vida, por haberme demostrado todo el cariño, la paciencia durante todo este tiempo y por ser mi inspiración para cumplir mis metas.

Quiero extender mis más sinceros agradecimientos a mis tutores: Ing. Diego Ortiz y Ing. Cosme Mejía, por brindarme y ayudarme con sus consejos en el desarrollo de este trabajo. De igual forma a Ing. David Ojeda y Brizeida Gámez por ser los mejores profesores que haya tenido.

También quiero agradecer a todos mis amigos por todas las experiencias compartidas en especial a Lenin Guerra, Dylan Ruiz, De La Cruz Wilman, Kevin Ayala, Alan Reinoso, y muchos más que me es imposible poder nombrarlos a todos, pero ya sabrán quienes son.

Finalmente, un gracias eternos a la Universidad Técnica del Norte por haberme formado y permitido ampliar mis conocimientos para obtener una profesión.

RESUMEN

El presente trabajo de titulación tiene como objetivo principal la desinfección parcial o total de las aguas de acequias usando la tecnología del ozono para alimentar a un invernadero hidropónico. El proceso de purificación del agua conlleva varios factores, dentro de los cuales incluyen el almacenamiento, filtración, desinfección, entre otros. La mayoría de las veces el agua de riego es sometido solo a procesos de filtración, para separar los compuestos sólidos y no se le da un tratamiento a nivel de microorganismos. Mediante la construcción de este equipo generador del gas ozono, lo que se busca es una alternativa más para disminuir la carga bacteriana y descontaminar las aguas de acequias para riego, diseñando un prototipo que emplea una fuente de alto voltaje para generar las descargas dieléctricas dentro de una celda, para lo cual se estableció los parámetros donde se detallan los límites de concentración permitidos por la OMS y la norma de la calidad del agua ecuatoriana, las características del módulo y todos los componentes que la conforman. Una vez diseñada cada una de las diferentes etapas, se procedió a implementar el sistema; la inyección de ozono se hizo mediante la inmersión por burbujeo. Finalmente, se evaluó el nivel de desinfección del agua tratada con ozono mediante un análisis microbiológico, para determinar las condiciones de operación más adecuadas del equipo. En estos análisis se determinó los niveles y presencia de coliformes fecales, totales, E. Coli y el recuento de aerobios totales que son algunos de los parámetros más empleados como indicadores de calidad sanitaria del agua.

Palabras claves: Ozonificador, desinfección, ozonización, descarga corona, gas ozono

ABSTRACT

The main objective of this degree work is the partial or total disinfection of irrigation ditch water using ozone technology to feed a hydroponic greenhouse. The water purification process involves several factors, including storage, filtration, disinfection, among others. Most of the time, irrigation water only has filters to separate solid compounds and is not treated at the microorganism level. Through the construction of this prototype ozone gas generator, what is sought is an alternative to reduce the bacterial load and decontaminate irrigation ditch water, for which a prototype is designed using a high voltage source to generate dielectric discharges inside a cell, for which the parameters were established where the concentration limits allowed by the WHO and the Ecuadorian water quality standard are detailed, the characteristics of the module and all the components that make it up. Once each of the different stages had been designed, the system was implemented; ozone was injected by bubbling immersion. Finally, the level of disinfection of the ozone-treated water was evaluated by means of a microbiological analysis to determine the most appropriate operating conditions for the equipment. These analyses determined the levels and presence of fecal and total coliforms, E. coli and total aerobic counts, which are some of the parameters most commonly used as indicators of water sanitary quality.

Keywords: Ozonator, disinfection, ozonation, ozonation, corona discharge, ozone gas

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1	IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA	II
2	CONSTANCIAS	III
	CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR	IV
	APROBACIÓN DEL COMITÉ CALIFICADOR	V
	DEDICATORIA.....	VI
	AGRADECIMIENTO	VII
	RESUMEN	VIII
	ABSTRACT	IX
	ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	X
	INDICE DE FIGURAS	XVI
	INDICE DE TABLAS.....	XIX
	CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1	Descripción del problema.....	1
1.2	Objetivos.....	2
1.2.1	Objetivo general	2
1.2.2	Objetivos específicos.....	2
1.3	Justificación.....	2
1.4	Alcance	3

1.5	Contexto.....	3
CAPÍTULO 2: MARCO REFERENCIAL		5
2.1	Antecedentes.....	5
2.2	Marco teórico.....	8
2.2.1	El agua y su disponibilidad.....	8
2.2.2	Agua de acequias para riego.....	10
2.2.3	Tipos de sistemas de filtración del agua.....	11
2.2.3.1	Carbón activado.....	11
2.2.3.2	Filtro de arena.....	12
2.2.4	Procesos de purificación del agua	13
2.2.4.1	Cloración	14
2.2.4.2	Rayos ultravioletas	14
2.2.4.3	Ósmosis inversa.....	15
2.2.4.4	Ozonización.....	15
2.2.5	Aspectos generales del ozono.....	16
2.2.6	Ozono.....	16
2.2.7	Propiedades físicas y químicas del ozono	18
2.2.8	Métodos de generación del ozono	19
2.2.8.1	Electrólisis	20
2.2.8.2	Radiación ultravioleta.....	20
2.2.8.3	Descarga corona	20
2.2.9	Toxicidad.....	20
2.2.10	Normativa.....	21

2.2.11	Limites permisibles.....	22
2.2.11.1	Límites permisibles por la OMS.....	22
2.2.11.2	Norma Ecuatoriana de la Calidad del Aire.....	22
2.2.12	Solubilidad del ozono en el agua.....	22
2.2.13	Efectos del ozono en la desinfección del agua	23
2.2.13.1	Eliminar la turbidez	23
2.2.13.2	Eliminación del color, olor y sabor del agua	23
2.2.13.3	Efectos sobre virus y bacterias	24
2.2.14	Factores que disminuyen la capacidad de actuar del ozono	25
2.2.14.1	Turbiedad del agua	25
2.2.14.2	Temperatura del medio.....	25
2.2.14.3	El pH de agua	26
2.2.14.4	Concentración.....	26
2.2.14.5	Tiempo de contacto	26
2.2.15	Métodos de medición del ozono.....	27
2.2.15.1	Método yodo métrico.....	27
2.2.15.2	Absorción de luz UV	27
2.2.15.3	Método amperométrico.....	29
2.2.15.4	Método de colorimetría	29
2.2.16	Dosificación de ozono para la purificación del agua.....	30
2.2.17	Sistema de generación del ozono.....	32
2.2.18	Generación de ozono por descargas eléctricas o corona	32
2.2.18.1	Generadores comerciales existentes	33
2.2.19	Elementos que conforman un equipo generador de ozono.....	34

2.2.19.1	Fuente de alimentación del sistema	34
2.2.19.2	Transformador eléctrico	36
2.2.19.3	Gas de alimentación.....	36
2.2.19.4	Celda de descarga	37
2.2.19.5	Sistema de enfriamiento	40
2.2.20	Sistema de inyección del ozono.....	40
2.2.20.1	Difusores.....	40
2.2.20.2	Difusión por burbujeo.....	41
2.2.20.3	Inyector Venturi.....	41
2.2.21	Materiales resistentes a la corrosión del gas ozono.....	42
CAPÍTULO 3: MARCO METODOLÓGICO		44
3.1	Tipo de investigación.....	44
3.2	Diseño de la investigación.....	44
CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y ANÁLISIS		47
4.1	Especificación de diseño	47
4.2	Consideración de la concentración de ozono deseado.....	48
4.3	Diseño del prototipo generador de ozono.....	49
4.3.1	Modelo del reactor generador de ozono (DBD)	49
4.3.1.1	Área efectiva de la celda.....	51
4.3.1.2	Voltaje mínimo de ruptura dieléctrica	51
4.3.1.3	Consumo de potencia de la cámara	52
4.3.1.4	Dieléctrico	53

4.3.1.5	Electrodos	54
4.3.2	Diseño de la fuente de alto voltaje.....	55
4.3.2.1	Transformador Flyback	55
4.3.2.2	Frecuencia de trabajo.....	56
4.3.3	Diseño del circuito PWM.....	57
4.3.3.1	Circuito integrado 555	57
4.3.3.2	Configuración de la frecuencia de trabajo.....	58
4.3.3.3	Transistor de potencia.....	60
4.3.3.4	Red Snubber	61
4.3.3.5	Circuito de simulación en Proteus	62
4.3.4	Microcontrolador	64
4.3.5	Gas de alimentación.....	65
4.3.5.1	Sistema de inyección de ozono con el agua	66
4.4	Construcción del prototipo generador de ozono.....	67
4.4.1	Cámara generadora de ozono	67
4.4.1.1	Módulo cilíndrico de plástico	67
4.4.1.2	Electrodos y dieléctricos de la celda.....	68
4.4.2	Circuito de control y de potencia.....	69
4.4.2.1	Implementación del circuito oscilador	69
4.4.2.1	Generación de alta tensión.....	70
4.4.2.2	Funcionamiento del sistema generador de ozono.....	71
4.4.3	Cálculo de la producción de ozono del prototipo propuesto	72
4.4.3.1	Medición de la concentración de ozono con el sensor MQ-131.....	74

4.5	Pruebas del prototipo generador de ozono	76
4.5.1	Pruebas de azul de metileno disuelto en agua	76
4.5.2	Pruebas del prototipo con 225 L de agua de acequias en un tanque	77
4.5.3	Pruebas del prototipo con 18 Litros de agua de acequias.....	78
4.5.4	Concentración de ozono disuelto en el agua	79
4.5.5	Resultados de los análisis microbiológicos del agua tratada.....	80
4.5.5.1	Método de filtración por membrana para los análisis del agua	80
4.5.5.2	Prueba del agua de acequias con ozono.....	81
4.5.5.3	Discusión del grado de desinfección de las muestras analizadas.	83
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		86
5.1	CONCLUSIONES:.....	86
5.2	RECOMEDACIONES	88
REFERENCIAS		89
ANEXOS		96

INDICE DE FIGURAS

Fig. 1 Reserva de agua en los páramos del Ecuador, tomado de [4].....	6
Fig. 2 Filtro de carbón activado.....	12
Fig. 3 Filtrado con arena.....	13
Fig. 4 Esquema de un equipo ozonificador por absorción de Luz Ultravioleta	28
Fig. 5 Elementos de una celda de descarga eléctrica, obtenido de [35].	32
Fig. 6 Transformador eléctrico simple, obtenido de [25].....	36
Fig. 7 Circuito equivalente de una celda.	38
Fig. 8 Difusor de gas ozono.....	41
Fig. 9 Inyector Venturi	42
Fig. 10 Elementos de la cámara generadora de ozono tubular	49
Fig. 11 Cámara generadora de ozono.....	50
Fig. 12 Tipo de materiales como electrodos para la celda generadora de ozono.	54
Fig. 13 Transformador Flyback.....	56
Fig. 14 Efecto de la frecuencia de trabajo, tomado de [35].....	57
Fig. 15 Configuración básica del modo astable para el temporizador Lm 555	57
Fig. 16 Rectas de comportamiento de una señal PWM en modo astable, Datasheet IC555	59
Fig. 17 Circuito de Red Snubber RCD (a), Aplicación a un MOSFET (b).....	61
Fig. 18 Circuito de control y potencia simulado en Proteus	63
Fig. 19 Medición de voltaje y frecuencia de salida mínima de trabajo.....	63
Fig. 20 Medición de voltaje y frecuencia de salida máxima del circuito.	64
Fig. 21 Microcontrolador Arduino Nano	65
Fig. 22 Difusor de cerámica poroso	67

Fig. 23 Modulo cilíndrico de plástico como cámara del reactor	68
Fig. 24 Celda para las descargas dieléctricas dentro de la cámara.	68
Fig. 25 Implementación del circuito de control y de potencia de prueba	69
Fig. 26 Topología de los pines del Flyback.....	70
Fig. 27 Bobinado primario y terminales de salida de alto voltaje del Flyback	71
Fig. 28 Partes y funcionamiento del equipo generador de ozono	72
Fig. 29 Descargas eléctricas en el reactor (DBD)	73
Fig. 30 Sensor de Ozono MQ-131de baja concentración.....	74
Fig. 31 Medición del gas ozono con el sensor MQ131, a) valores mínimos que puede medir el sensor sin presencia de ozono, b) valores medidos del gas ozono por el sensor.....	75
Fig. 32 Pruebas iniciales de equipo ozonizador a) Muestras de agua potable con azul de metileno y de referencia, b) agua ozonizada durante 15 min.	76
Fig. 33 Tanque con filtro y de reservorio de 250L.....	77
Fig. 34 Muestras de agua a tratar a) Agua de acequia con filtro. b) Agua de acequia sin filtro	78
Fig. 35 Método de filtración por membrana para los análisis microbiológicos, a) colocación de la membrea para el filtro, b) colocación de la membraba para el cultivo.	80
Fig. 36 Prueba inicial del azul de metileno temporizado, a) agua con 10 gotas de azul de metileno, b) ozonización del agua por 10 minutos, c) ozonización de agua por 15 minutos, d) ozonización de agua por 25 min	98
Fig. 37 tratamiento del agua con ozono, a) ozonización del agua temporizado, b) toma de muestra de agua tratada con ozono, c) método de filtración por membrana de las muestras.	99

Fig. 38 Identificación y recuento de colonias de los microorganismos retenidos por la membrana. a) número de colonias de la muestra sin ozono, b) número de colonias de la muestra ozonizada por 30 min c) número de colonias de la muestra ozonizada por 45 min	100
Fig. 39 Recuento de aerobios totales luego de la incubación. a) Presencia de aerobios totales de la muestra sin ozono, b) Presencia de aerobios totales de la muestra con ozonización por 30 min, c) Presencia de aerobios totales de la muestra con ozonización por 60 min, d) Presencia de aerobios totales de la muestra con ozonización por 90 min.	101
Fig. 40 Formación del arco eléctrico de alto voltaje	102
Fig. 41 Funcionamiento del sistema ozonificador.....	102

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Características generales del agua, tomado de [12].....	9
Tabla 2. Comparación de las propiedades del oxígeno y el ozono molecular, tomado de [26].	18
Tabla 3. Vida media del ozono a efectos de temperatura, tomado de [26].....	19
Tabla 4. Clasificación de los valores limites permisibles de ozono	22
Tabla 5. Microorganismos patógenos que se puede quitar mediante el ozono, tomada del [26].....	25
Tabla 6. Factor CT (Concentración - tiempo) requerido por temperatura de agua, obtenida de [37].....	31
Tabla 7. Características básicas y comerciales de equipos industriales para la generación de ozono, tomado de [35]......	34
Tabla 8. Características principales de las micro descargas de una celda, obtenida de [26]	39
Tabla 9. Materiales resistentes a la corrosión del gas ozono, tomado de [35].	43
Tabla 10. Características de los módulos de las cámaras	50
Tabla 11. Características de los dieléctricos del reactor.....	53
Tabla 12. Características básicas de un microcontrolador Arduino Nano.....	65
Tabla 13. Alternativas de selección de la bomba de aire existentes en el medio local.	66
Tabla 14. Eficiencia de la transferencia del gas ozono al agua	79
Tabla 15. Concentración del gas ozono obtenido por mg/litro.....	79
Tabla 16. Resultados de los análisis microbiológicos de 225 Litros de agua filtrada de un tanque.....	81

Tabla 17. Resultados de análisis microbiológicos con 18 litros de agua filtrada en un botellón.....	82
Tabla 18. Resultados de análisis microbiológicos con 18 litros de agua sin filtro en un botellón.....	83
Tabla 19. Criterios de calidad de aguas para uso agrícola en riego.....	84
Tabla 20. Comparación de los resultados obtenidos con las normas de calidad de agua según el ministerio.....	85

CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 Descripción del problema

A lo largo del tiempo se han investigado muchas alternativas efectivas que ayuden con la desinfección del agua en el uso y consumo humano. Es así como, se descubrió el cloro en su estado gaseoso por el químico Sueco C.W. Scheeldeen en 1774, posteriormente siglos después se descubrió su efecto desinfectante ya sea de una forma directa o en forma de compuestos, y esta, ha sido una de las formas más utilizadas con los materiales y equipos adecuados por muchos años.

El agua es un recurso fundamental para la vida y su desarrollo; es un recurso que garantiza el correcto funcionamiento de todos los procesos biológicos y de los ecosistemas, dando cabida a la existencia y supervivencia de los seres vivos, animales y vegetales, que habitan en el planeta tierra. Hay diversas formas para la extracción de este líquido vital, pero el agua obtenida puede venir con restos de materia orgánica, desechos de fertilizaciones o de productos industriales que la contaminan y son un peligro potencial, sobre todo para la salud de las personas.

En Ecuador alrededor del 40% de la población rural no tiene acceso adecuado al agua para consumo humano, mientras que el 90% de las aguas residuales no son tratadas. Como consecuencia, más de la mitad de las fuentes de agua no tienen una calidad adecuada para el uso doméstico ni para el consumo humano. El riego consume cerca del 80% del agua disponible, a pesar de que solo el 30% del área cultivable del país está bajo riego y en la mayoría de los casos, para el tratamiento y purificación del agua se implementa el método de cloro y sus componentes, en proporciones no controladas puede llegar a tener efectos negativos en la salud de las personas [1].

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Desarrollar un prototipo ozonificador mediante el método de las descargas dieléctricas para la purificación del agua de acequias a un invernadero hidropónico.

1.2.2 Objetivos específicos

- Determinar las características funcionales de un ozonificador y documentar los métodos para la eliminación parcial o completa de los microorganismos presentes en el agua.
- Diseñar el sistema mecatrónico para la ozonificación del agua de acequias.
- Implementar el sistema diseñado para medir el nivel de purificación del agua de acequias.
- Evaluar el funcionamiento mediante comparaciones de la calidad de agua tratada.

1.3 Justificación

Con la realización de este proyecto se propone mejorar y contribuir en la calidad de purificación del agua para el suministro a un invernadero hidropónico. Para lo cual, es necesario la construcción de un generador de ozono, ya que esta nos ayudará a tener un control inicial en el tratamiento mediante la implementación del método de corona o más conocido como método de descargas eléctricas.

Para su implementación se hará utilizando como referencia las experiencias de los sistemas de dosificación de ozono en investigaciones existentes sobre los diferentes métodos de tratamiento con el fin de comprender su uso y funcionamiento, además de las ventajas y desventajas al uso de ozono como un medio de purificación del agua.

El ozono puede reaccionar con la mayoría de los contaminantes del entorno, la oxidación de las especies químicas presentes en el agua por parte del ozono es de especial interés para el tratamiento de agua potable y el manejo de agua de desecho.

Para tener un control adecuado en el proceso de tratamiento y purificación del agua es necesario las tecnificaciones de procesos a través de sistemas que ofrezcan métodos innovadores y puedan usar energías renovables para su funcionamiento.

La técnica de la ozonificación al aplicar un enriquecimiento actúa en los procesos de desinfección con mayor eficiencia permitiendo realizar tratamientos muy efectivos eliminando compuestos tanto orgánicos como inorgánicos.

La principal contribución de este proyecto es el diseño y la realización de un ozonificador para la purificación de las aguas de acequias, el cual también tiene como aplicación principal la de desinfección y eliminación de microorganismos en la alimentación a invernaderos hidropónicos.

1.4 Alcance

Se diseñará la infraestructura tecnológica del sistema ozonificador para la alimentación de agua a un invernadero hidropónico. Se optará por los materiales y elementos comerciales existentes en el medio para su construcción, de esta forma reducir costos, manteniendo la misma eficacia y eficiencia de los modelos ya existentes en el mercado. Además, se evaluará la eficiencia del prototipo mediante los análisis microbiológicos del agua tratada.

1.5 Contexto

Con el aumento de la población mundial se produce una mayor demanda de agua y alimentos, pero también el que seamos cada vez más en este planeta trae consigo un aumento de la

contaminación de los recursos disponibles, por ende, el tratamiento de agua a nivel mundial está siendo cada vez más primordial ya que es parte primordial de todo un ecosistema por lo que desarrollan estudios constantes sobre diferentes métodos de purificación del agua. En general, la calidad del agua se evalúa comparando sus características físicas, químicas y microbiológicas a partir de una muestra según las normas de calidad del agua o estándares ya establecidos.

La oxidación de las materias orgánicas, sulfuros y sustancias extrañas, produce la supresión de olores, sabores y aspectos raros que el agua puede contener en sus componentes químicos, la dosis de desinfección aplicada en el agua está relacionada con un factor de concentración total "CT" que es la multiplicación de la concentración residual (mg/l) por el tiempo en el que está en contacto (min). En Europa contemplan un $CT=1.6$ sin embargo, en los estados unidos de América señala un $CT=0,72$ aplicados al agua a $20^{\circ}C$ es suficiente desactivar 99,9% de los microorganismos [2].

En la actualidad, con la creciente contaminación global, hay mucha preocupación por los posibles riesgos a la salud a largo plazo dada la presencia de pequeñas concentraciones de impurezas en el agua consumible o para aplicaciones en la producción de los alimentos, ya que estas pueden ser origen natural o generadas por el hombre y pueden llegar a ser compuestos potencialmente cancerígenos. Por tanto, es vital tomar conciencia y estar atentos a la relación existente entre la calidad de agua que se tiene y la salud, de manera que hay que buscar soluciones y métodos aplicables en beneficio de la humanidad.

CAPÍTULO 2: MARCO REFERENCIAL

2.1 Antecedentes

El agua es un recurso indispensable para todos los procesos metabólicos. Hoy en día, con el desarrollo de las nuevas tecnologías; las actividades industriales, domésticas, agrícolas, ganaderas, sanitarias y entre otras, la demanda del consumo del agua ha sido en cantidades muy grandes; sin embargo, después de su uso, son devueltas al medio ambiente con una pérdida de calidad que dificulta para su reúso.

Los problemas de los recursos hídricos se deben a actividades de extracción de minerales, el crecimiento poblacional, la escasez de servicios básicos y alcantarillado, el uso excesivo de agroquímicos, la deforestación, la expansión de la agricultura y ganadería, dando como resultado altas concentraciones de metales pesados como; Cromo, Níquel, Cobre, Aluminio, cadmio, hidrocarburos, material orgánicos e inorgánicos y agentes patógenos que afectan a la salud y al equilibrio ambiental [3]. La contaminación por origen natural del agua proviene del arrastre de todos los sedimentos a lo largo de su trayecto, de las cuales pudiéndose depurar de forma parcial y natural en un determinado tiempo gracias a la interacción de calor y los restos de materia orgánica por las características físicas y químicas propias del agua.

Si bien las tecnologías han ido evolucionando y con ello perfeccionando en el tratamiento del agua llegando a obtener procesos de oxidación avanzada. El agua como tal tuvo mayor interés al principio del siglo XX, con el fin de mejorar su calidad, optando por procesos que implican la generación de oxidantes químicos para la degradación parcial de materia orgánica en aguas residuales. A pesar de esto, no ha sido una de las soluciones totales.

Últimamente, con las nuevas innovaciones el interés por tratar agua potable y el control del agua de desechos ha permitido explorar la intervención del ozono como uno de los desinfectantes más utilizados por su eficiencia, barato y fácil de trabajar, ya que puede reaccionar con la mayoría de los contaminantes y la oxidación de las especies químicas presentes en el agua.



Fig. 1 Reserva de agua en los páramos del Ecuador, tomado de [4]

El agua en su punto inicial **Fig. 1** presenta las características de calidad con menos impurezas, pero en el transcurso y traslado del agua procedentes de los ríos, paramos, necesitan procesos de tratamientos más avanzados y costosos para abastecer agua de calidad a los consumidores, debido a que con las precipitaciones el agua trae consigo grandes cantidades de materia orgánica e inorgánica como polvo, polen, bacterias, esporas, e incluso, organismos mayores [5] haciendo no apta para el consumo humano, uso doméstico, uso industrial y para el riego. De aquí la necesidad de utilizar el ozono con una producción de acuerdo con los niveles autorizados como un purificador, obteniendo una desinfección microbiológica y mejorando la calidad del agua.

Hay varios trabajos de investigación donde se hace el uso de ozono como desinfectante, y dentro de ellas se tienen en cuenta que los valores del CT (**Concentración residual del**

desinfectante) que han llegado a determinar que el ozono [O₃], es el desinfectante más efectivo respecto a otras alternativas. Se estima un acelerado desarrollo en los equipos generadores de ozono, con un rendimiento más eficaz y que ayude a producir concentraciones del gas ozono del 10 a 15 % en peso y son más compactos [6], [7].

En estos momentos, estos equipos generan menos consumo de energía y presentan un alto grado de automatización en su rendimiento, lo cual ha permitido obtener gas ozono para mayores demandas y de esta forma entrar competencia directa con el cloro y otros productos desinfectantes. De entre lo que se puede destacar tenemos; la optimización de los sistemas de refrigeración de los equipos, el empleo de nuevos materiales dieléctricos que ofrecen mayor eficacia como la cerámica y el llamado no vidrio, la creciente utilización del oxígeno puro como gas de alimentación a nivel industrial, la inclusión de materiales muy resistentes al poder oxidante del ozono debido al alto nivel de avance que ha logrado la ciencia y la tecnología de los materiales [8], como el empleo de nuevos sistemas de inyección del gas ozono con el agua que garantizan una adecuada transferencia de masa, permitiendo mayor aprovechamiento del ozono. Las variables previamente expuestas han dado lugar creciente utilización de la ozonización en los tratamientos y purificación de aguas. Las potencialidades que lo sitúan sobre el uso del gas ozono como un potente oxidante y desinfectante dado a su producción in situ, ya que esto evita toda posibilidad de la transportación y almacenamiento, permitiendo reafirmar al ozono como un desinfectante muy eficaz frente a los microorganismos patógenos, mucho mayor que la cloración, inclusive cuando más deteriorada esté el agua a tratar [7], [9].

A partir de las potencialidades que ofrece las aplicaciones de la ozonización, se han incorporado y adaptada en distintos periodos del proceso de potabilización del agua, de

acuerdo con el objetivo a conseguir o con el problema que presente el agua en cuestión. La pre-ozonización se localiza al inicio de las etapas; el ozono, como un agente oxidante, garantiza el control sobre la formación de THM (Trihalometanos), dadas las altas eficiencia en la eliminación de la materia orgánica y de los precursores de los THM. Del mismo modo, oxida todo tipo de contaminantes orgánicos (fenoles, detergentes, pesticidas), cianuros, sulfuros y nitritos, de igual manera el carbono orgánico (CO₂) disuelto. Por otro lado, favorece con descomposición de la materia orgánica ayudando a que los compuestos de mayor peso molecular sean transformados en otros de menor peso, más polares y oxigenados, en esa medida, además, inofensivos y biodegradables. Favorece la eliminación del hierro y manganeso; en este sentido, favorece el desacomplejamiento de estos metales con sus matrices respectivos [7], [10].

En la década de los años setenta uno de los aspectos notorios fue la identificación de la toxicidad tanto del cloroformo como de los THM en cuestión, así como la verificación de su formación por la aplicación de cloro en aguas con unos determinados contenidos de materia orgánicos [11]. Además, estos compuestos son indeseables ya que agrega al agua un color amarillo y un olor y sabor poco apetecible para el consumo. En 1979, la USEPA (United States Environmental Protection Agency) dispuso un nivel máximo de 100 µg de THM totales por litro de agua potable, lo que conlleva la búsqueda inmediata de alternativas para su control [7], [9].

2.2 Marco teórico

2.2.1 El agua y su disponibilidad

El agua es el compuesto más abundante, ampliamente distribuida en la naturaleza, que se puede encontrar ya sea en diferentes estados como: sólido, líquido y gaseoso. En estado

sólido podemos encontrar formando nieves o hielo en los glaciares y nevados, como líquido se hallan en los océanos, ríos y lagos, además, está presente en grandes cantidades como gas en la atmósfera. El agua cubre las tres cuartas partes de la superficie terrestre, siendo la mayor parte agua salada y una muy baja cantidad agua dulce disponible para la utilización y consumo del ser humano. Las principales características del agua se detallan en la siguiente

Tabla 1.

Tabla 1 Características generales del agua, tomado de [12].

DESCRIPCION	DETALLE
Formula molecular	H ₂ O
Estado físico	Sólido, Líquido y Gaseoso
Color	Incoloro
Olor	Inodoro
Sabor	Insípida
Peso molecular	18.016 u.m.a
Densidad como gas	0.598 gr/l (a 100°C y a 1 atm)
Densidad como líquido	1.00 gr/ml
Densidad como solido	0.917 gr/ml (a 0°C)
Punto de fusión	0°C (a 1 atm)
Punto de ebullición	100°C (a 1 atm)
Capacidad térmica	1 cal/gr °C

Actualmente el agua es una de las preocupaciones en auge de la sociedad, esto debido a la escasez a nivel mundial. Con esto la mala calidad es cada vez mucho mayor y las dificultades de desigualdad de poder acceder a ella. Hoy en día el agua es fundamental ya que sin ellas el desarrollo y la subsistencia no podría existir en todos los seres vivos.

Según [13], la Comisión Mundial del Agua, cerca de 1400 millones de personas realizan sus actividades diarias sin agua potable; 7 millones de personas mueren con enfermedades afines

a la contaminación del agua; y 2500 millones de personas sufrirán la carencia de este recurso vital para el año 2050.

El Ecuador que no ha pasado por las carencias por muchos años, en los últimos años ha habido cambios drásticos en la calidad y cantidad de agua. El crecimiento de las industrias y los desechos a las aguas superficiales, la deforestación, el uso excesivo de químicos como pesticidas son de los factores de este problema actual, cuando un recurso es inadecuado para su uso se establece que el mismo es de mala calidad o está contaminado. De esta manera los agricultores que usan en exceso fertilizantes químicos son los principales responsables de la contaminación de aguas subterráneas y superficiales ya sea para la agricultura o cualquier otro uso que se le dé a este recurso [14].

2.2.2 Agua de acequias para riego

En Ecuador hay unas 3'140.000 hectáreas cultivables, de las cuales alrededor de 939.000 poseen una infraestructura de riego. Solo el 22% se beneficia del riego público y el 78% restante posee sistemas de riego propio y en su mayoría corresponden a campesinos e indígenas [15]. El riego es uno de los factores primordiales en la economía agrícola, que deben distribuirse equitativamente abasteciendo de forma continua a las acequias ya que la escasez del agua de riego representa una pérdida en inversión y de cosechas para los agricultores.

Para facilitar el riego en los terrenos, la mayoría de los agricultores construyen un sistema de canales que transportan del agua desde la fuente hasta un lugar donde puedan directamente regar o almacenar en piscinas o reservorios para su posterior uso.

Hoy es más evidente el uso de aguas residuales para el riego, así aumenta el riesgo que atrae esto para todo tipo de agricultura que se consume y se conoce poco sobre la calidad de agua. La mayoría de los ríos de Ecuador, que se encuentran o pasan por zonas muy pobladas, presentan altos niveles de coliformes, DBO (Demanda Bioquímica de Oxígeno), nitrógeno y fosforo [16].

2.2.3 Tipos de sistemas de filtración del agua

Uno de los primeros pasos en la purificación del agua es la filtración, para ello existen diferentes procesos donde se puede tratar el agua en sus diversos aspectos como: físico, químicos y microbiológicos. Por este motivo, un sistema de filtración conlleva como prioridad combatir la turbiedad compuesta de olor y sabor del agua.

2.2.3.1 Carbón activado

Es un sistema de filtrado a base gránulos de carbón con propiedades. Este filtro de carbón responde al mismo principio de funcionamiento, solo que las diferencias están en los medios filtrantes y en su desempeño como se puede ver en la Fig. 2. Siendo un material natural el carbón activado tiene millones de formas y agujeros microscópicos que atraen, detienen y desintegran moléculas de los contaminantes que se encuentran presentes a su paso. Hoy en día el uso del carbón activado es muy común y se utiliza especialmente para el retén y separado de sustancias no polares como son los compuestos de cloro, aceites minerales, compuestos halogenados como el cloro, flúor, yodo, bromo y entre otras, que son sustancias causantes de los malos olores y sabores del agua. Todo ello sin modificar la composición inicial del agua, respetando los oligominerales y sin generar residuos [17], [18].

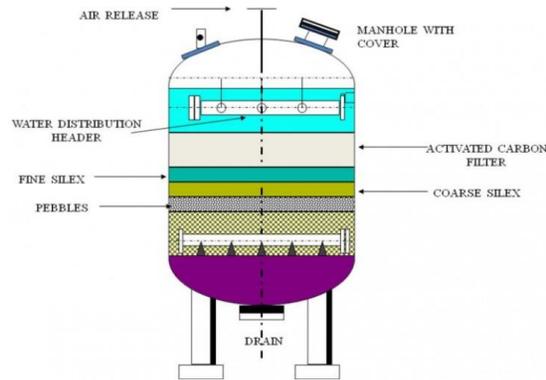


Fig. 2 Filtro de carbón activado

2.2.3.2 Filtro de arena

Este tipo de filtro son muy efectivos como una primera etapa de purificación del agua ya que pueden retener sustancias orgánicas, eliminar partículas finas y la materia coloidal coagulada previamente, a través de todo el espesor de arena, acumulando grandes cantidades de contaminantes. El agua sin tratar contiene normalmente sólidos en suspensión que son nocivos para la salud y el uso en aplicaciones ya sea a nivel industrial o consumo domésticos.

La filtración se lleva a cabo haciendo pasar el líquido a tratar, a través de un lecho de arena de graduación especial. El tamaño promedio de los granos de arena y su distribución han sido escogidos para obtener las distancias mínimas entre granos, sin causar pérdidas de altas presiones. Las partículas atrapadas en el lecho se desalojan fácilmente invirtiendo el flujo a través de la unidad [17]. Esto hace expandir la arena, limpiándose por acción hidráulica y por fricción de un grano con otro como se muestra en la **Fig. 3**.

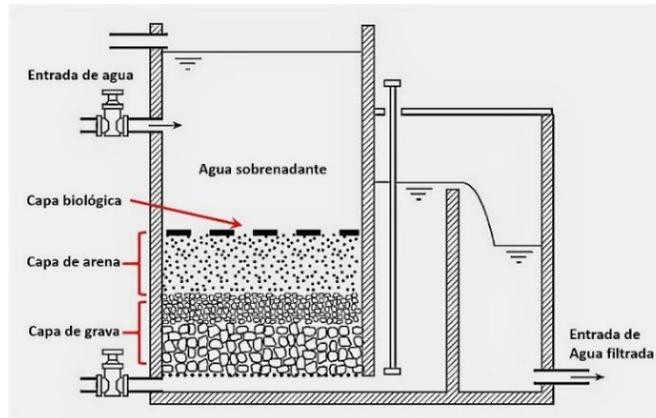


Fig. 3 Filtrado con arena

La sustracción del carbono orgánico biodegradable se puede alcanzar hasta un 50%. Esto se realiza a través de la actividad biológica que se produce en los lechos. El color real se puede eliminar hasta en un 60% con ayuda de pre-oxidación, el hierro se puede reducir un 30 y 90%, pero, los filtros se pueden llenar rápidamente si el contenido de hierro es mayor a 1 mg/l por lo que es necesario empacar el filtro con un grano de arena un poco más grande (0.5 mm) que el que se utiliza en condiciones normales (0.3 mm). Para alcanzar largas carreras de filtración, el agua alimentadora de los filtros debe poseer turbiedades medias de agua <10, lo que se lograda con los filtros gruesos [18], [19].

2.2.4 Procesos de purificación del agua

La purificación del agua es una de las etapas finales más importantes antes de su uso y consumo, donde se procede a la inactivación o destrucción de los microorganismos patógenos que están presente, ya que estas a su vez son las causantes de muchas enfermedades.

Los desinfectantes químicos o naturales necesitan contacto con un tiempo mínimo eficiente y puede variar según los métodos según la actividad del desinfectante. Cuanto más tiempo, más organismos serán destruidos. Para la mayoría de los desinfectantes el tiempo mínimo

necesario es de unos 5 minutos, en el que el desinfectante hace efecto y puede asegurar un efecto biocida.

Esta desinfección o purificación se puede llevar por diferentes métodos que a continuación se detalla, cada una de ellas posee sus ventajas y desventajas.

2.2.4.1 Cloración

Consiste en usar el cloro directo o en sus diferentes compuestos como desinfectante. La cloración desde su descubrimiento es uno de los métodos de desinfección y purificación más utilizados hasta hoy en día, debido a sus potencialidades y su efecto residual a proporciones controladas. Consiste en llevar o almacenar el agua en una cisterna, donde permanece en contacto con este químico desinfectante durante al menos dos horas, elimina la mayoría de los virus, bacterias, hongos y algas presentes en el agua. Una de las principales desventajas que se obtiene al aplicar este método, después del tratamiento deja un olor y sabor desagradable en el agua y esto se debe a que, si la dosificación de Cloro no es suficiente, el tratamiento del agua no es eficaz, ya que esta dosificación de cloro debe ser tal que a la salida del proceso de filtración quede un cloro residual entre 3 a 4 ppm. Además, si se trata o se expone de forma inadecuada el cloro puede formar trihalometanos (THM) desarrollando cierto tipo de cáncer. Sin embargo, se desarrollaron y se implementaron técnicas estándares para reducir los niveles de trihalometanos contenidos en el agua debido a la cloración ya que estas técnicas radican en la eliminación de los agentes precursores de estas sustancias antes de su aplicación [16]

2.2.4.2 Rayos ultravioletas

Este método consiste en someter el agua a unas lámparas de silicio cuarzo o de vapor de mercurio, donde se generan y se emiten radiación de luz ultravioleta con longitudes de onda

entre 200 - 300 nm (nanómetros). La eficiencia máxima de germicida se halla en los 265 nm. Este método carece de un efecto residual ya que, durante los tratamientos no incluye sustancias químicas al agua, por ende, no cambia el olor ni el sabor del agua tratada. Es muy empleado para aplicaciones a pequeña escala. La radiación Ultravioleta aplicada hace que se dañe y se descomponga el ADN de los microorganismos, evitando su reproducción y siendo incapaces de producir daño al consumirlos. La radiación con luz UV es un método más costoso que la cloración [19], [20].

Al pasar el flujo de agua por esta radiación, la energía es absorbida por el mecanismo reproductor de las bacterias y virus, alterando su material genético, de manera que no pueden reproducirse eliminando de esta forma los microorganismos entre el 99.9% y 99.99% [16]

2.2.4.3 Ósmosis inversa

El método de tratamiento por ósmosis inversa radica en separar y eliminar sólidos disueltos, materia orgánica, colonias, virus y bacterias del agua mediante una membrana semipermeable. La aplicación de este método lleva un proceso la cual consiste y requiere de una presión para forzar que el agua a tratar pase a través de la membrana rechazando a más del 99% de las sales y dejando las impurezas detrás [16].

Esto implica proveer un porcentaje del flujo de agua del sistema y se destine al rechazo o concentrado para la calidad de agua a tratar. Para esto se puede diseñar equipos de múltiples membranas con arreglos en serie o paralelo dependiendo del caso a tratar.

2.2.4.4 Ozonización

El ozono (O₃) es un gas alótropo del oxígeno muy reconocido por sus potencial oxidante y desinfectante, bactericidas, desodorizantes y oxigenante natural. El ozono tiene la capacidad

de elimina un espectro mucho mayor de microorganismos que el cloro. Además, a diferencia del tratamiento con cloro, el efecto residual del ozono es de corto tiempo, pero con una aplicación correcta puede eliminar en gran parte olores y sabores desagradables del agua. La vida media del ozono es de aproximadamente 30 a 40 minutos a una temperatura promedio de 20°C, de no utilizarlo, su potencial oxidante disminuiría hasta un 16% en dos horas, de ahí la necesidad de crear un generador de ozono útil para consultorio [21].

Se trata de un gas inestable a temperatura y presión del medio ambiente, ya que se descompone rápidamente formando moléculas de oxígeno (O₂). Tampoco se puede conservar; lo que hace necesario usarla inmediatamente al producirla. Otra de las características importantes que presenta la ozonización es la ausencia del efecto residual, cualidad que resulta ventajosa, ya que de no ser así y si el ozono se mantuviese en el agua, le daría un sabor desagradable y habría que certificar y garantizar que el agua con ozono tiene algún efecto residual perjudicial para su uso y consumo [22].

El tratamiento con ozono suele emplearse en las industrias farmacéuticas porque remueve una gran cantidad de antiinflamatorios, antibióticos y estrógenos. De esta forma, siendo muy eficaz para los tratamientos de las aguas residuales tanto industriales como urbanas [23].

2.2.5 Aspectos generales del ozono

2.2.6 Ozono

El ozono es un compuesto que está formado por 3 átomos de oxígeno, su función principal es el de ser un oxidante y desinfectante, sobre todo en la purificación del agua. Así mismo, existen muchos resultados donde se comprueba de su eficiencia en la oxidación de materias orgánicas e inorgánicas.

El ozono es un gas azul a simple vista y es muy inestable. Tiene un olor perceptible, según evidenció el filósofo holandés Van Marun en el año 1785 y a una temperatura de -112°C condensa y se transforma en un líquido azul intenso [24]. En condiciones normales de presión y temperatura, el gas ozono en agua es trece veces más soluble que el oxígeno, pero debido a la gran concentración de oxígeno en aire, lo podemos encontrar en mayor medida disuelto en el agua que el ozono [24].

Por la irradiación de rayos ultravioletas en el oxígeno se produce el gas ozono; también se produce la fotosíntesis de cualquier planta o de algas en la naturaleza y, gracias al ozono, se pueden encontrar los paseos terapéuticos benéficos para la salud porque presentan pureza de aire mayores a las de una ciudad con contaminación.

El ozono también ayuda a otros elementos en el tren de filtrado para mejorar su efectividad. Las cámaras de carbón activado y de intercambio iónico son susceptibles a la cría de microorganismos entre sus medios por brindar una fuente de alimento. No se conoce un sistema de retro lavado efectivo para regenerar totalmente estos filtros de ese problema. El ozono controla efectivamente este suceso, pero se necesita tener cuidado al dosificarlo en cámaras de intercambio iónico por que puede causar daño cuando se emplea grandes concentraciones. Para equipos de osmosis inversa también se puede utilizar el ozono para el control de ensuciamiento biológico tomando las mismas precauciones que con las cámaras de intercambio iónico. Una fuerte concentración también daña las membranas de osmosis inversa [25].

2.2.7 Propiedades físicas y químicas del ozono

Para poder utilizar el ozono como desinfectante en el tratamiento del agua, es necesario comprender sus propiedades físicas y químicas, ya que un complicado conjunto de factores determina la solubilidad, reactividad y estabilidad del ozono [26].

El ozono es un compuesto que se compone de tres átomos de oxígeno. Dado que el enlace covalente tiene unas fuerzas de atracción muy bajas entre átomos, por ende, la molécula de ozono que se forma es muy inestable. Dicha inestabilidad suele verse incrementada a medida que aumenta la temperatura y presión, alcanzando incluso, la total inestabilidad de este gas por encima de los 200 °C. El gas ozono generado no puede almacenarse si no es directamente para su aplicación. Por esta inestabilidad, el gas ozono es muy oxidante, ya que fácilmente puede ceder uno de sus átomos a otros compuestos oxidándolos inmediatamente, siendo muy utilizado como desinfectante y germicida. En la **Tabla 2** se expone la comparación de las propiedades del gas ozono y del oxígeno molecular.

Tabla 2. Comparación de las propiedades del oxígeno y el ozono molecular, tomado de [26].

PROPIEDADES	OXÍGENO (O ₂)	OZONO (O ₃)
Color	No presenta	Azulado
Olor	No presenta	Picante (umbral olfativo 0.01 – 0.015 ppm)
Peso específico	1.429 kg O ₂ /m ³	2.144 kg O ₃ /m ³
Peso molecular	32	48
Potencial de oxidación	1.23v	2.07v
Punto de ebullición a 100kPa	-138 °C	-112 °C
Solubilidad	0.049	0.64 ppm

Una de la propiedad más importante del ozono es su potencial de oxidación que es mayor al de las otras sustancias desinfectantes. Como se puede observar en la **Tabla 2**, el ozono (O₃) posee un potencial de oxidación de 2.07 Voltios, en comparación con desinfectantes como el cloro que posee 1,36 Voltios de potencial de oxidación, además de que es más eficaz debido a su densidad que es más pesada que la del aire.

De la misma forma en la **Tabla 3** se detalla la vida media del ozono en fase de gas y residual con el agua a efectos de la temperatura.

Tabla 3. Vida media del ozono a efectos de temperatura, tomado de [26]

OZONO EN FASE GAS		OZONO RESIDUAL EN EL AGUA (pH7)	
Temperatura °C	Tiempo	Temperatura °C	Tiempo
-50	3 meses	15	30 min
-35	18 días	20	20 min
-25	8 días	25	15 min
20	3 días	30	12 min
120	1.5 horas	35	8 min
250	1.5 seg	-	-

Es importancia tener en cuenta y conocer estas características físico - químicas a la hora de utilizar este gas ozono en tratamientos de desinfección.

2.2.8 Métodos de generación del ozono

Para la formación del ozono es necesario aplicar la energía suficiente a la molécula de oxígeno para separar y generar radicales libres de oxígeno. De esta forma, lo que ocurre es que la molécula de oxígeno reacciona con un átomo de oxígeno para formar una nueva molécula conocida como el ozono (O₃).

El ozono se puede obtener en dos formas: fase gaseosa para desinfectar y la desodorizar ambientes como superficies de tipo pisos, drenajes, etc. Fase acuosa: para ello se utiliza el agua como medio de transporte de ozono y su uso depende de la necesidad de controlarla en concentración idóneas.

La formación de ozono se puede generar de diferentes maneras, entre las más utilizadas se encuentran: la electrólisis, la radiación ultravioleta o por descargas eléctricas [27].

2.2.8.1 Electrólisis

Se da por electrolisis del ácido sulfúrico, el rendimiento es pobre y no se utiliza habitualmente (el consumo de energía es 2-5 veces mayor que el del método de descarga eléctrica) [27].

2.2.8.2 Radiación ultravioleta

A nivel de la industria no se aplica este procedimiento debido al bajo rendimiento de generación de ozono que se encuentra en valores menores a 1 g/m³ y al alto consumo energético que es del orden de 3 KWh/g. Este es el método de producción natural del ozono estratosférico [27].

2.2.8.3 Descarga corona

Es el método que se emplea normalmente, la misma que consiste en hacer pasar oxígeno a través de un campo eléctrico formando distintas especies químicas excitadas (átomos, iones, radicales, etc.) que se recombinan para producir el gas ozono (O₃) [27].

2.2.9 Toxicidad

El ozono es un gas altamente oxidante y tóxico; por lo tanto, es importante conocer los efectos que puede producir en el ser humano al tener un contacto prolongado con este tipo de gas y la normativa que regula y limita los niveles máximos y dosis de exposición.

El materiales y equipos usados para la ozonización pueden verse afectados por los ácidos y oxido nítricos, que pueden ser producidos durante su generación. Hay que tomar medidas especiales en la manipulación el ozono y evitar el contacto directo de los trabajadores con él. Los efectos oxidantes del ozono pueden afectar a los ojos y a las vías respiratorias.

2.2.10 Normativa

El ozono, un gas altamente oxidante y bactericida, suele ser altamente toxico a exposiciones no controladas; por eso se establecieron normativas para los niveles máximos permitidos según el tiempo de exposición al ozono.

La exposición al gas ozono durante cortos espacios de tiempo en concentraciones superiores a unas décimas de ppm genera leves dolores de cabeza, resequedad de la garganta, irritación de las membranas mucosas y la nariz. Pero, el mantenerse dentro de un espacio con alta concentraciones y tiempos prolongados de gas ozono puede provocar acumulación de líquido en los pulmones, cefaleas frontales, sensación de enrarecimiento del aire, acidez en la boca, opresión en el pecho y anorexia. Cuando el lapso es mucho más prologando a concentraciones altas genera sensación de sofocación, taquicardia, vértigo, presión sanguínea baja, tos, severos calambres en el pecho y dolor general del cuerpo. Mientras que con niveles altos de concentración genera la aparición de asma, alergias y otros desordenes respiratorios.

Se han encontrado tumores y daño genético directo e indirecto en tejidos de animales y/o humanos que han sido estudiados. Se estima que una concentración de 50 ppm por un tiempo de exposición de 30 minutos podría ser fatal, por lo que se vuelve imperativo controlar el tiempo y concentración del gas al que se expone [28].

2.2.11 Límites permisibles

De acuerdo con los valores normados en las tablas de TLV se clasifican los valores límite permisible de ozono en el ambiente de acuerdo con la siguiente clasificación:

Tabla 4. Clasificación de los valores límites permisibles de ozono

NIVEL	CONCENTRACIÓN
Trabajo pesado	0.05 ppm
Trabajo moderado	0.08 ppm
Trabajo ligero	10 ppm

Para condiciones de trabajo que se desempeñan en periodos menores a 2 horas de exposición al gas tanto en condiciones de trabajo pesado, moderado o ligero se permiten concentraciones de hasta 0.2 ppm [29].

2.2.11.1 Límites permisibles por la OMS

La OMS expone su constitución de siguiente manera: La salud es una condición total de bienestar físico, mental y social, y no solo la ausencia de dolencias o de enfermedades; de ahí que se ponga límites en función de agentes contaminantes, y uno de ellos es el ozono, el cual no debe ser superior a 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, media de ocho horas [30].

2.2.11.2 Norma Ecuatoriana de la Calidad del Aire

Esta norma establece los límites máximos permisibles de concentración promedio de ozono en 3 factores: 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ es alerta, 400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ es alarma y 600 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ es emergencia [30].

2.2.12 Solubilidad del ozono en el agua

El ozono es soluble en agua y se puede disolver hasta 10 ppm. El ozono es 13 veces más soluble que el oxígeno debido a su triple enlace que lo convierte en una molécula polar

semejante a las moléculas de agua [25]. Los parámetros que controlan la solubilidad del ozono en agua son:

- Concentración del ozono en el gas en contacto con el agua.
- Temperatura del agua.
- Demanda de ozono del agua.
- Eficiencia del medio de contacto gas-agua.

Entre mayor sea la concentración de gas ozono en contacto, mayor es su solubilidad y la cantidad de masa de ozono transferida al estado líquido. La solubilidad del ozono es inversamente proporcional a la temperatura. De igual forma, la presión es otro parámetro que afecta de alguna manera la solubilidad. Un incremento en la presión del agua aumenta la solubilidad del ozono [25].

2.2.13 Efectos del ozono en la desinfección del agua

2.2.13.1 Eliminar la turbidez

Mediante la ozonización se puede lograr eliminar en cierto porcentaje la turbidez del agua usando una combinación de oxidación química y neutralización de cargas. Son partículas coloidales que dan paso a la turbidez manteniendo en suspensión partículas de carga negativa neutralizadas por el ozono. El ozono destruye las partículas coloidales mediante la oxidación de materias orgánicas [31].

2.2.13.2 Eliminación del color, olor y sabor del agua

La supresión de sabores y olores indeseados que en ocasiones podría presentar el agua al ser tratada con el ozono, es debido a la oxidación de la materia orgánica, de los metales pesados, de los sulfuros y de los compuestos extraños, pero al final del proceso proporciona una mejora

en la calidad y el aspecto del agua, haciéndola así más adecuada para su ingesta y uso en actividades agrícolas [31].

2.2.13.3 Efectos sobre virus y bacterias

La inactivación de bacterias con ozono es una reacción de oxidación. El primer lugar del ataque del gas ozono es a la membrana de la bacteria; las vías de acceso pueden ser por el camino de las glicoproteínas o por los aminoácidos.

El ozono también es capaz de destruir la actividad enzimática de la bacteria al conducirse sobre los grupos de sulfhídricos en determinadas enzimas. En ese momento la bacteria ha perdido su capacidad de degradar azúcares y generar gases. El deshidrogenado de fosfato 6 de glucosa es destruida igual que el sistema enzimático [26], [32], [33]

Los virus son microorganismos acelulares, ya que solo están formados por ácidos nucleicos y, además, por medio de la proteína que lo envuelve llamada cápside. Es decir, los virus son organismos parásitos que se reproducen solamente dentro de una célula huésped. Este es el primer objetivo de la acción del ozono sobre el virus: la ruptura de la cápside. Si las concentraciones de ozono son elevadas, la cápside en este caso sí que serán destruidas totalmente. De este modo el ácido nucleico se liberará, dejándolo desprotegido del ozono, quien lo acabará de eliminarlo [26], [32], [33].

Como se ha mencionado anteriormente, el gas ozono tiene un gran potencial para eliminar un espectro grande de microorganismos patógenos presentes en el agua, como se puede ver en la **Tabla 5**.

Tabla 5. Microorganismos patógenos que se puede quitar mediante el ozono, tomada del [26].

Aspergillus Niger	Coxsackie Virus A9	Influenza Virus	Salmonella typhimurium
Bacillus Bacteria	Diphtheria 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	Phytophthora parasitica	Streptococcus Bacteria

2.2.14 Factores que disminuyen la capacidad de actuar del ozono

2.2.14.1 Turbiedad del agua

En condiciones normales, los microorganismos no pueden considerarse en estado libre, si no que normalmente quedan adheridos a la superficie de minerales o materia orgánica presente en el agua; y este tipo de materia o minerales no son limitantes de la eficacia desinfectante del ozono. Los materiales orgánicos pueden requerir mucho ozono, limitando su acción desinfectante sobre los microorganismos. Antes es importante mejorar la calidad en impurezas y materia orgánica disuelta para lograr una óptima desinfección al inyectar el ozono.[33]

2.2.14.2 Temperatura del medio

La destrucción de los microorganismos aumenta con el incremento de la temperatura. La temperatura determina, de acuerdo con la teoría de Van't Hoff-Arrhenius, la velocidad con que el desinfectante atraviesa la envoltura del microorganismo y su índice de reacción con el sustrato. Un incremento de 10°C en la temperatura también incrementa la velocidad de reacción en un factor de 2 o 3 [33], [34]. Por tanto, en aguas calientes obtiene el mismo efecto

de desinfección o purificación que el que se logra en aguas frías con mucho menos ozono residual y siendo aún más seguras su aplicación.

2.2.14.3 El pH de agua

El efecto del pH del agua y también su acción sobre las bacterias y virus se califica como pequeño, esto es para un rango de pH de 5.8 a 8, ya que los cambios en la eficiencia de desinfección debidos al pH vienen determinados por cambios en el índice de destrucción del ozono. Sin embargo, algunos autores han evidenciado que, para distintos valores de pH, a valores fijos de concentración de ozono residual, el grado de inactivación de las bacterias prácticamente no sufren ningún cambio [33].

2.2.14.4 Concentración

La concentración de la disolución necesaria del gas desinfectante variará según las condiciones de uso que se le dé, además se debe considerar el medio donde se usa y la finalidad para lo que se destina a emplearse. Por lo tanto, las disoluciones se deberán prepararse siguiendo estrictamente las instrucciones del fabricante [27].

2.2.14.5 Tiempo de contacto

La razón de ser un desinfectante suele ir acompañado de un tiempo mínimo de contacto para asegurar su eficiencia. Este tiempo de contacto mínimo puede variar en función de la actividad del desinfectante. Cuanto más contacto, más organismos serán destruidos. El tiempo es inmediato dependiendo del tipo de inyección, si es para el agua en reposo y por medio de algún difusor, si es para un caudal suele estar entorno 5 a 20 minutos, durante el cual deben poder asegurar un efecto biocida.[27]

2.2.15 Métodos de medición del ozono

2.2.15.1 Método yodo métrico

Este método se aplica para medir concentraciones de ozono tanto en fase gaseosa como en fase líquida. Para medir la concentración de ozono en fase gas lo primero que se hace es burbujear un volumen conocido de un gas en el interior de una solución de ioduro de potasio KI. Por otra parte, para medir la concentración de ozono en fase líquida, simplemente se hace una mezcla de volumen de la muestra de líquido a medir con una disolución de ioduro de potasio KI [26]. La misma dará lugar a la aparición del yodo, el cual se debe ser titular inmediatamente con el tiosulfato de sodio ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) hasta la aparición de un color amarillo pálido. La concentración del gas ozono se estima, calculándose a partir del consumo de tiosulfato de sodio [28], [34].



2.2.15.2 Absorción de luz UV

La medición de la concentración del gas ozono en la fase de gas o líquida puede llevarse a cabo mediante el método de la luz ultravioleta. Este método radica en medir la atenuación de un haz de luz ultravioleta con longitud de onda de 254 nm. mediante una celda de absorción que contiene una muestra del gas o líquido a medir. Esta atenuación del haz de luz se determina mediante la valoración y comparación de la señal proveniente del sensor de muestra y la señal que proviene del sensor de referencia[28], [32], [33].

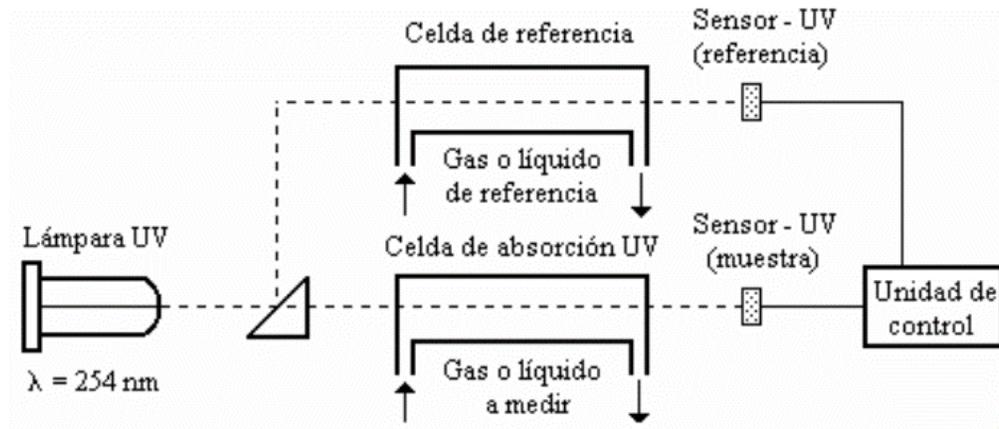


Fig. 4 Esquema de un equipo ozonificador por absorción de Luz Ultravioleta

Una de las consideraciones de este método es comprender que, la atenuación del haz es proporcional a la concentración de ozono existente en la muestra. La concentración de ozono se determina utilizando la ley de Beer- Lambert, ecuación, que se presenta a continuación.

$$I_m = I_r e^{-\alpha LC} \quad (3)$$

Donde:

- **I_m** = atenuación del haz de luz.
- **I_r** = intensidad de la luz de referencia.
- **α** = coeficiente de absorción (0°C y 760 mmHg).
- **L** = longitud de la celda.
- **C** = concentración del gas ozono.

Al aplicar esta técnica, la luz ultravioleta presenta injerencias positivas con varios contaminantes que aparecen en las muestras que absorben luz a 254 nm y entre estos compuestos aparecen los hidrocarburos aromáticos, el vapor de mercurio, el dióxido de

azufre, etc. Con estos métodos de absorción luz UV se puede medir concentraciones de hasta 600 g/m de ozono residual contenidos en el agua [26], [31], [34].

2.2.15.3 Método amperométrico

Este método amperométrico puede utilizarse para las evaluaciones continuas y también automáticas del ozono residual en el agua. El uso del electrodo de membrana para la determinación del ozono residual consiste en un cátodo de oro (Au), un ánodo de plata (Ag), con electrolitos y una membrana de Teflón. Varias casas comercializadoras disponen de dicho tipo de electrodos en distintas configuraciones que ofrecen distintos rangos de aplicación, así como diferentes exactitudes según el electrodo a emplear. La forma de funcionamiento de este tipo de dispositivos se puede resumir en lo siguiente: El ozono disuelto en agua atraviesa la membrana y los electrolitos para finalmente alcanzar hasta la superficie del cátodo. La diferencia del potencial eléctrico aplicada a las terminales del cátodo y el ánodo hace que el ánodo fuerce a liberar electrones al electrolito. Los electrones se desplazarán a través del electrolito hasta alcanzar el cátodo, donde encontrarán una molécula de ozono que, al ser reducida, dará origen a una molécula de oxígeno. El generará el paso de corriente eléctrica, que será proporcional a la concentración del ozono disuelto en el agua [28], [31], [34].

2.2.15.4 Método de colorimetría

N´N-Dietil-p-fenilendiamina (DPD): Este procedimiento consiste en llevar a cabo una reacción entre la muestra de agua ozonificada y el compuesto N´N-Dietil- fenilendiamina (DPD), llevando a cabo una reacción entre el DPD con el ozono existente en la muestra de agua, lo cual resulta en la aparición de una coloración en la muestra que corresponde un color rosa. La tonalidad adquirida corresponde a una concentración de ozono residual en la

muestra. Como resultado se compara la muestra contra una escala de ozono residual, que tiene diferentes escalas de colores rosa [26], [34].

Índigo carmín (C₁₆H₈N₂Na₂O₈S₂): o indigotina es un colorante sintético. Esta técnica consiste en titular la muestra de agua tratada mediante la ozonificación con una solución de índigo carmín hasta que dicha muestra adquiera la coloración azul de la disolución; el agua tomará esa coloración azulada hasta que todo el ozono contenido sea consumido al oxidar el colorante, es decir, la concentración de gas ozono será proporcional a la dosis de índigo carmín que ha sido oxidado [26], [35].

De acuerdo con el manual de procedimientos, la preparación de la solución de índigo carmín consiste en la adición de 1.6 gramos de índigo carmín a 400 ml de agua destilada; se agitada la mezcla obtenida y se filtra. La solución experimentada debe conservarse refrigerada. Cada 0.05 mililitros de la solución obtenida que sea oxidada por el ozono de 200 ml de muestra de agua ozonificada equivale a una concentración de ozono residual de 0.06 mg/l [36].

2.2.16 Dosificación de ozono para la purificación del agua

La dosis de aplicación en la desinfectante del agua está relacionada con un factor "CT" que es la resultante de la multiplicación de la concentración residual del ozono en el agua por el tiempo de contacto. La práctica europea contempla que se aplique 0,4 mg/l con un tiempo de contacto de 4 minutos, un CT = 1.6. Pero la EPA (Environmental Protection Agency) en EE. UU, señala que un CT = 0.72 aplicados al agua a 20°C es suficiente para desactivar un 99.9 % de los quistes parásitos (*Giardia lamblia*) y virus entéricos que son transmitidos por el agua y complejos de eliminar ya que también, dependen la temperatura del agua [37]. A continuación, **Tabla 6** se presentan los CTs sugeridos por la EPA para diferentes

temperaturas del agua, aunque esto puede conllevar algunos factores que no se puede controlar o medir para una recomendación exacta.

Tabla 6. Factor CT (Concentración - tiempo) requerido por temperatura de agua, obtenida de [37]

TEMPERATURA DEL AGUA °C	CT
<1	2.9
5	1.9
10	1.4
15	0.95
20	0.72
>25	0.48

La IBW A (International Bottled Water Associations) propone aplicar una dosis de 1 a 2mg de ozono por litro de agua, en un tiempo de aplicación que puede estar en rangos de 4 a 10 minutos, manteniendo una concentración total de ozono residual entre 0.1 a 0.4 mg/1 por un tiempo de contacto que puede ir de los de 4 a 10 minutos [16].

La dosificación óptima del desinfectante, por otra parte, variará dependiendo de las condiciones y la finalidad de su uso, e igual de importante es la adecuación a la cual se destina, al entorno en el que ha de aplicarse y la cantidad de ozono requerida. Estas variables se relación entre a través de la siguiente **ecuación 4**.

$$Pd = Ds * Cl \tag{4}$$

- Pd = producción de ozono deseada (mg/h)
- Ds = Dosis de ozono (mg/L)
- Cl = caudal de agua (GPM o L/h: 1G = 3.78L)

2.2.17 Sistema de generación del ozono

2.2.18 Generación de ozono por descargas eléctricas o corona

La descarga eléctrica de alto voltaje es el método más eficiente y el que se emplea habitualmente para obtener ozono, que consiste en hacer pasar oxígeno a través de un campo eléctrico para disociarla y formar radicales libres de oxígeno. En este campo eléctrico se aceleran los electrones del espacio de descarga; en su trayectoria de recorrido, estos electrones colisionan con oxígeno y logran la disociación de sus átomos generándose especies químicas excitadas que se recombinan para formar ozono.[27]

Para una formación correcta y uniforme de la molécula de ozono se requiere de un reactor dentro de una cámara, este reactor se conforma por dos electrodos separados por una distancia milimétrica; al espacio entre ambos electrodos, se le conoce como espacio de descarga, a continuación, se muestra un modelo de la celda de descarga eléctrica en la **Fig. 5**.

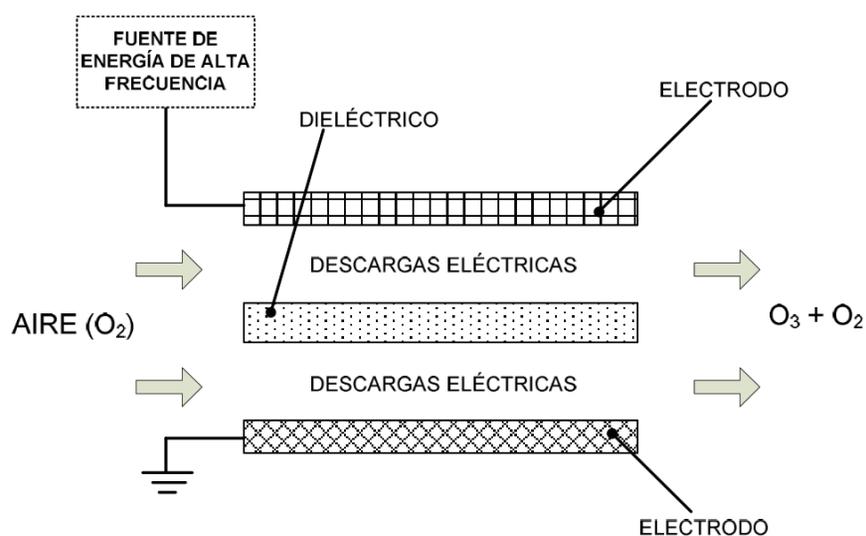


Fig. 5 Elementos de una celda de descarga eléctrica, obtenido de [35].

La producción de ozono por un efecto corona se basa en un área de ionización. En un campo eléctrico, los electrones del gas cargadas negativamente son atraídos por el electrodo

positivo; los núcleos positivos o iones son igualmente atraídos por el electrodo negativo. Por consiguiente, el campo eléctrico tiende a separar los electrones de sus núcleos respectivos. Las fuerzas que ligan a los electrones a sus núcleos son, no obstante, tan grandes, que se requeriría, para separarlos por este efecto solamente, una tensión imposible de alcanzar [25].

La generación del ozono dentro de una descarga corona en si en un proceso exotérmico. Se estima que de 85 a 95 % de la energía eléctrica aplicado durante el proceso de formación en convertido a calor. La cantidad de ozono formado por la descarga es directamente proporcional a la cantidad de energía aplicada [25]. A continuación, se presenta la ecuación:



Los variables principales que intervienen en la formación del ozono son los siguientes:

- Geometría de la celda de descarga (placas paralelas o barreras dieléctricas cilíndricas)
- Contenido de oxígeno del gas oxigenado (aire de ambiente o aire puro)
- Voltaje aplicado
- Frecuencia aplicada
- Dimensiones del espacio libre de paso del gas
- Superficie total de área de descarga
- Propiedades del dieléctrico
- Temperatura y presión

2.2.18.1 Generadores comerciales existentes

Los sistemas de generación de ozono comerciales son análogos, con diferentes formas, dimensiones y arreglos de los electrodos en la celda. A continuación, se detalla en la **Tabla 7** las características de algunos ozonizadores comerciales e industriales existentes.

Tabla 7. Características básicas y comerciales de equipos industriales para la generación de ozono, tomado de [35].

PARÁMETROS	SIEMENS - HALSKE	OTTO	VAN DER MADE	WELSBACH C y G
VOLTAJE (V)	6000	20000	7000 - 8000	15000
FRECUENCIA (Hz)	10000	500	500	50 - 60
GAS	Oxígeno o aire	Aire	Aire	Oxígeno o aire
REACTOR	Tubular	Placas paralelas	Tubular	Tubular
ELECTRODOS	Agua	Aluminio o hierro	Acero inoxidable o Agua	Acero inoxidable y grafito o aluminio
DIELÉCTRICO ESPACIO DE DESCARGA (mm)	Vidrio 1.5	Vidrio 3	Vidrio 1	Pyrex (Vidrio) 2.5
ESPELOR DEL DIELÉCTRICO (mm)	1.5	3.2 – 4.8	2	2.5
CONCENTRACIÓN DE OZONO (mg por litro de aire)	8	3 - 5	1.5 - 3	10 - 12
PRODUCCIÓN NOMINAL (Kg por hora)	0.6 Aire 1.2 (Oxígeno)	1.815	0.113	1.134 (Aire) 2.208(Oxígeno)
SISTEMA DE REFRIGERACIÓN	Agua	Agua pulverizada	Agua	Agua

2.2.19 Elementos que conforman un equipo generador de ozono

2.2.19.1 Fuente de alimentación del sistema

El sistema de alimentación eléctrica ya sea directa o alterna, es el que suministra la señal a una determinada frecuencia y tensión a la celda que tiene la función de producir las descargas suficientes. Los rayos son descargas eléctricas de potente intensidad, que se producen en poco tiempo, y suelen ser el resultado del contacto entre las partículas que presentan con

carga eléctrica positiva en la tierra y partículas con carga negativas. Su intensidad y tensión son muy dependientes de muchas condiciones [30], aunque es posible hacer cálculos de un voltaje mínimo para la cámara generadora y esto depende directamente del gas de alimentación como se puede observar en la relación:

$$V_s = k_1 * D_g * P + k_2 \quad (6)$$

Donde:

- V_s = Voltaje mínimo requerido
- K_1 = 29.64 para aire y 26.55 para oxígeno
- K_2 = 1350 para aire y 1480 para oxígeno
- D_g = espesor del espacio de descarga (mm)
- P = presión absoluta del gas (kP)

Además, los equipos generadores de ozono se pueden clasificar de acuerdo con su frecuencia de funcionamiento donde tenemos:

- Generadores de baja frecuencia (50 a 60 Hz).
- Mediana frecuencia (60 a 1000 Hz).
- Alta frecuencia (más de 1000 Hz).

De acuerdo con estos rangos de operación, la producción de ozono a frecuencias bajas llevaría al consumo elevado de energía, esto hace necesarios la disponibilidad de materiales para obtener el mejor rendimiento de funcionamiento del generador de ozono.

2.2.19.2 Transformador eléctrico

Un transformador crea un flujo magnético en su núcleo permitiendo variar o manipular en determinados rango el voltaje o la intensidad de entrada a las condiciones deseadas en su salida.

Estos transformadores están compuestos por elementos básicos como:

- Núcleo. - Está constituido por chapas de acero al silicio aisladas entre ellas las cuales permiten conducir el flujo magnético.
- Devanados. Se compone de una bobina primaria y otra bobina secundaria, en uno de sus extremos se encuentra hilos de cobre enrollados alrededor del núcleo y a la vez, está cubierta por una capa aislante.
- Algunos transformadores como el Flyback poseen una relación de transformación de 1:500 que los hace posible trabajar a altas frecuencias y voltajes.

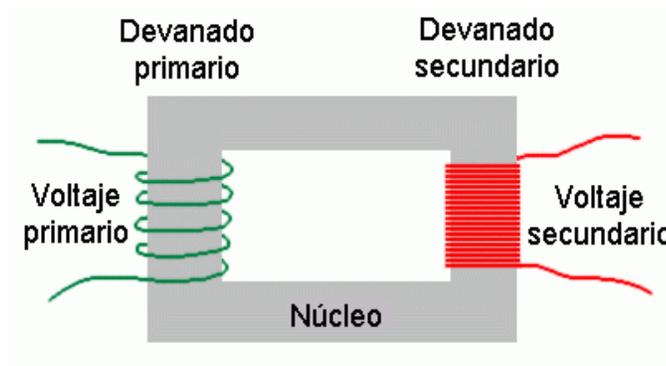


Fig. 6 Transformador eléctrico simple, obtenido de [25]

2.2.19.3 Gas de alimentación

Uno de los elementos fundamentales para generar ozono es el oxígeno que se suministrará a la celda, la cual puede ser oxígeno de alta pureza o aire, cuya concentración de oxígeno en volumen es del 21%. Uno de los otros elementos que se encuentra en el aire, y que debe ser

considerado en la generación del ozono, es el vapor de agua o bien el grado de humedad presente en el aire ya sea ambiente o de un compresor.

El índice de humedad del aire se mide mediante la temperatura de punto de rocío, que se puede definir como la temperatura que resulta de la condensación del vapor del agua contenida en el aire. Las temperaturas de punto de rocío que utilizan los generadores del gas ozono oscila entre los -60 y -80 °C [26]. El vapor de agua contenido el aire puede reaccionar con los óxidos de nitrógeno que se forman en la zona de descarga eléctricas del reactor y conformar a su vez el ácido nítrico, compuesto químico que puede causar daños en los electrodos del reactor. Por este motivo, es necesario controlar el grado de humedad presente en el aire, mediante secadores, tales como la sílica gel.

La calidad del gas ozono producido depende mucho de las características del gas introducido a la cámara generadora, como ya se mencionó este aire ambiente puede ser tratado, sin tratar, u oxígeno puro. Esto también dependerá de la temperatura ambiente, por tanto, la concentración y la calidad de ozono generada es muy variable dependiendo de estos parámetros ya mencionados.

2.2.19.4 Celda de descarga

Para diseñar una celda de descarga se dispone de dos tipos: las celdas cilíndricas y celdas paralela. Dependiendo del uso y selección se debe tener diversos parámetros en cuenta, como, la disponibilidad de espacio suficiente dentro del generador para los electrodos y la capacidad de disipación de calor de la celda, ya que si se sobrepasa de temperatura en 50° C se produce una degradación inmediata del ozono producido llegando a ser ineficiente. Además, en el caso de aplicar la alta tensión a las celdas cilíndricas, estas presentan un desgaste adicional

del 22% aproximadamente, en comparación de las celdas paralelas, pero tiene mejor rendimiento [30].

Se coloca un material dieléctrico en el medio de los electrodos formando una zona activa donde, inyectando un flujo de aire seco u oxígeno puro en la región de descarga se consigue la formación del gas ozono. Dicha celda por medio de los electrodos se conecta a la alimentación de alta tensión de un transformador, lo que permite así formar un campo eléctrico intenso y uniforme a lo largo de la zona activa [31].

Una vez construida la celda generadora de ozono, da lugar a la aparición de dos capacitancias conectadas en serie, siendo una de ella la capacitancia **C_d** formada por el material dieléctrico que se encuentra en el medio de los electrodos, y la capacitancia **C_a**, formada por el gas de alimentación que atraviesa el espacio de descarga dentro de la cámara.

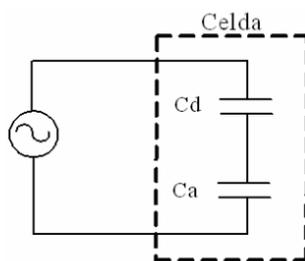


Fig. 7 Circuito equivalente de una celda.

Por eso, para el caso de la descarga eléctrica a través de un material aislante como el vidrio, se desarrollan filamentos muy finos y a este conjunto de filamentos sobre la zona activa se le denominan microdescargas. A este fenómeno de descargas eléctricas en concreto se denomina, descargas en barreras dieléctricas (DBD) y se describe sus características principales en la siguiente tabla.

Tabla 8. Características principales de las micro descargas de una celda, obtenida de [26]

CARACTERÍSTICAS	UNIDADES
Duración	1 – 10 ns
Radio de filamento	0.1 mm
Corriente máxima	0.1 A
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 °C

El diseño de una cámara tubular considera un valor de capacitancia y una resistencia en paralelo que representa el valor de pérdidas de sus dieléctricos. El valor de la capacitancia se puede obtener mediante la siguiente fórmula:

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d} \quad (7)$$

Donde:

- C: capacitancia (pico Faradios)
- $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ (F/m)
- $\epsilon_r = 5$ (constante dieléctrica del vidrio)
- A= área efectiva de la celda (m²)
- d = separación entre electrodos (m)

El consumo de potencia de la celda se puede obtener mediante la siguiente formula.

$$Pg = \frac{1}{2} CV^2 f \quad (8)$$

Donde:

- P_g = potencia consumida (W)
- C = capacitancia de la celda
- V = voltaje mínimo de ruptura de la celda
- f = frecuencia de operación del circuito

2.2.19.5 Sistema de enfriamiento

La incorporación de un sistema de refrigeración que se encarga de disipar el calor producido por las microdescargas en la celda es un factor no menor para una buena producción del gas ozono. La refrigeración de los electrodos permite minimizar los fenómenos de descomposición del ozono por efecto térmico; si la temperatura del reactor supera los 50°C, las moléculas de ozono se desintegran y se recombinan para formar de nuevo el oxígeno molecular. Debido a esta inestabilidad de la molécula de ozono, es fundamental tener presente la temperatura de funcionamiento de la celda y la cámara generadora [27].

En el diseño de las celdas paralelas, existe más disponibilidad de refrigeración, ya que se puede implementar un disipador que se adecue a toda la zona activa sin complicación alguna por causa de la región de descarga.

Generalmente, estos sistemas tienden a recalentarse debido a la generación repetitiva de descargas eléctricas sobre los electrodos, En la generación del gas ozono sólo del 4% al 12% de la energía suministrada es utilizada, el resto se disipa en forma de calor y luz [34].

2.2.20 Sistema de inyección del ozono

2.2.20.1 Difusores

Un muy buen método de aplicar el ozono es el clásico sistema europeo de doble tanque con difusores. Los tanques tienen 6m de altura y trabajan en serie. En el primer tanque se satisface

la demanda de ozono y se genera un residual de ozono disuelto; el tiempo de residencia será de un minuto y se inyectará 90% del ozono en este tanque. El segundo tanque asegura un CT adecuado con cuatro minutos de residencia y una pequeña adición de ozono para mantener un residual de 0.4 mg/L.

Los inconvenientes de este método son la altura, el costo y la necesidad de rebombeo posterior [37].

2.2.20.2 Difusión por burbujeo

Para este método se hace uso de un difusor, similar al mostrado en la **Fig. 8**, que está construido con material cerámico. Este inyector tiene en su superficie orificios del orden de micras, a través de los cuales es liberado el ozono hacia el agua en forma de burbujas finas.

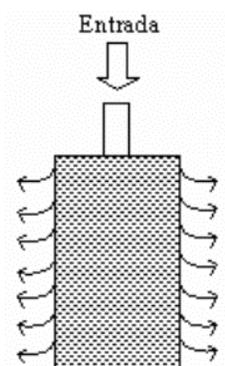


Fig. 8 Difusor de gas ozono

2.2.20.3 Inyector Venturi

A diferencia del método de difusor, el Venturi puede generar un vacío en la garganta del inyector y succionar así el ozono **Fig. 9**. Esto reduce la posibilidad de fugas de ozono que es irritante para los pulmones y posibilita el uso de generadores de ozono que trabajan a vacío sin necesidad de un compresor de alimentación de aire, otra ventaja del Venturi es que

permite inyectar ozono en el agua bajo presión sin necesidad de rebombar el agua después de disolver el ozono.

La disolución con Venturi se logra en línea y se utiliza un tanque más bien para darle tiempo de reacción al ozono; en este caso nos importa más el volumen que la altura [37].

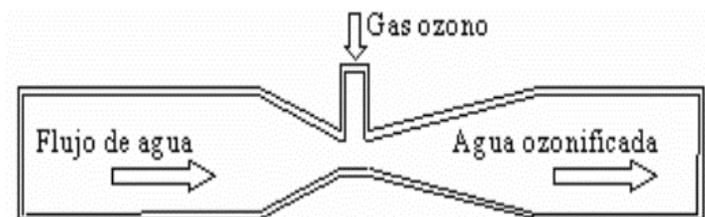


Fig. 9 Inyector Venturi

Dependiendo de las necesidades de aplicación del ozono se puede utilizar una u otro método de inyección para mayor eficiencia, así mismo cabe recalcar que más que el tipo de inyección es más importante la concentración del gas ozono con respecto al caudal que se desee tratar o tener en contacto.

2.2.21 Materiales resistentes a la corrosión del gas ozono.

Todos los materiales deben tener una resistencia a la acción oxidante del gas ozono, por lo que hace necesario llevar un análisis previo de los materiales que se puede utilizar y que existan en el medio. Además, esta selección de los materiales depende directamente de la concentración del ozono y de sobre todo del gas de alimentación, ya que, si se provee oxígeno al reactor en lugar del aire, los materiales a utilizar deben ser mucho más resistentes, de lo contrario puede generar otros compuestos que contaminen el agua.

Tabla 9. Materiales resistentes a la corrosión del gas ozono, tomado de [35].

PARTES DEL SISTEMA	MATERIALES	OBSRVACIONES
REACTOR	Cuarzo (vidrio)	Resistentes
	Acero inoxidable (No. 1.4435 o 1.4404)	Reactores a gran escala para tratamiento de aguas residuales industriales
	PVC	Atacado progresivamente por el ozono
	Hormigón	Para reactores a mayor escala tratamiento industriales
	Vidrio	Propenso a rupturas
TUBERÍAS Y VÁLVULAS	Acero inoxidable	Posible rápida corrosión con concentraciones de sales
	Kalrez (Caucho sintético)	
	PTFE (Politetrafluoroetileno)	Costo elevado, difícil oxidación, estable en el tiempo
	PFA (Perfluoroalcóxido)	
	PVC (Policloruro de vinilo)	Bajo costo, oxidación lenta, poco menos estable
SELLADO DE ENTORNOS	PVA (Acetato de polivinilo)	
	Politetrafluoroetileno	
	Tipo Karlez	
	Tipo Kynar	
	Tipo Viton	

CAPÍTULO 3: MARCO METODOLÓGICO

3.1 Tipo de investigación

El siguiente que se expone a continuación, sigue la filosofía de los proyectos de investigación aplicada, ya que a partir de un conjunto de mecanismos se obtiene de forma artificial el ozono (O₃) en su estado gaseoso, para la purificación del agua que alimentará a un invernadero hidropónico. Además, esta es una investigación descriptiva, detallando cada uno de los componentes que constituyen el modelo propuesto. Esto requiere una comprensión profunda de los aspectos teóricos y los estudios previos relacionados con el tema, respaldados por una investigación documentada, puesto que se recopila información de libros, papers, journals, y entre otros. Finalmente, se aplican los principios de la investigación experimental en la planificación y las estrategias dentro del ámbito de la ingeniería, en relación con el objetivo principal del estudio.

3.2 Diseño de la investigación

A continuación, se definen cada una de las etapas necesarias para la implementación del prototipo generador de ozono, con el fin de cumplir con los objetivos planteados y llevar un registro didáctico del desarrollo del dispositivo.

Fase 1: Adquisición de la información

Actividad 1: Se accederá a diferentes portales webs, revistas, papers, artículos y documentos técnicos para realizar un análisis detallado sobre los generadores de ozono existentes.

Actividad 2: Investigar sobre el estado del arte del desarrollo de equipos generadores de ozono para la desinfección de aguas de riego en concreto.

Actividad 3: Se realizará un análisis de características, parámetros y beneficios de la aplicación del ozono en la purificación del agua con el método propuesto.

Fase 2: Diseño estructural y mecánico del prototipo.

Actividad 1: Definir los parámetros de diseño basándose en las investigaciones previas.

Actividad 2: Definición de las funciones y partes que componen la celda generadora de ozono.

Actividad 3: Estudio e identificación de materiales que cumplan con los requisitos mínimos de diseño.

Actividad 4: Selección de los materiales óptimos que cumplan con las especificaciones de diseño.

Actividad 5: Se realizará un diseño acorde a las necesidades del equipo en cuanto a su capacidad de generación y las condiciones de uso a la cual será destinada.

Actividad 6: Evaluar las diferentes tecnologías disponibles en el medio para la construcción de equipos de generación de ozono.

Actividad 7: Calcular y seleccionar los materiales que se utilizaran para el prototipo propuesto.

Actividad 8: Determinar los requerimientos y las condiciones óptimas de trabajo del equipo generador de Ozono para su máxima eficiencia.

Fase 3: Implementación de diseño al prototipo funcional.

Actividad 1: Construcción del prototipo generador de ozono según el diseño propuesto.

Actividad 3: Corrección del prototipo de ser necesario.

Fase 4: Evaluación del correcto funcionamiento del prototipo desarrollado

Actividad 1: Sometimiento a pruebas para validar el prototipo.

Actividad 2: Se dará a conocer los resultados de los análisis microbiológicos obtenidos de la muestra de agua en el laboratorio.

Actividad 3: Documentación de resultados.

Actividad 4: Se documentarán los resultados de las pruebas mediante referencias y gráficas de la comparación del agua en las distintas fases de purificación obtenidas.

CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1 Especificación de diseño

El propósito de este capítulo es generar un diseño final del prototipo generador de ozono basado en la información y la experiencia obtenida de las referencias. Se consideraron los aspectos de la funcionalidad del dispositivo y se propusieron como alternativa, el tamaño, los materiales, los costes y aspectos de seguridad para seleccionar el diseño que más se aproxime al objetivo principal del proyecto establecido.

A continuación, se presentan los criterios y los requerimientos que se tendrán en cuenta para el diseño y construcción del prototipo.

- **Reactor:** el tamaño de la cámara es importante para la capacidad de producción del ozono.
- **Materiales:** los materiales del reactor deben ser tal que sean resistentes a la acción oxidante del ozono producido.
- **Gas de alimentación:** la calidad y cantidad de ozono producido depende directamente de la calidad de aire ya que esta puede ser de oxígeno puro o aire filtrado.
- **Frecuencia de trabajo:** con el aumento de frecuencias se obtiene mayor micro descargas por ciclo y con ello mayor producción del ozono, por lo tanto, se debe buscar variar la frecuencia de trabajo hasta encontrar el óptimo.
- **Voltaje de alimentación:** para alcanzar a romper el enlace de un átomo de oxígeno y forma el gas ozono se requiere que se forme un campo lo suficientemente grande, por encima de los 5000 volts.

- **Seguridad:** al trabajar con alto voltaje es necesario tener un correcto aislamiento y cumplir con las normas de seguridad para evitar accidentes.
- **Mantenimiento:** los elementos que conforman el reactor deben ser remplazables y que sean de existan en el medio local.

4.2 Consideración de la concentración de ozono deseado.

La dosis necesaria del gas ozono para la desinfección del agua varía según la calidad de ésta [31], por ejemplo:

El contenido de ozono que se tiene que producir, para aguas subterráneas o superficiales con bajo contenido mineral, baja de turbiedad, es: **0.25 a 0.5 mg O₃/L**

El contenido de ozono que se tiene que producir, para aguas superficiales con procesos de filtración inicial y de buena calidad, es: **1 a 2 mg O₃/L**

El contenido de ozono que se tiene que producir, para aguas superficiales contaminadas a pesar de un proceso de filtración, es: **2 a 5 mg O₃/L**

A diferencia del tiempo de contacto con otros métodos de desinfección, la ozonización requiere estas dosis en contacto del gas ozono con el agua por aproximadamente 2 a 10 minutos para poder inactivar los microorganismos mediante un sistema de inyección uniforme. Debido a la rapidez con que hace efecto el ozono para matar los microorganismos y estos tiempos cortos no suponen mayor problema para el medio donde se la produce.

En el presente trabajo, donde el agua es superficial de acequias con un proceso de filtración inicial, la concentración de ozono deseada es de entre 1 a 2 mg O₃/L (1-2 ppm), y para poder realizar los cálculos, se toma una dosis de **D_s = 1 mgO₃/L** y se dispone de un tanque para almacenamiento y filtrado de agua de 225 L, con un flujo de salida por gravedad **CI = 25**

L/min. Por tanto, podemos calcular la producción del gas ozono deseada mediante la **ecuación (4)**.

$$Pd = Ds * Cl$$

$$Pd = \frac{25 * 60 * 1 * 0.001g}{1 h} = 1.5 g/h$$

$$Pd = 1500 \frac{mg}{h}$$

Con estos valores calculados podemos estimar la mínima cantidad de ozono a producir para conseguir desinfectar este tipo de agua para riego con los parámetros establecidos.

4.3 Diseño del prototipo generador de ozono

4.3.1 Modelo del reactor generador de ozono (DBD)

El modelo de la cámara generadora de ozono elegido para conseguir la producción de ozono a una determinada concentración es un modelo tubular o cilíndrico a través de las descargas por barreras dieléctricas (DBD) (ver **Fig. 10**), mismo que ofrece la posibilidad de trabajar con más módulos en una configuración paralela y, por tanto, aumentar la capacidad de producción de ozono.

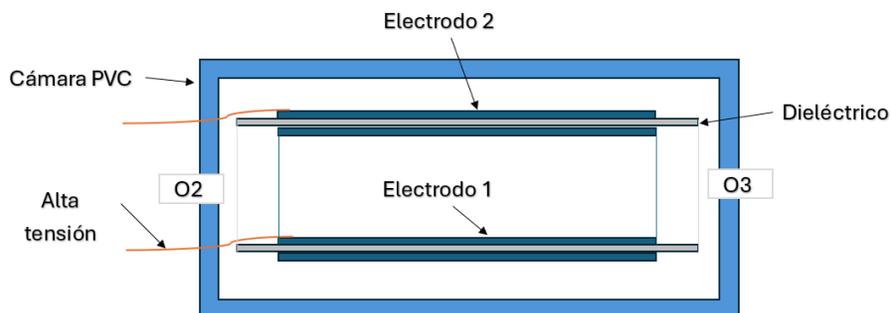


Fig. 10 Elementos de la cámara generadora de ozono tubular.

Al disponer de una variedad en dimensiones en cuanto al diámetro del tubo PVC, podemos construir diferentes modelos de prueba con diferentes diámetros y longitudes, siendo estos con las siguientes características.

Tabla 10. Características de los módulos de las cámaras

CÁMARA	MATERIAL	DIÁMETRO EXT. (mm)	ESPESOR (mm)	LONGITUD (mm)	TEMPERATURA DE UTILIZACIÓN (°C)	RESISTENCIA DIELECTRICA (V/m)	CONSTANTE DIELECTRICA (ϵ)
1	ENVASE DE PLÁSTICO	50	1	170	50 – 80	$50 \times 10^6 \frac{V}{m}$	2.9 a 3.2
2		45	0.8	140			

Para la fase de diseño de la cámara se opta por las características de la solución de la alternativa 2, se dibuja la forma y el dimensionamiento se realiza mediante el software SolidWorks, tal y como puede observarse en la **Fig. 11**. Se hace las cotas de cada uno de los elementos de forma óptima y se distribuyen según los modelos más eficientes tratados en los capítulos anteriores.

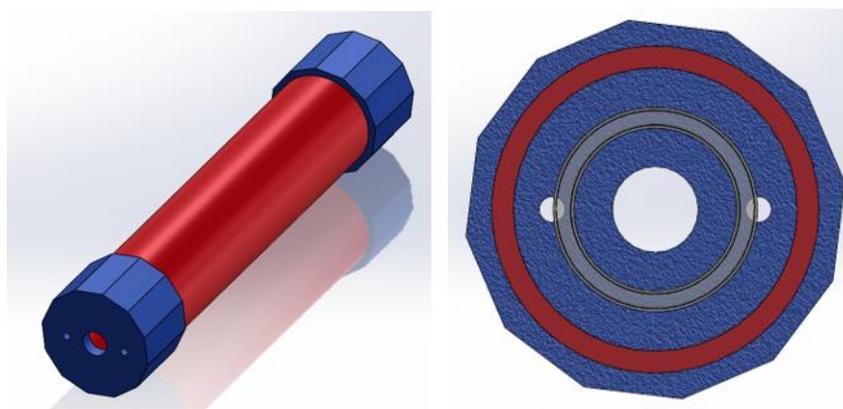


Fig. 11 Cámara generadora de ozono

El módulo consiste en un envase de plástico tubular con tapa en uno de sus extremos donde se tienen creados dos orificios para insertar las mangueras, una para la alimentación del gas al reactor y la otra para la inyección del ozono producido, ver **Fig. 11**; además, se tiene dos orificios que también permiten conectar la fuente de alto voltaje con los electrodos en el interior de la cámara donde se producen las micro descargas.

4.3.1.1 Área efectiva de la celda

El área donde se producen las descargas eléctricas es en la superficie de los electrodos. Las mallas y las láminas de aluminio tienen **80 mm** de longitud que es la zona activa para las micro descargas y se dejó **10 mm** del borde del vidrio para evitar arcos indebidos

Para el dieléctrico se tiene un tubo de vidrio de **100 mm** de longitud, 25 mm de diámetro y **1 mm** de espesor, que con estos datos se calcula la zona efectiva donde se produce ozono.

$$A_{ef} = \pi * d * L \quad (9)$$

$$A_{ef} = 0.006283 \text{ m}^2$$

$$A_{ef} = 62.83 \text{ cm}^2$$

4.3.1.2 Voltaje mínimo de ruptura dieléctrica

Es importante calcular el voltaje mínimo que se requiere para iniciar un arco eléctrico y el funcionamiento de nuestro módulo según sus características. Entonces, ya que esta cámara tiene un espesor del espacio de descarga de aproximadamente 1,5 mm, y la presión absoluta del aire bajo condiciones normales en la zona norte del ecuador es de 71.114 kP. Sustituyendo los respectivos datos en la **ecuación (6)**, se obtiene el voltaje de ruptura mínimo (V_s)

$$V_s = (26.55 * 71.11) * 1.5 + 1480$$

$$V_S = 4311.95V = 4.3kV$$

Este voltaje es el mínimo requerido; como se sabe, con el transformador Flyback se pueden tener voltajes de hasta 30 kV con una fuente de alimentación de 12 V; de hecho, para lograr mayor eficiencia de trabajo de la celda generadora se requiere de un circuito externo que permita variar la frecuencia trabajo. Por lo tanto, es necesario implementar un circuito de tal forma que en su salida pueda obtener una señal PWM (Pulse Width Modulation) para un voltaje de entrada dado.

4.3.1.3 Consumo de potencia de la cámara

La potencia es la cantidad de energía que un dispositivo puede entregar o absorber; ahora el consumo es la cantidad de energía que se utiliza en un período de tiempo. Entonces, se tiene una que se puede suministrar desde la fuente, para este proyecto se tiene una fuente conmutada de 12V DC a 10 Amperios, pero se asumen algunas pérdidas que pueden existir en el Mosfet y el Flyback dando una eficiencia de 75% para este diseño.

$$P_{in} = V * I * 0.75$$

$$P_{in} = 90 W$$

Por lo general, se dice que, a mayor potencia, mayor consumo de energía. Entonces es necesario conocer el consumo de potencia de la celda generadora de ozono diseñada para lo cual es necesario conocer la capacitancia de la celda con una eficiencia del 70%, y esto podemos obtener mediante la **ecuación (7)**.

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d}$$

$$C = 1.38 \times 10^{-10} F \approx 138 pF$$

Con estos valores encontrados podemos estimar la potencia consumida por una celda de un arreglo DBD empleando la siguiente **ecuación** (8), con una frecuencia de operación del equipo al 75% (35 kHz) como máximo para no esforzar al equipo.

$$Pg = \frac{1}{2} CV^2 f$$

$$Pg = \mathbf{86.94 W}$$

Una celda DBD puede llegar a transformar entre el 30 y el 50% de la potencia en energía útil para poder realizar la generación del gas ozono. Por lo tanto, para este proyecto por diferentes factores y materiales de la celda se toma un valor intermedio del 40% de eficiencia.

$$Pg = \mathbf{34.77 W}$$

En todo caso, el aumentar la potencia también puede elevar la temperatura de los dispositivos involucrados, por lo que debemos evitarlo, ya que, si se llega a recalentar mucho la cámara generadora, la producción de ozono es deficiente.

4.3.1.4 Dieléctrico

Evaluando las alternativas propuestas en otros trabajos, así como la disponibilidad de los materiales en el medio y para lograr una producción constante, se tienen dos tipos de materiales como los dieléctricos para el reactor con las siguientes características:

Tabla 11. Características de los dieléctricos del reactor

	MATERIAL	DIÁMETRO EXT. (mm)	ESPESOR (mm)	LONGITUD (mm)	CONSTANTE DIELÉCTRICA ϵ	RESISTENCIA DIELÉCTRICA (V/m)
1	VIDRIO	6 – 35	0.6 – 2	50 – 250	5	14×10^3
2	ACRÍLICO	7 – 50	0.5 – 5	>100	1.5	20×10^3

Los modelos fabricados con materiales de vidrio tubulares permiten que se genere mayor cantidad de ozono por unidad de potencia eléctrica. Por lo tanto, para este proyecto se opta por el tubo de vidrio (tubos de ensayo) como dieléctrico para la celda generadora.

4.3.1.5 Electrodo

Para la selección de los electrodos se disponen de algunos materiales, como tubos de acero inoxidable, mallas de aluminio o acero inoxidable, láminas de aluminio moldeables o alambres de cobre. Para el presente trabajo se escoge un par de materiales: las mallas de aluminio y las láminas de aluminio, ya que son un excelente conductor eléctrico y de calor. Son, además, muy fáciles de conseguir y, debido a su forma, tamaño y espesor, hace que la producción de ozono sea muy eficiente. También, tiene una buena resistencia al ataque corrosivo en comparación con algunos otros materiales. Para este prototipo se construyó con ambos materiales para diferenciar el efecto de una malla con láminas tubulares de aluminio como electrodos de la celda.

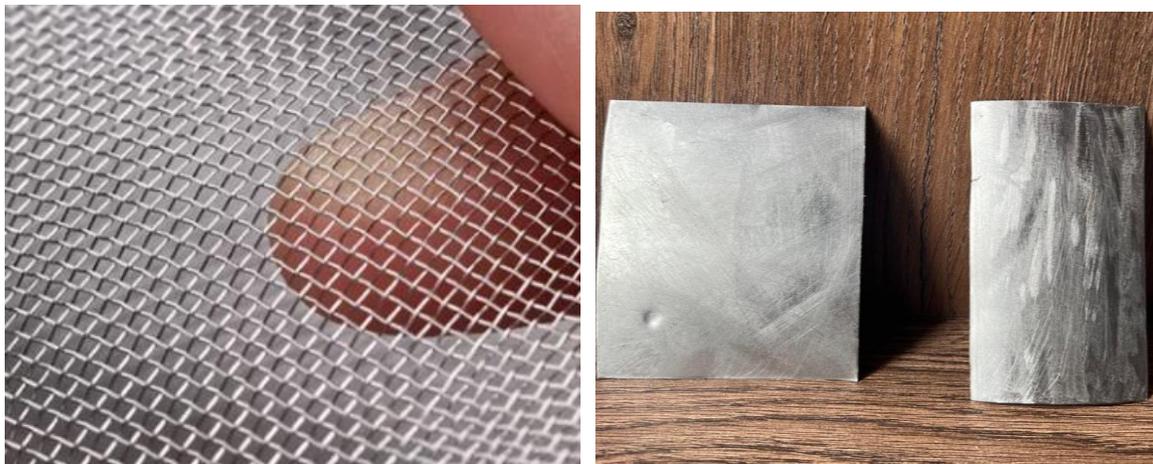


Fig. 12 Tipo de materiales como electrodos para la celda generadora de ozono.

Fuente: (Autor)

4.3.2 Diseño de la fuente de alto voltaje

De forma natural, el ozono se produce mediante radiación ultravioleta. Los rayos UV son descargas eléctricas de alta tensión que se producen en un corto período de tiempo. Para la generación de gas ozono se tiene que distribuir por los electrodos de la celda el alto voltaje proveniente de una fuente, ya sea alterna o directa, pero de frecuencias variables. La eficiencia de un generador de ozono aumenta si se trabaja a altas frecuencias.

Para el prototipo que proponemos, usamos transformadores, de los cuales se pueden proporcionar una señal de alto voltaje en sus terminales de salida con determinadas características eléctricas que permitan inducir el fenómeno de las micro descargas en el interior de una celda generadora de ozono.

4.3.2.1 Transformador Flyback

Uno de los transformadores que permite generar el alto voltaje para este tipo de requerimientos se llama transformador de líneas o Flyback **Fig. 13** Además, suelen tener en el devanado secundario miles de vueltas para poder alcanzar altos voltajes. Estos transformadores funcionan de forma correcta a altas frecuencias en rangos de 10 kHz a 50 kHz. Internamente lleva un conjunto de hilos de cobre bobinados sobre núcleo de ferrita con dos tipos como:

- Bobinado primario: tiene un promedio de cien vueltas de alambre de cobre, la cual se conectará a un circuito oscilador para elevar el voltaje de entrada.
- Bobinado de Alto Voltaje: contiene varios miles de vueltas y dependiendo del transformador este bobinado puede dividirse o no en varias secciones con rectificadores de alto voltaje. De este tipo de bobinado de alto voltaje se puede obtener una relación de salida por **1000 - 3000**



Fig. 13 Transformador Flyback

El Flyback es un transformador que está diseñado para almacenar energía en un circuito magnético y generalmente está diseñado para que la corriente fluya en su primario o en el secundario, pero nunca en ambos sentidos al mismo tiempo. La tensión aplicada en el bobinado primario ha de ser pulsos de onda cuadrada para el máximo aprovechamiento de este tipo de transformadores de alto voltaje.

4.3.2.2 Frecuencia de trabajo

La producción del ozono es directamente proporcional tanto a la frecuencia como al voltaje con el cual se alimenta la celda; a medida que se aumente la frecuencia, los niveles de producción y concentración de ozono también suben. Ya que, al trabajar a la frecuencia de la red (50-60 Hz), los iones y electrones tienen mayor tiempo para cruzar el espacio de descarga, de esta forma produciendo muy pocas descargas dentro de un mismo ciclo.

Entonces, es necesario que este prototipo se permita la variación de la frecuencia de trabajo en rangos de 5 kHz a 40 kHz y de esta forma, poder obtener diferentes niveles de concentración y producción del gas ozono.

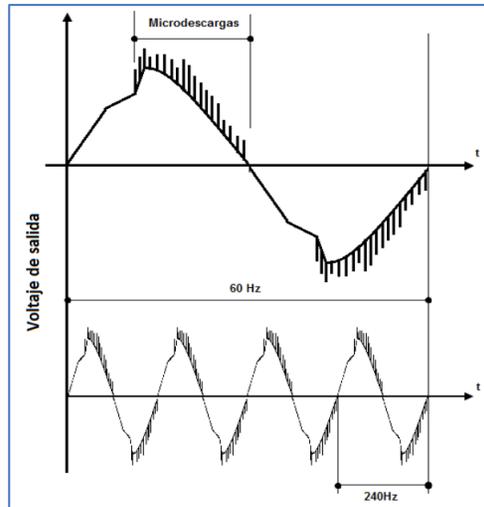


Fig. 14 Efecto de la frecuencia de trabajo, tomado de [35].

4.3.3 Diseño del circuito PWM

4.3.3.1 Circuito integrado 555

El temporizador IC 555 es un circuito integrado que se utiliza para proporcionar retardos de tiempo, como un oscilador, y como un circuito integrado flip flop. Es capaz de producir pulsos de temporización (**modo monoestable**) y también puede ser usado como oscilador (**modo astable**) con tiempos muy precisos. Para este proyecto se necesita generar un tren de pulsos de onda cuadrada con tiempos muy cortos; por lo tanto, se trabaja en modo astable de este circuito integrado.

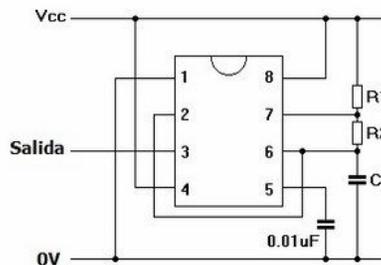


Fig. 15 Configuración básica del modo astable para el temporizador Lm 555

En la conexión en modo astable, este integrado tiene una salida continua de onda cuadrada a una frecuencia específica deseada y proporciona una corriente de salida máxima de **200 mA**. Esta señal se puede usar para excitar un transistor de potencia (MOSFET) en este caso para el control del transformador Flyback.

4.3.3.2 Configuración de la frecuencia de trabajo

A efectos de poder realizar una óptima producción de ozono, es importante tener en cuenta el rango la frecuencia de trabajo, por tal motivo, la frecuencia de funcionamiento de este prototipo resulta ser variable, aunque se conoce que en los rangos de 5 kHz en adelante los transformadores Flybacks en términos generales funcionan bien.

Partiendo de una fuente de alimentación al circuito de 12V CC a unos 10A y mediante el integrado 555 se pueden definir la frecuencia y el ciclo de trabajo; por lo que se requiere conocer los tiempos de carga y descarga del capacitor, los cuales se pueden llegar a calcular mediante la siguiente ecuación:

- Frecuencia de oscilación (f)

$$f = \frac{1.44}{(R_1 + 2R_2)C} \quad (10)$$

- Ciclo de trabajo (D)

$$D(\%) = \frac{(R_1 + R_2)}{(R_1 + 2R_2)} * 100 \quad (11)$$

En referencia a las ecuaciones (10) y (11) donde **R1** es una resistencia que se encuentran en los rangos de **1 kΩ** a **10 kΩ**, mientras que las resistencias **R2** se encuentran entre los **10 kΩ** a **100 kΩ** y se puede utilizar un potenciómetro para ajustar la frecuencia de oscilación.

Para el capacitor, si se trabaja a altas frecuencias, se puede tener entre los rangos de **500 pF** a **1 nF** a un voltaje mayor al de la alimentación del circuito.

Para este proyecto se desea una frecuencia en rangos de 5kHz a 30kHz y con un ciclo del trabajo que es recomendable entre el 50 y el 70%. Para ello con la ayuda de las rectas de la **Fig. 16** se selecciona los valores promedios de las resistencias y los capacitores.

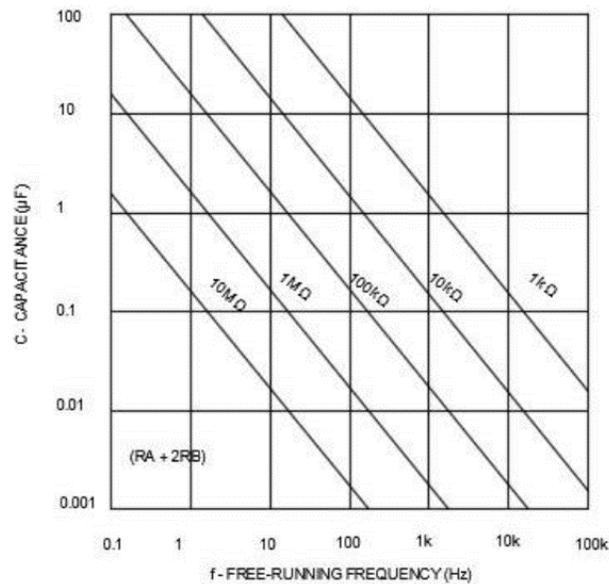


Fig. 16 Rectas de comportamiento de una señal PWM en modo astable, Datasheet IC555

Si se desea alcanzar un ciclo de trabajo de alrededor del 50%, la resistencia de descarga (**R2**) debe ser mucho mayor que la resistencia de la carga (**R1**) del circuito. Tomando en cuenta lo mencionado, se hace la selección preliminar de los componentes necesarios a continuación.

- **R1 = 1kΩ**, esta resistencia solo controla el tiempo en alto de la señal cuadrada, por lo que es muy importante para alcanzar el ciclo del trabajo óptimo.
- **R2 = 1kΩ** y un potenciómetro de = **10 kΩ**, con estas resistencias se puede controlar tanto el tiempo en alto y bajo de la señal en un ciclo, de esta forma también pudiéndose modificar la frecuencia de oscilación de la señal cuadrada en su salida.

- $C = 10\text{nf} = 0.01 \text{ uf}$, para la carga y descarga

Remplazando los valores seleccionados en la **ecuación (10)** se tiene la frecuencia mínima y máxima del circuito en su salida:

$$f1 = \frac{1.44}{(R_1 + 2R_2)C}$$

$$fmin = 6.25\text{kHz}$$

$$fmax = 48 \text{ kHz}$$

De igual forma se calcula el ciclo de trabajo al variar la frecuencia mediante la **ecuación (11)** obteniendo los siguientes valores.

$$D = \frac{(R_1 + R_2)}{(R_1 + 2R_2)}$$

$$Dmin = 0.52 * 100 = 52\%$$

$$Dmax = 0.66 * 100 = 66\%$$

De esta forma, se consigue un ciclo de trabajo óptimo, ya que el ciclo de trabajo varía entre el 50 y el 70%. Aparte de esto, el ciclo de trabajo evita la saturación de la señal, así como el sobrecalentamiento de los componentes del circuito.

4.3.3.3 Transistor de potencia

Los transistores de potencia son dispositivos diseñados para resistir las altas tensiones, intensidades y, por lo tanto, las altas potencias a disipar. Su funcionamiento y uso son muy semejantes a los transistores de baja potencia, con especialidades de control en corte y saturación o como elementos de conmutación.

Estos transistores se pueden encontrar en de diferentes clases, pero para trabajos de alta tensión se tiene los:

- Transistores bipolares de juntura (BJT)
- Transistores semiconductores de metal de óxido de efecto de campo (MOSFET)

Para este diseño de la fuente de alto voltaje se hace la selección de un transistor MOSFET de potencia. Los MOSFET son controlados por el voltaje de entrada, donde solo requieren de una pequeña corriente de entrada; la velocidad de conmutación es muy alta, ya que los tiempos en los que conmuta están en el orden de los nanosegundos.

4.3.3.4 Red Snubber

Una red Snubber se implementa para eliminar los problemas en circuitos de conmutación. Cuando se requiere trabajar y controlar las oscilaciones de altas frecuencias, como en el caso de un Flyback en su salida, se hace necesario tener un medio de protección que suprima los transitorios indeseables y disipe las sobrecorrientes que se generan en forma de calor para, de esta forma, proteger al MOSFET. Los circuitos Snubber están formados principalmente por elementos pasivos como diodos, resistencias, capacitores e inductores, que se colocan en los circuitos de potencia para reducir las amortiguaciones que se generan durante las conmutaciones.

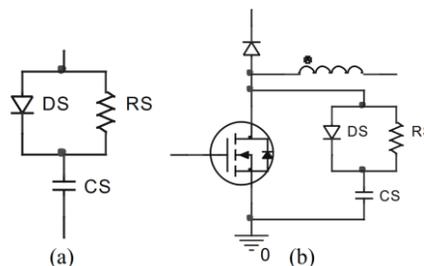


Fig. 17 Circuito de Red Snubber RCD (a), Aplicación a un MOSFET (b).

La Red Snubber de Tensión: **Fig. 17**, tiene una configuración RCD que normalmente se implementa para controlar la tasa de aumento de la tensión presente en el colector o drenador de un transistor de conmutación en un convertidor Forward, Flyback o Boost.

En el apagado, la Snubber desvía la mayor parte de la corriente del transistor y la potencia disipada a la red amortiguadora; esto aumenta la seguridad del interruptor, pues la disipación de potencia pico se ve mermada y también se controla la subida de tensión, incluso se disminuye la EMI de alta frecuencia (generada por una conmutación sin control) [38].

4.3.3.5 Circuito de simulación en Proteus

Como se menciona anteriormente en un transformador Flyback, el voltaje de salida suele ser continua y pulsada a través de un temporizador o un rectificador, como se observa en la **Fig. 18**, que expone el diagrama del circuito de PWM. Este circuito nos permite obtener en sus terminales de salida una señal cuadrada CC con una frecuencia variable; este voltaje de salida, mediante un transistor se conecta al transformador elevador de alto voltaje Flyback y en su salida obtenemos el alto voltaje que es conectado a los electrodos que se encuentran dentro de la cámara generadora de ozono.

La tensión proveniente del circuito oscilador hacia el primario es de 12 V, debido al efecto de la inductancia y la rápida conmutación del MOSFET, al apagarse el MOSFET, se produce el colapso del campo magnético de modo que inducen picos de hasta los 70 - 80 V, que se amplifican en el secundario del transformador. Las frecuencias bajas producen mayor tiempo de encendido y mayor almacenamiento de energía por ciclo, potencialmente aumentando el voltaje. En frecuencias altas la energía por ciclo es reducida, pero la eficiencia de transferencia se mantiene.

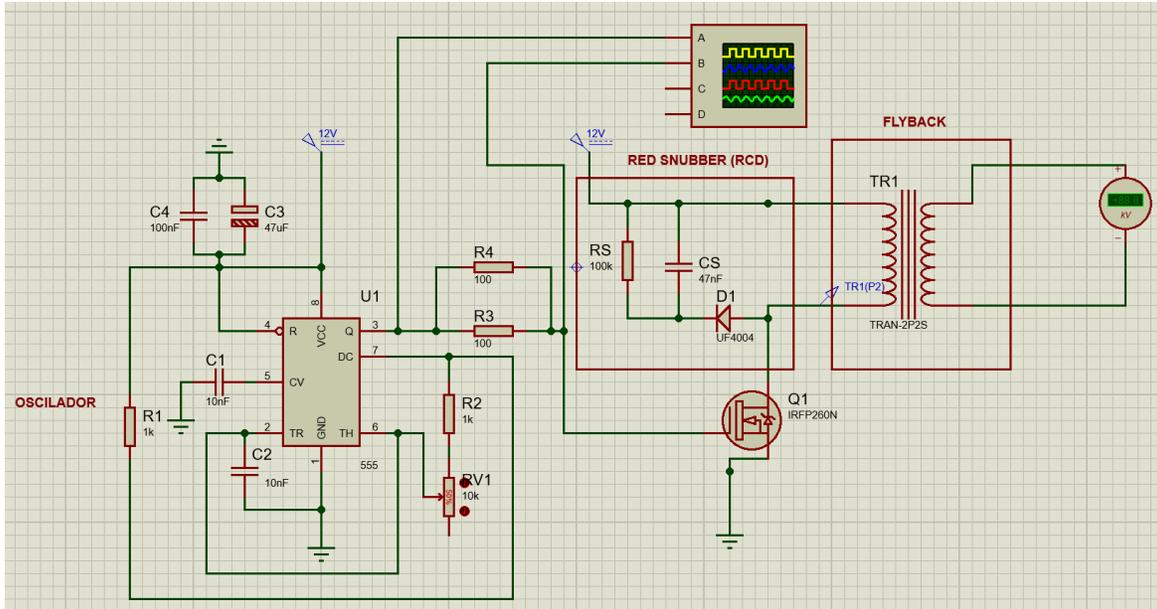


Fig. 18 Circuito de control y potencia simulado en Proteus

Mediante las simulaciones se conoce que el voltaje de salida del oscilador 555 es de $V = 11$ volts y el periodo es de $160 \mu s$ aproximadamente al 0% del potenciómetro variador de frecuencia, como se puede observar en la Fig. 19. Entonces también se puede conocer la frecuencia de trabajo mínima, que es de: 6.25 kHz por ciclo.



Fig. 19 Medición de voltaje y frecuencia de salida mínima de trabajo.

La frecuencia máxima se puede obtener al variar la resistencia del potenciómetro al 100%, por lo tanto, el periodo que obtenemos es de **20.90 μs** aproximadamente, como se puede observar en la **Fig. 20**. La frecuencia de trabajo máximo de este circuito es de **47.84 kHz**.



Fig. 20 Medición de voltaje y frecuencia de salida máxima del circuito.

En el contexto de un oscilador electrónico, lo que se quiere es lograr un sistema de oscilación lo más estable posible, continuo y periódico, con una frecuencia concreta y un ciclo de trabajo adecuado. Pudiendo conseguir estas variaciones de frecuencia que también nos permiten la producción deseada del gas ozono para la desinfección del agua a tratar.

4.3.4 Microcontrolador

El equipo propuesto tiene dos etapas, que son la de control y potencia, para su correcto funcionamiento. La parte del control del circuito está implementada llevando a cabo un microcontrolador, temporizado y programable a partir de las entradas digitales que dan lugar a la parte de potencia. El Arduino Nano, por su tamaño y múltiples entradas y salidas, es el más acertado en base a las necesidades planteadas del proyecto y a continuación se presentan sus características.

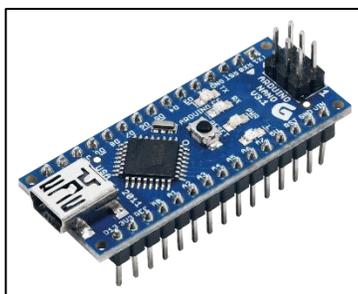


Fig. 21 Microcontrolador Arduino Nano

Tabla 12. Características básicas de un microcontrolador Arduino Nano

CARACTERÍSTICAS	PLACA ARDUINO NANO
Voltaje de entrada	7.5 – 12 V
Voltaje de operación	5 V
Pines de entrada y salida analógica	8
Pines de entra y salida digital	14
Microcontrolador	ATMega328P
Velocidad de reloj	16 MHz
Memoria flash	32KB
	2 KB para bootloader
	2 KB RAM
	1 KB Eeprom
Precio	12

Este microcontrolador nos permite automatizar en tiempos para un correcto funcionamiento del equipo generador de ozono, sin necesidad de exponerse de forma permanente una vez esté en funcionamiento el equipo.

4.3.5 Gas de alimentación

Se utiliza aire proveniente de una bomba compresora como gas de alimentación a la cámara generadora, cuya resistencia dieléctrica de aproximadamente $3 \times 10^6 \frac{V}{m}$. Por lo tanto, la capacidad y las condiciones de aire que se ingrese al reactor son de importancia. A continuación, se muestran las alternativas en el medio local para la bomba de aire.

Tabla 13. Alternativas de selección de la bomba de aire existentes en el medio local.

ALTERNATIVAS	MODELO	VOLTAJE (volts)	PRESIÓN (MPa)	POTENCIA (Watts)	Litros/min	TAMAÑO (cm)	PRECIO (dólares)
	YD-307	12	1.172	70	15	16x8.3x9.4	18
	SC-7500	230-115- 12	0.012	3,5	2-4-6	7.5x5x12	18
	ACQ-906A	24	0.120	60	120	20x14x10	30

Debido a las características requeridas de este proyecto, el precio y su fácil adquisición en el mercado se selecciona al mini compresor SC-7500 de la marca JAD, con las características que se detalla en la **Tabla 13**. Lo que también haya que tener en cuenta para la producción eficiente del ozono es la calidad del aire, por lo que, de ser necesario se puede colocar filtros de secado para el aire previo el ingreso en la cámara generadora.

Para este proyecto se tiene el aire de bomba pecera al 21% de oxígeno que puede suministrar 6Lpm (0.1L/s) y no se tiene la línea de secado por cuestiones económicas, esto puede reducir en un 10 – 20 % la generación de ozono en el prototipo.

4.3.5.1 Sistema de inyección de ozono con el agua

Para poner en contacto el gas ozono generado con el agua que se desea desinfectar, se optó por la utilización del sistema por burbujeo **Fig. 22**. Mediante el burbujeo, introducimos directamente el gas ozono producido en una muestra de agua a tratar.

La principal función de esta piedra difusora es liberar pequeñas burbujas de aire que se disipan por todo el estanque de agua, lo que mejora la disolución de gases con el agua. Este proceso es fundamental, ya que el gas ozono se puede disolver en el agua permitiendo poder desinfectar eficientemente.



Fig. 22 Difusor de cerámica poroso

La transferencia del ozono mediante este sistema es baja para tratamientos mucho más grandes o industriales, ya que solo se puede lograr disolver ozono u otros gases en un 35% de eficiencia. En este proyecto se adaptó este sistema con tanques de almacenamiento de agua que tiene capacidad para 250 litros que a su vez alimenta a un sistema de riego por gravedad.

4.4 Construcción del prototipo generador de ozono

4.4.1 Cámara generadora de ozono

4.4.1.1 Módulo cilíndrico de plástico

Las dimensiones del módulo se detallan en la **Tabla 10**, para el módulo se selecciona el tubo de plástico y su respectiva tapa como se muestra en la **Fig. 23**. Además, por los extremos se realizan los agujeros necesarios tanto para el ingreso del aire y la salida del gas ozono producido como para la conexión de los cables de alta tensión.



Fig. 23 Modulo cilíndrico de plástico como cámara del reactor

4.4.1.2 Electrodo y dieléctricos de la celda

Como dieléctrico se tiene el tubo de ensayo de vidrio, se realiza el corte necesario para que se adapte dentro de la cámara. Las mallas y laminas seleccionadas son de aluminio y actúan como los electrodos del reactor.

Los electrodos en este tipo de arreglo van por dentro y por encima de tubo de vidrio como se puede ver en la **Fig. 24**. Es importante que la separación de los electrodos sea milimétrica para una producción eficiente del gas ozono.



Fig. 24 Celda para las descargas dieléctricas dentro de la cámara.

La tensión de salida del Flyback trabaja a niveles altos por lo tanto es necesario implementar conductores que soporte la carga y permita el desplazamiento libre y fluido de los electrones,

para este prototipo se hace uso de cables solidos número 12 AWG o cables con buena conductividad y alta resistencia a la corrosión. Estos cables **Fig. 24**, salen del transformador y conecta con los electrodos dentro de la cámara. Todos los componentes de estos módulos pueden ser remplazadas, ya que la acción oxidante del gas ozono con el tiempo tiende a desgastar los materiales.

4.4.2 Circuito de control y de potencia

4.4.2.1 Implementación del circuito oscilador

El circuito de control como se muestra en la **Fig. 25**, se encuentra implementado en una baquelita mediante la soldadura de los componentes de un circuito astable con el temporizador IC555 para la generación de trenes de pulsos, el transistor de potencia seleccionado es un **MOSFET IRFP260N** para la conmutación rápida a altas frecuencias. Mediante un relé se protege y se hace el control del circuito de las sobrecorrientes de entrada.

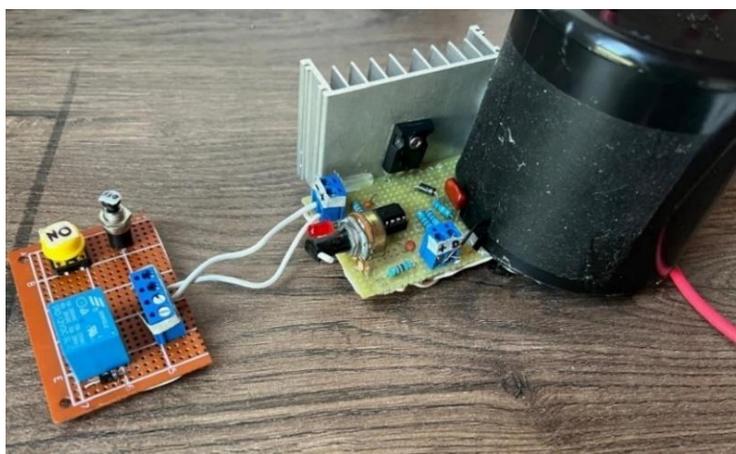


Fig. 25 Implementación del circuito de control y de potencia de prueba

Para el mejor funcionamiento del circuito se separa el transformador Flyback con un aislante la cual permite anular el campo electroestático que genera el transformador en sus primarios durante las oscilaciones.

4.4.2.1 Generación de alta tensión

El transformador Flyback trabaja de diferentes formas, ya que en su primario puede ser alimentado con voltajes de 12, 24, 110,220. El trabajar con voltajes altos en sus primarios para este tipo de aplicación donde solo se requiere excitar con un voltaje y corriente mínimo puede requerir de circuitos más avanzados. El Flyback seleccionado es el modelo **T154-064G** como se puede ver en la **Fig. 26**, que consta de 10 pines y su salida de alto voltaje con la enumeración correspondiente, cabe recalcar que los modelos **T154-064D-T154-064Y-T154-064P** son iguales.

Estos transformadores Flyback se utilizaban en los televisores antiguos para generar altas tensiones en tubos de rayos catódicos (TRC) y operar a altas frecuencias para obtener de 15 y 30 kV en corriente continua.

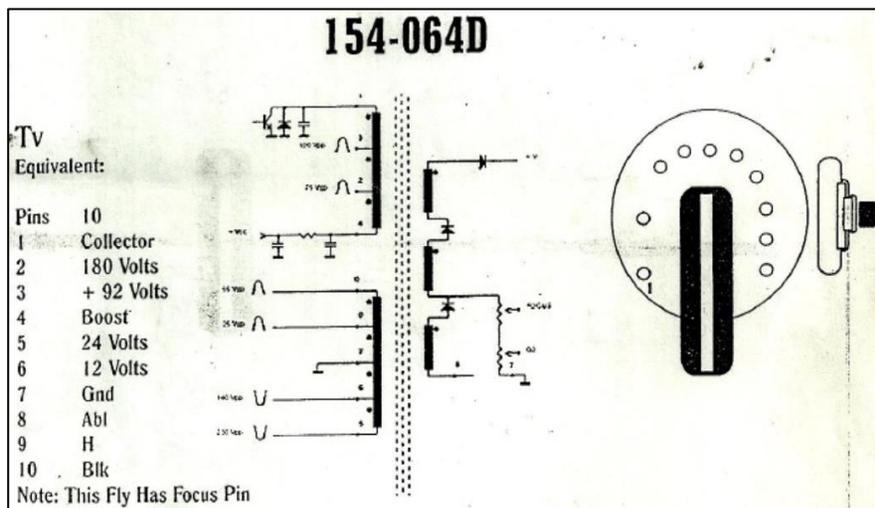


Fig. 26 Topología de los pines del Flyback

Para la bobina primaria del transformador se hace un bobinado de 10 vueltas de alambre de cobre sobre el núcleo del transformador. Esto nos permite trabajar con una alimentación de 12V en su entrada. Es importante conocer la terminal que hace de retorno del bobinado de la

alta tensión del secundario, que en este tipo de transformadores se le puede identificar por su nombre **ABL** la cual va conectado a masa de la celda generadora de ozono.

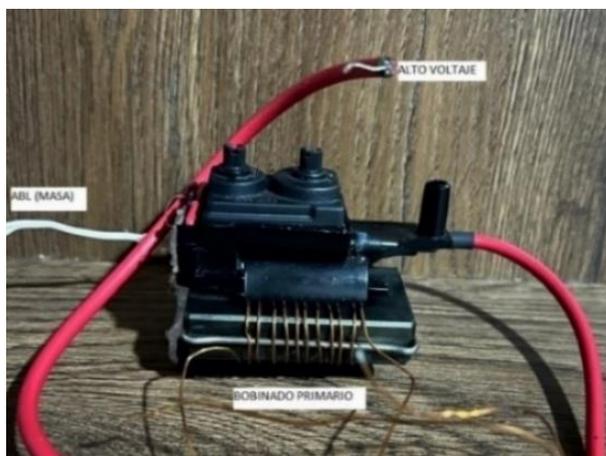


Fig. 27 Bobinado primario y terminales de salida de alto voltaje del Flyback

Para las terminas o pines restantes en el transformador se debe colocar algún tipo de aislante y evitar que se generen arcos no deseados, para ellos se utiliza silicona caliente que cubre todos los pines del transformador Flyback y de esta forma se obtiene un solo cable de salida del pin 8 **ABL** o masa del transformador.

4.4.2.2 Funcionamiento del sistema generador de ozono

Las pruebas de funcionamiento del prototipo se realizaron haciendo uso de 3 litros de agua potable en un recipiente (**Anexo H**).

Esta prueba tiene como propósito comprobar el correcto funcionamiento de la configuración y el control del circuito de potencia (**Anexo I**), en este caso se ha demostrado que los elementos seleccionados, junto con la configuración de transformador, pueden trabajar por un tiempo prolongado sin calentamientos excesivos tanto como en el circuito, transformador y la celda, generándose por tanto un ozono constante dentro de la cámara.

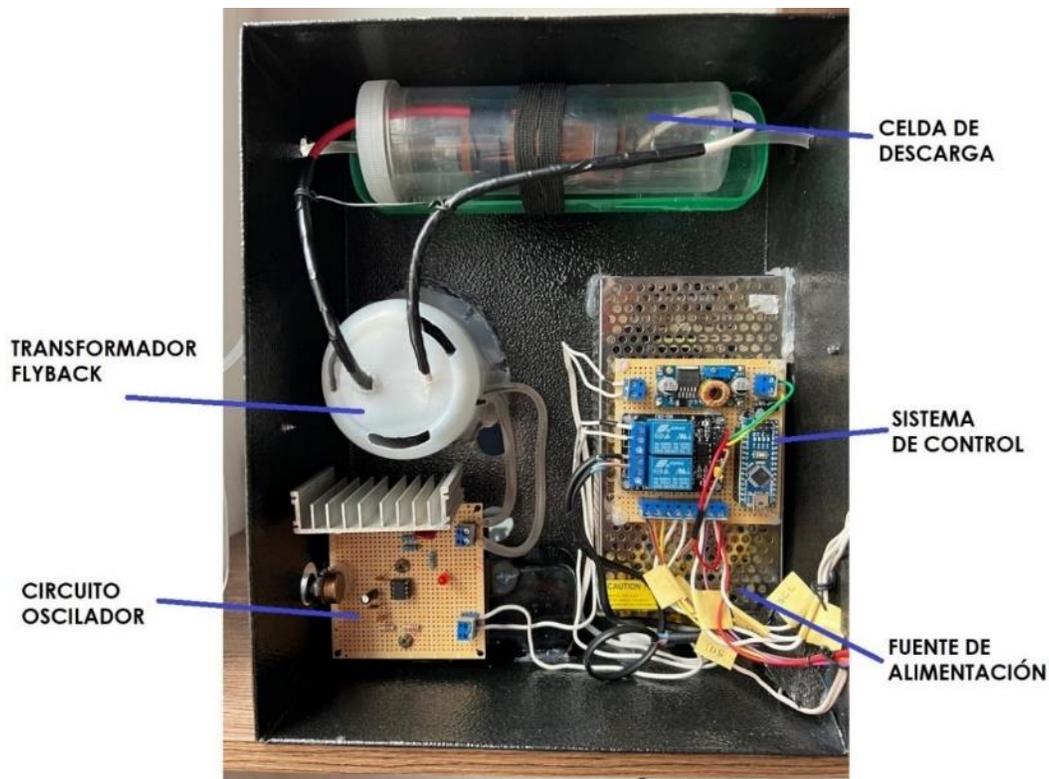


Fig. 28 Partes y funcionamiento del equipo generador de ozono

Asimismo, se hizo la prueba con dos tipos de bombas para la introducción del aire; YD-307 y SC-7500 de la **Tabla 13**, siendo la de tipo **JAD SC-7500** la más efectiva debido a que tiene tres niveles de flujo para poder manejar dependiendo de la frecuencia y del volumen de agua o líquido a desinfectar.

4.4.3 Cálculo de la producción de ozono del prototipo propuesto

Para un reactor DBD (Descarga por barreras dieléctricas) como se puede observar en **Fig. 29**, donde se utiliza el flujo aire de una bomba, la eficiencia de producción de ozono con un suministro de aire seco de una bomba se puede encontrarse entre 10 - 20 g/Wh con una eficiencia del 70%. El valor que se determina para estos cálculos corresponde a 15 g/Wh.



Fig. 29 Descargas eléctricas en el reactor (DBD)

En este caso, la dosis de ozono necesaria es de 1 a 2 mg/L, entonces se podría encontrar los valores teóricos aproximados de la dosis de ozono para los litros de agua que se tiene mediante los siguientes parámetros.

- $1 \text{ mg/L} \times 250 \text{ L} = \mathbf{250 \text{ mg}}$
- $2 \text{ mg/L} \times 250 \text{ L} = \mathbf{500 \text{ mg}}$

La producción de ozono ($Pro_{O_3-estimado}$) de nuestro generador de ozono se puede estimar mediante la siguiente fórmula:

$$\begin{aligned}
 Pro_{O_3-estim} &= Pg(W) * Ef(kWh) \\
 &= \frac{Pg(W)}{Wh/g} \qquad \qquad \qquad (12)
 \end{aligned}$$

$$Pro_{O_3-estim} = \frac{34.77 \text{ W}}{15Wh/g} * 0.7\%$$

$$P_{O_3-estim} = \mathbf{1.62g/h}$$

La producción de ozono generado por el equipo satisface la demanda de **1,5 g/h** para tratar 250 L de agua. Entonces, se puede estimar el tiempo de contacto necesario para el tratamiento y desinfección del agua de la siguiente manera.

$$T_{Contato} = \frac{\text{Cantidad de ozono necesario}}{\text{ozono disuelto} * h} \quad (13)$$

$$T_{Cont1} = \frac{250 \text{ mg}}{1620 \text{ mg/h}} \quad T_{Cont1} = \mathbf{0.15 \text{ h}}$$

$$T_{Cont2} = \frac{500 \text{ mg}}{1620 \text{ mg/h}} \quad T_{Cont2} = \mathbf{0.30 \text{ h}}$$

Esto equivale a aproximadamente de **10 a 20** min para tiempos de contacto en 250 L de agua. Para que los valores de tiempo calculados se aproximen se debe tener un sistema de inyección de ozono que permita una disolución con el agua del 95 a 99%.

4.4.3.1 Medición de la concentración de ozono con el sensor MQ-131

El sensor MQ-131 como se ve en la **Fig. 30**, de baja concentración nos permite medir la presencia del gas ozono de 10 a 1000ppb (0.01 – 1ppm) que serían lo suficiente para este proyecto ya que solo se requiere de 1mg/L o 1ppm. Internamente este módulo lleva una salida analógica que resulta del divisor de voltaje que forma el sensor y una resistencia de carga, estos sensores son electroquímicos y varían su resistencia cuando detectan determinados gases principalmente el gas ozono. Además, tiene una salida digital con un led indicador que se calibra con un potenciómetro.

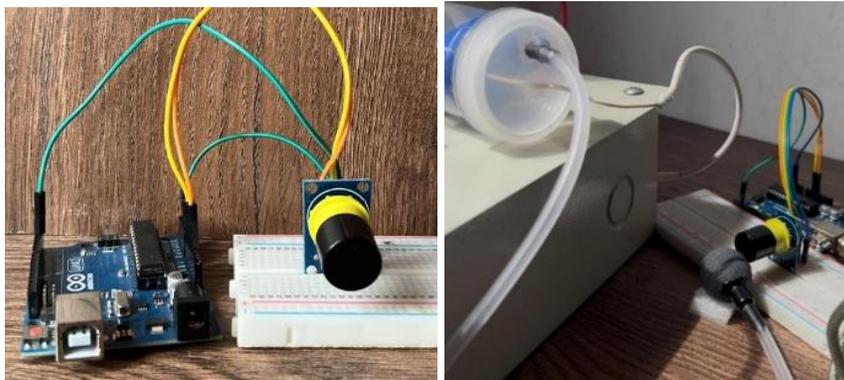


Fig. 30 Sensor de Ozono MQ-131de baja concentración

Para el censado se utilizó el entorno de IDE Arduino con las librerías del sensor MQ-131 y además de una placa Arduino Uno. Todas las mediciones se hicieron durante 15 minutos obteniendo valores constantes a partir de los 5 minutos de haber encendido el generador de ozono. Mediante estas pruebas de censado del gas ozono de nuestro prototipo se pudo ver y obtener los valores en los rangos de la capacidad de funcionamiento del sensor en su Datasheet. Cabe mencionar que, el equipo, tiene para mayor capacidad ya que la conformación de los electrodos y la potencia del transformador nos generar de forma constante mayor producción de ozono por litro, la misma que nos es perjudicial si es disuelto en el agua, pero por temas económicos se utiliza un sensor de baja concentración para poder medir el mínimo valor según el sensor para este proyecto.

```

11:00:05.821 -> Calibration in progress...
11:00:43.978 -> Calibration done!
11:00:43.979 -> R0 = 4352174.00 Ohms
11:00:43.979 -> Time to heat = 38 s
11:00:43.979 -> Sampling...
11:01:22.051 -> Concentration O3 : 0.01 ppm
11:01:22.051 -> Concentration O3 : 12.84 ppb
11:01:22.051 -> Concentration O3 : 0.03 mg/m3
11:01:22.051 -> Concentration O3 : 27.13 ug/m3
11:02:22.319 -> Sampling...
11:03:00.359 -> Concentration O3 : 0.02 ppm
11:03:00.359 -> Concentration O3 : 16.11 ppb
11:03:00.359 -> Concentration O3 : 0.03 mg/m3
11:03:00.359 -> Concentration O3 : 34.05 ug/m3
11:04:00.496 -> Sampling...
11:04:38.603 -> Concentration O3 : 0.02 ppm
11:04:38.636 -> Concentration O3 : 20.70 ppb
11:04:38.636 -> Concentration O3 : 0.04 mg/m3
11:04:38.636 -> Concentration O3 : 43.75 ug/m3
11:05:38.776 -> Sampling...
11:06:16.926 -> Concentration O3 : 0.02 ppm
11:06:16.926 -> Concentration O3 : 23.71 ppb

11:07:17.085 -> Sampling...
11:07:55.175 -> Concentration O3 : 0.03 ppm
11:07:55.175 -> Concentration O3 : 31.90 ppb
11:07:55.175 -> Concentration O3 : 0.07 mg/m3
11:07:55.218 -> Concentration O3 : 67.43 ug/m3
11:08:55.345 -> Sampling...
11:09:33.463 -> Concentration O3 : 0.08 ppm
11:09:33.463 -> Concentration O3 : 83.17 ppb
11:09:33.463 -> Concentration O3 : 0.18 mg/m3
11:09:33.463 -> Concentration O3 : 175.79 ug/m3
11:10:33.653 -> Sampling...
11:11:11.779 -> Concentration O3 : 0.14 ppm
11:11:11.779 -> Concentration O3 : 140.69 ppb
11:11:11.779 -> Concentration O3 : 0.30 mg/m3
11:11:11.779 -> Concentration O3 : 297.34 ug/m3
11:12:11.944 -> Sampling...
11:12:50.065 -> Concentration O3 : 0.72 ppm
11:12:50.065 -> Concentration O3 : 716.28 ppb
11:12:50.065 -> Concentration O3 : 1.51 mg/m3
11:12:50.065 -> Concentration O3 : 1513.86 ug/m3
11:13:50.215 -> Sampling...
11:14:28.337 -> Concentration O3 : 0.72 ppm
11:14:28.337 -> Concentration O3 : 716.28 ppb
11:14:28.337 -> Concentration O3 : 1.51 mg/m3
11:14:28.337 -> Concentration O3 : 1513.86 ug/m3
11:15:28.504 -> Sampling...
11:16:06.622 -> Concentration O3 : 0.72 ppm
11:16:06.622 -> Concentration O3 : 716.28 ppb
11:16:06.622 -> Concentration O3 : 1.51 mg/m3
11:16:06.622 -> Concentration O3 : 1513.86 ug/m3

```

a)

b)

Fig. 31 Medición del gas ozono con el sensor MQ131, **a)** valores mínimos que puede medir el sensor sin presencia de ozono, **b)** valores medidos del gas ozono por el sensor.

Como se puede observar en la **Fig. 31** (a), la medición comienza con el calentado de sensor y la calibración, luego, se mide la presencia de gas en el medio sin encender el equipo generador de ozono y poder comprobar los rangos de medición del sensor MQ131. Se obtuvo un mínimo de **0,01- 0,02 ppm (12-20 ppb)** que se encuentra dentro de los rangos y a partir

de que se comienza a generar ozono con el equipo los valores van subiendo hasta un máximo que el sensor puede medir como se puede observar en la **Fig. 31** (b). Después de 5 min de haber comenzado con la generación del gas ozono los valores se vuelven constantes llegando a un máximo de **0.72 ppm (716 ppb)** que estaría cerca de los rangos que el sensor MQ131 de baja concentración puede medir.

4.5 Pruebas del prototipo generador de ozono

4.5.1 Pruebas de azul de metileno disuelto en agua

Una vez verificado el correcto funcionamiento del prototipo se procedió a realizar las pruebas con el agua. Para esta prueba se tomó agua potable de la casa como muestras en recipientes pequeños ver la **Fig. 32**, a). El azul de metileno (sal de amonio cuaternario) es un colorante orgánico ampliamente usado en la medicina, como indicador en reacciones de oxidación-reducción, entre otras y es altamente soluble en el agua. Se utilizó el azul de metileno como un disolvente en el agua para formar una solución azulada, posteriormente eliminar la de la muestra mediante la aplicación del gas ozono. Para esta prueba el ozono disuelto o residual es mínima ya que se tiene una muestra pequeña. Se hace más pruebas del equipo para 6 litros de agua que se puede ver en el (**Anexo C**).

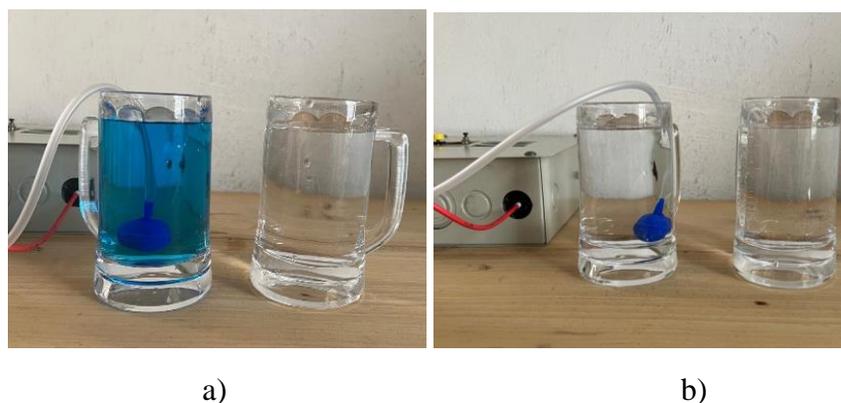


Fig. 32 Pruebas iniciales de equipo ozonizador **a)** Muestras de agua potable con azul de metileno y de referencia, **b)** agua ozonizada durante 15 min.

De las dos muestras de 200 ml de agua, en el recipiente del izquierdo se disuelve 10 gotas de azul de metileno cada una de aproximadamente de 0,02 ml y el otro recipiente lo tenemos de referencia para poder diferenciar el nivel de transparencia al finalizar y ozonizar el agua.

Al prototipo propuesto le toma 15 min en alcanzar en un 100% de transparencia y eliminar el color azulado del metileno como se puede observar en la **Fig. 32, b)**, con esta prueba se pudo evidenciar que nuestro prototipo está produciendo ozono.

4.5.2 Pruebas del prototipo con 225 L de agua de acequias en un tanque

En estas pruebas, se utilizó agua de riego de las acequias de la parroquia Imbaya del cantón Ibarra, la cual es almacenada en un primer tanque con un filtro interno que ayuda a separar los residuos sólidos y algunos compuestos inorgánicos propios de las aguas de acequias. Finalmente, el agua queda almacenada en un tanque con una capacidad de almacenamiento de 250 L **Fig. 33**, tal como se puede observar a continuación.



Fig. 33 Tanque con filtro y de reservorio de 250L

Se llevo a cabo la ozonización directamente en el tanque con 220 litros de agua de acequias durante 30 min y posteriormente por 45 minutos. En función de los cálculos realizados, en condiciones óptimas para la purificación de aguas de acequias de 250 L y de baja

contaminación, se requiere un tiempo de contacto del ozono con el agua a tratar de entre 10 y 20 min con una concentración de ozono de 1 a 2 mg/L. Estos datos se pueden cumplir con un sistema de recirculación y una inyección de ozono a través de un Venturi, ya que se puede alcanzar una disolución del gas ozono con el agua de alrededor del 100% de eficiencia. En esta y en las demás pruebas se utilizó el sistema de inyección por piedras difusoras; con este método se puede conseguir una disolución del gas ozono con el agua de 20 a un 40 o 50% de eficiencia en el mejor de los casos. Por tanto, se puede requerir mayor tiempo de contacto al calculado para alcanzar una eficiencia alta de desinfección.

4.5.3 Pruebas del prototipo con 18 Litros de agua de acequias

Para el presente análisis se tomó muestras de dos tipos de aguas de acequias, con y sin filtración en un botellón de 20 L, las cuales se someten a la acción del ozono por diferentes intervalos de tiempo, como se detalla en la **Tabla 15**. El ozono, al ser un oxidante orgánico, no tiene una eficacia alta para compuestos inorgánicos, resultando no poder desaparecer por completo la turbidez presente en el agua que se obtuvo sin filtro para una de las pruebas.



Fig. 34 Muestras de agua a tratar **a)** Agua de acequia con filtro. **b)** Agua de acequia sin filtro

Al experimentar las pruebas de ozono con el agua, fue necesario el hacer movimientos permanentes tanto de la piedra difusora como del botellón para generar una mezcla y obtener una disolución homogénea del gas ozono en todo el volumen del agua.

4.5.4 Concentración de ozono disuelto en el agua

El ozono útil equivale a los mg/L de gas ozono en disolución por litro de agua. Con esto podemos verificar que cumple con la producción mínima para el tratamiento de 250 litros de agua del estanque mediante un sistema de inyección como el del Venturi.

Tabla 14. Eficiencia de la transferencia del gas ozono al agua

Tiempo	Producción deseada O3 (g/h)	O3 (mg/min)	O3 (mg)	Eficiencia 70%
30 min			750	525 mg
45 min	1.5	25	1125	787 mg
60 min			1500	1050 mg
90 min			2250	1575 mg

De igual forma, con esto podemos calcular los mg/L que se inyecta al tanque para 250 L de agua de acequias. Para mayor volumen de agua los tiempos aumentan y también depende las condiciones en las que se hace el proceso de desinfección, como el clima, el nivel de contaminación, la capacidad de producción constante de ozono y entre otros factores.

Tabla 15. Concentración del gas ozono obtenido por mg/litro

Tiempo	Ozono (mg)	Volumen de agua(L)	Ozono O3 (mg/L)
30 min	525		2.1
45 min	787		3.15
60 min	1050	250	4.2
90 min	1575		6.3

La producción de ozono del equipo por mg/L satisface la necesidad para tiempos de contacto realizados en estas pruebas, siendo efectivo de **60** minutos en adelante para agua de tanque o botellón con movimientos constantes que permita una disolución homogénea del gas ozono con el agua durante el proceso.

4.5.5 Resultados de los análisis microbiológicos del agua tratada.

4.5.5.1 Método de filtración por membrana para los análisis del agua

Los procesos de filtración con membranas se refieren al empleo de membranas de tamaño de poros distintos, es decir, microfiltración (MF), 1-0.1 μm ; ultrafiltración (UF), 0.1-0.01 μm ; nanofiltración (NF), 0.01-0.001 μm y entre otras [39]. Esta membrana es un film muy fino que se hallan divididos por dos fases: alimentación y permeado, estos films sirven de barrera selectiva al paso de toda materia contaminantes en el agua [40]. El método estandarizado de alta precisión permitiendo la detección y cuantificación de microorganismos presentes en el agua y otros líquidos. Para los análisis de este trabajo se utilizó membrana de microfiltración como se ve en. Además, para los análisis se tomaron 100ml de muestra de agua, de entrada (sin ozono) y de salida (tratada con ozono) como se muestra a en los **(Anexo D)**.



Fig. 35 Método de filtración por membrana para los análisis microbiológicos, **a)** colocación de la membra para el filtro, **b)** colocación de la membraba para el cultivo.

El método consistió en pasar un volumen conocido de agua por la membrana, aplicando vacío y buscando retener las células bacterianas, luego se retiró el filtro de la unidad de filtración y se colocó sobre el medio de cultivo, para finalmente seguir con la incubación de la placa a la temperatura y tiempo adecuados que permitan el crecimiento de las colonias.

4.5.5.2 Prueba del agua de acequias con ozono

Este análisis comprende de dos muestras del agua, con y sin filtro que se obtiene del tanque reservorio como muestras de entrada, la cual es sometida a los análisis microbiológicos estableciendo los parámetros a evaluar y determinar el nivel de contaminación.

El nivel de desinfección del agua de acequias va en dependencia a la cantidad de Coliformes totales, E. Coli, y el recuento de Aerobios totales que son microorganismos bacterianos los cuales determinan la calidad del agua **Tabla 16**. Estas bacterias se pueden encontrar en aguas superficiales como ríos, canales de riego, pozos, acequias y entre otras.

- **Resultados 225 litros de agua ozonizada**

Tabla 16. Resultados de los análisis microbiológicos de 225 Litros de agua filtrada de un tanque.

PARAMETROS ANALIZADOS	UNIDAD	RESULTADOS			METODO DE ENSAYO
		ENTRADA	30 min	45 min	
Recuentos aerobios totales	UFC/100 ml	14600	740	660	Siembra en placa
Recuento mohos y levaduras	UFC/100 ml	<10	1000	1000	Petriefilm
Recuento E. Coli	UFC/100 ml	<10	<10	<10	EPA-40 CFR
Recuento coliforme totales	UFC/100 ml	1600	550	460	EPA-40 CFR

De los resultados obtenidos en la primera prueba no fueron lo esperado ya que, el método para un volumen de 225 litros de agua fue ineficiente como se preveía. En este caso la disolución del gas ozono no fue homogénea y no se alcanzó a desinfectar por todo el volumen del agua.

- **Resultados 18 litros de agua ozonizada con filtración previa**

Para los parámetros evaluados en esta prueba fueron un poco más satisfactorios, ya que, se logró reducir en un porcentaje considerable con respecto de las muestras de entrada a las de salida. En estas pruebas se hizo sin ningún sellado del botellón y sin mover el agua para conseguir la disolución uniforme del ozono con el agua obteniendo los siguientes resultados.

Tabla 17. Resultados de análisis microbiológicos con 18 litros de agua filtrada en un botellón.

PARAMETROS ANALIZADOS	UNIDAD	RESULTADOS			METODO DE ENSAYO
		ENTRADA	30 min	45 min	
Sólidos totales	g/100 ml	0.6	-	-	Gravimétrico
Ceniza	g/100 ml	0.47	-	-	Gravimétrico
Materia volátil a 550°C	g/100 ml	0.13	-	-	Gravimétrico
Recuento E. Coli	UFC/100 ml	40	35	30	EPA-40 CFR
Recuento coliforme totales	UFC/100 ml	1500	1240	1120	EPA-40 CFR

De la **Tabla 17**, se puede verificar la eficiencia del prototipo, ya que se pudo reducir en un buen porcentaje de los microorganismos como E. Coli y coliformes totales que son parámetros para la calidad de agua (**Anexo E**), cabe recalcar que a tiempos mayor a 30 minutos se puede lograr mayor desinfección hasta llegar a una desinfección ya sea parcial o totalmente del agua y regirse a los rangos establecidos para la calidad de agua de riego.

- **Resultados 18 litros de agua ozonizada sin filtración previa**

En este último análisis de agua se realizó el recuento total de aerobios mesófilos **Tabla 18**, este parámetro se utiliza como un indicador general de la calidad microbiológica del agua. Dentro de este parámetro se encuentran las bacterias, hongos, algas o protozoos que requieren de oxígeno para su metabolismo y supervivencia. Además, se encuentran los de otro tipo como E. Coli de los coliformes que pueden sobrevivir en ausencia de oxígeno mediante otros procesos metabólicos.

Tabla 18. Resultados de análisis microbiológicos con 18 litros de agua sin filtro en un botellón.

PARAMETROS ANALIZADOS	UNIDAD	RESULTADOS				METODO DE ENSAYO
		ENTRADA	30 min	45 min	90 min	
Recuentos de aerobios totales	UFC/100 ml	3×10^5	1.5×10^5	7.4×10^4	< 10	EPA-40 CFR

Según los resultados de la **Tabla 18**, se puede evidenciar la efectividad del equipo a los **90 min** de tratamiento del agua mediante un sistema por burbujeos. Con esto también, se puede demostrar que el equipo propuesto puede trabajar por tiempos prolongados sin recalentarse en todos sus componentes.

4.5.5.3 Discusión del grado de desinfección de las muestras analizadas.

Unos de los objetivos más relevantes de este trabajo de Tesis fue la elaboración del modelo de un prototipo generador de ozono para la purificación y desinfección ya sea parcial o total de las aguas de acequias, considerando usar materiales y procesos existentes en el medio local, con un nivel de funcionamiento y mantenimiento fácil, de tecnología accesible y económica, y que se rija fundamentalmente en función de las normas de la calidad del agua de riego ecuatoriana.

EL “TEXTO UNIFICADO DE LA LEGISLACIÓN SECUNDARIA DEL MINISTERIO DEL AMBIENTE” (TELSMA), Es la norma técnica ambiental dictada bajo el amparo de la ley de gestión ambiental para la prevención y control de la contaminación ambiental y se somete a las disposiciones de estos, es de aplicación obligatoria y rige en todo el territorio nacional del Ecuador [41], [42]

La finalidad de realizar la ozonificación del agua es el de genera la oxidación necesaria para la destrucción de los microorganismos como virus y bacterias mediante los análisis

microbiológicos del laboratorio; en el cual se llevó a cabo el análisis de tres muestras de agua en diferentes condiciones que proceden de un tanque superficial que no recibe tratamiento alguno.

En el libro VI, ANEXO I “norma de calidad ambiental y de descargas de efluentes: Recurso agua”, establece los parámetros y criterios de la calidad de agua en sus distintos usos. En este proyecto se utilizó agua de riego como muestra para someter a un tratamiento mediante la ozonización, entonces las normativas se encuentran en la siguientes **Tabla 19**, con algunos de los criterios de calidad más importantes que se debe cumplir para el riego [42]

Tabla 19. Criterios de calidad de aguas para uso agrícola en riego

PARÁMETROS	UNIDAD	LIMITES MAXIMOS PERMISIBLES
Coliformes fecales	mg/l	< 1000
Coliformes totales	mg/l	< 1000
E. Coli	UFC/100ml	<100
Hongos y levaduras	UFC/100ml	<100
pH		6 - 9
SDT	mg/l	< 500
RAS	mg/l	<10
CE	Mili Ohm/m	< 3

Al analizar la comparación de los resultados de todas las muestras de agua, se puede observar que, una vez tratado durante un tiempo determinado, el agua en cuestión presenta una reducción considerable en el número de bacterias analizadas, las cuales pueden ser portadoras de patógenos y son muy influyentes en la calidad de agua de riego. En el análisis realizado, la calidad del agua queda determinada en cuanto a tres tipos de bacterias:

- Coliformes totales
- Microorganismos patógenos (E. Coli)
- Recuento de Aerobios totales.

Se debe resaltar que el ozono posee una alta efectividad para los microorganismos patógenos (hongo, virus, bacterias y parásitos), materia orgánicas e inorgánicas (sales y minerales, metales, nitratos, fenoles). Por tal razón, en los análisis realizados se mide el grado de desinfección en función de los parámetros más importantes. Para el recuento de los aerobios totales, coliformes y el E. Coli de las muestras (**m1, m2 y m3**) se remite al (**Anexo F y J**).

Tabla 20. Comparación de los resultados obtenidos con las normas de calidad de agua según el ministerio.

Parámetros analizados	Frecuencia (75%)	Voltaje	Unidad	RESULTADOS					Límites permitidos
				Entrada	30 min	45 min	60 min	90 min	
Recuentos aerobios totales (M1)			UFC/100 ml	14.6x10 ³	740	660	-	-	<1000
Recuentos aerobios totales (M3)			UFC/100 ml	3x10 ⁵	1.5x10 ⁵	-	7.4x10 ⁴	< 10	<1000
Mohos y levaduras			UFC/100 ml	< 10	<1000	<1000	-	-	<100
Recuento E. Coli (M1)	30 - 35 kHz	6 - 12 kV	UFC/100 ml	< 10	< 10	< 10	-	-	< 100
Recuento E. Coli (M2)			UFC/100 ml	40	35	30	-	-	
Coliformes totales (muestra 1)			UFC/100 ml	1600	550	460	-	-	
Coliformes totales (muestra 2)			UFC/100 ml	1500	1240	1120	-	-	< 1000

En cuanto a los beneficios que tiene este tratamiento mediante la ozonización del agua de riego, se destaca que se eliminan olores, sabores y colores indeseables que mejoran las propiedades de esta. Igualmente, ayuda a oxigenar el suelo, dado que el ozono se descompone en oxígeno puro tras cierto tiempo permitiendo la eliminación de patógenos y reducir la necesidad de pesticidas y fertilizantes promoviendo una agricultura sostenible.

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES:

- Con el equipo propuesto se ha logrado eliminar alrededor del 95% de algunos de los microorganismos patógenos presentes en las muestras de agua tratada con ozono, las mismas que fueron comprobados por medio de análisis microbiológicos de laboratorio (Anexo E, F)
- La consideración de los parámetros de diseño es fundamental en la selección de tipo de materiales a utilizar, para formulación y cálculos de concentración y sobre todo para las diferentes fases de la construcción del generador de ozono, desde su etapa inicial hasta su etapa de funcionamiento y pruebas finales del prototipo.
- Los mecanismos para formación del arco eléctrico por medio del transformador Flyback influyen directamente en la producción del ozono, ya que este funciona como un inductor puro debido a que está diseñado para guardar energía en su circuito magnético. El voltaje que puede entregar, según la frecuencia y voltaje de la onda cuadrada, puede alcanzar los 50.000 voltios y consumir muy poca corriente en los rangos de miliamperio.
- El tiempo de funcionamiento del prototipo propuesto y el contacto de gas ozono con el agua mediante la inyección por burbujeo se encuentra en los rangos de 30 min a 2 horas según el nivel de contaminación del agua a tratar, alcanzando concentraciones del ozono disuelto en agua comprendidos entre 1.5 a 4,6 mg/L (1.5 – 4.6 ppm), de esta forma satisfaciendo la demanda inicial para este proyecto.
- Debido a la alta variabilidad de la carga, no es posible medir y realizar los cálculos precisos de las potencias involucradas en la salida del Flyback. Esta variabilidad se

debe a múltiples factores como la forma geométrica de la celda, la configuración del dieléctrico y electrodos, material de la celda, entre otras. Sin embargo, los valores aproximados calculados y las valoraciones que se realizó nos permitieron tener una idea general de la eficiencia del dispositivo.

- En las mediciones del gas ozono producido por el prototipo al ambiente con el sensor MQ-131 de baja concentración presenta un incremento de niveles de concentración en ppm hasta alcanzar un valor constante a partir de los 5 minutos de haber comenzado el censado y aproximándose a los valores máximos medibles por el sensor (1ppm).

5.2 RECOMEDACIONES

- Para futuras investigaciones y mejoramiento del equipo, se recomienda la incorporación de un control activo y medir con precisión las variables de voltaje y corriente de la celda con el fin de poder permita ajustar los niveles de trabajo para mantener un rango eficiente de ozono.
- Además, se recomienda, implementar un sistema de inyección del gas ozono al agua mediante absorción por Venturi, ya que, se puede alcanzar una eficiencia del 99% de disolución del ozono con el agua y de esta forma poder reducir los tiempos de contacto y proteger el equipo de funcionamientos prolongados.
- La concentración de ozono producido no depende mucho del tamaño de la celda de descarga sino más bien, de los materiales de la celda generadora de ozono, el alto voltaje, el control de la frecuencia de trabajo y el flujo de aire.
- Mejorar los materiales empleados en la construcción y además limpiar o reemplazar cada cierto tiempo los elementos internos de la celda para aprovechar y obtener la mayor eficiencia posible del equipo.
- Utilizar el equipo en rangos de tiempos no muy prolongados para no sobrecalentar los componentes internos o, a su vez, implementar un sistema de enfriamiento basado en ventiladores para trabajar en ciclos continuos, o también utilizar otro tipo de material para la celda de descarga.

REFERENCIAS

- [1] J. E. Forero, O. P. Ortiz, and F. Rios, “Aplicación de procesos de oxidación avanzada como tratamiento de fenol en aguas residuales industriales de refinería,” *CT&F - Ciencia, tecnología y futuro*, ISSN-e 0122-5383, Vol. 3, N°. 1, 2005, págs. 97-109, vol. 3, no. 1, pp. 97–109, 2005, Accessed: Jun. 01, 2023. [Online]. Available: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5513926&info=resumen&idioma=ENG>
- [2] H. Ramírez Arcila and J. Jaramillo Peralta, “Agentes naturales como alternativa para el tratamiento del agua,” *Revista de la Facultad de Ciencias Básicas*, ISSN-e 1900-4699, Vol. 11, Num. 2, 2015, vol. 11, no. 2, p. 4, 2015, Accessed: Jun. 01, 2023. [Online]. Available: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5323687&info=resumen&idioma=SPA>
- [3] S. Rodríguez, S. Jaramillo, D. Zurita, A. Valdiviezo, and C. Choloquina, “Evaluation of the Quality of Irrigation Water from the Tilipulo Enríquez-Cotopaxi Acequia Through the Sodium Absorption Ratio (SAR),” *Revista Politecnica*, vol. 49, no. 2, pp. 55–64, May 2022, doi: 10.33333/rp.vol49n2.06.
- [4] “El páramo reserva agua de calidad para Quito – Quito Informa.” Accessed: Apr. 08, 2024. [Online]. Available: <https://www.quitoinforma.gob.ec/2022/11/01/el-paramo-reserva-agua-de-calidad-para-quito/>
- [5] Romero and Mynor, “Tratamientos utilizados en potabilización de agua,” *Universidad Rafael Landívar*, vol. 8, pp. 1–12, 2008.

- [6] A. Galvis C, G. Aponte M, D. F. Echeverry I, M. I. González M, and D. A. Cardona Z, “Evaluación del funcionamiento de un Generador de Ozono a escala piloto en la desinfección de agua para consumo humano,” *INGENIERÍA Y COMPETITIVIDAD*, vol. 7, no. 1, 2011, doi: 10.25100/iyc.v7i1.2527.
- [7] M. O. BATALLER, L. A. FERNÁNDEZ, and E. VÉLIZ, “Revista internacional de contaminación ambiental = International journal of environmental pollution,” *Revista internacional de contaminación ambiental*, vol. 26, no. 1, pp. 85–95, 2001, Accessed: Jun. 30, 2025. [Online]. Available: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992010000100007&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- [8] J. Ozonek, S. Fijałkowski, and I. Pollo, “Energy identification of energy utilization efficiency in an industrial process of ozone generation,” *Ozone Sci Eng*, vol. 19, no. 3, 1997, doi: 10.1080/01919519708547302.
- [9] M. O. Bataller, L. A. Fernández, and E. Véliz, “Eficiencia y sostenibilidad del empleo del ozono en la gestión de los recursos hídricos,” 2010.
- [10] R. L. Larocque, “Ozone applications in Canada - A state of the art review,” *Ozone Sci Eng*, vol. 21, no. 2, 1999, doi: 10.1080/01919519908547246.
- [11] W. H. Glaze, “Drinking-water treatment with ozone,” *Environ Sci Technol*, vol. 21, no. 3, 1987, doi: 10.1021/es00157a001.
- [12] D. Jenkins and V. L. Snoeyink, *Química del agua*, 1987th ed. México: 1999, 1987. Accessed: Apr. 17, 2024. [Online]. Available: <https://latam.casadellibro.com/libro-quimica-del-agua/9789681816087/637611>

- [13] F. Cisneros, L. Galarza, and M. Sáenz, “Agua y Energía: Actualidad y futuro,” *Strategies topics Serie*, vol. 1, no. 1, pp. 1–40, 2008.
- [14] Sevillano Carrera and Aracelly Katherine, “Tratamiento de agua en la canalización de la acequia La Victoria en el cantón Antonio Ante de la provincia de Imbabura,” Pontificia Universidad Católica del Ecuador Sede Ibarra, 2018. Accessed: Apr. 17, 2024. [Online]. Available: <https://repositorio.puce.edu.ec/server/api/core/bitstreams/777d5b5a-6c5e-496c-b4bb-4953628a606f/content>
- [15] A. Acosta and E. Martínez, *Agua: un derecho humano fundamental*. Quito: Editorial Abya-Yala, 2010. Accessed: Apr. 17, 2024. [Online]. Available: https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=YONZEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA5&dq=Acosta,+E+Mart%C3%ADnez+El+agua,+un+derecho+humano+fundamentra l.+Quito,+Ecuador&ots=EPIvs7_plP&sig=k9yzPSxn-nY1aeFqQfcVqmyL4rc#v=onepage&q=Acosta%2C%20E%20Mart%C3%ADnez%20El%20agua%2C%20un%20derecho%20humano%20fundamental.%20Quito%2C%20Ecuador&f=false
- [16] M. C. Apaza, “Informe tecnico obtencion de agua ozonizada envasada por laboratorios la cooper,” UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTÍN, Arequipa, 2015. Accessed: Apr. 18, 2024. [Online]. Available: <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/200>
- [17] C. M. Espinal Velásquez, D. Ocampo Acosta, and J. D. Rojas García, “Construcción de un prototipo para el sistema de reciclaje de aguas grises en el hogar,” Jan. 2014,

Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira. Accessed: Jun. 26, 2025.

[Online]. Available: <https://hdl.handle.net/11059/4349>

- [18] I. R. Avila Bareño and others, “Diseño, propuesta e implementación de un filtro para tratamiento de aguas de uso doméstico en tanques de reserva en la población del casco urbano de la inspección de San Antonio de Anapoima,” 2016.
- [19] I. Kano, D. Darbouret, and S. Mabic, “UV technologies in water purification systems,” 2012. [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:51962560>
- [20] J. J. McKetta and W. A. Cunningham, *Encyclopedia of Chemical Processing and Design*. Boca Raton: Routledge, 2022. doi: 10.1201/9780203757888.
- [21] G. J. Gallego, S. Muñoz, J. D. Gaviria, and I. C. Serna, “Uso del Ozono en diferentes campos de la Odontología,” *CES Odontol*, vol. 20, no. 2, pp. 65–68, Dec. 2008, [Online]. Available: <https://revistas.ces.edu.co/index.php/odontologia/article/view/111>
- [22] M. D. Neira and J. T. Padilla, “Evaluación de la eficiencia del ozonificador en el tratamiento de agua utilizada para consumo humano en la fundación María Amor de la parroquia Sayausí,” Tesis, Universidad de Cuenca, Cuenca, 2016.
- [23] A. T. Ortega Ramírez and N. Sánchez Rodríguez, “Tratamientos avanzados para la potabilización de aguas residuales,” *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, vol. 31, no. 2, 2021, doi: 10.18359/rcin.5343.
- [24] J. G. Salvador Estupiñán, “Obtención de agua ozonizada a nivel piloto en la Facultad de Ingeniería Química y Metalúrgica,” Aug. 2021, Accessed: Apr. 23, 2024. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/20.500.14067/5182>

- [25] F. J. González Fanfalone, “Diseño y construcción de un prototipo para generación de ozono,” San Pedro Garza García: UDEM, 1997. Accessed: May 06, 2024. [Online]. Available: <http://repositorio.udem.edu.mx/handle/61000/1263>
- [26] E. B. Santiago and J. M. C. Ancona, “Diseño y Construcción de un generador de ozono para aplicaciones de purificación de agua,” *Centro Nacional de investigación y desarrollo tecnológico "CENIDET"-Mexico*, Aug. 2005, Accessed: Apr. 23, 2024. [Online]. Available: <https://n9.cl/omwfxv>
- [27] D. Chacón Barrantes, M. Ramírez Richmond, and M. F. Sánchez Picado, “Evaluación de la aplicación de ozono en el piso para la eliminación de *Listeria SPP* en una industria de embutidos,” *UNIVERSIDAD TÉCNICA NACIONAL*, Jan. 2018, Accessed: Apr. 23, 2024. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/20.500.13077/312>
- [28] C. Gottschalk, J. A. Libra, and A. Saupe, *Ozonation of water and waste water: A practical guide to understanding ozone and its application*. 2008. doi: 10.1002/9783527613342.
- [29] A. Omar and R. Sanchez, “Diseño e implementación de un sistema prototipo de purificación de aire por ozono del habitáculo de un vehículo liviano,” *UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA EQUINOCCIAL*, Quito, 2016. Accessed: Apr. 30, 2024. [Online]. Available: <http://repositorio.ute.edu.ec/handle/123456789/14156>
- [30] S. E. Llagua Paredes, “Construcción de un generador de ozono automatizado para la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial,” *Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ingeniería en Sistemas~...*, 2017.

- [31] W. Lozano and J. F. Soto, “Diseño y construcción de un prototipo generador de ozono para la potabilización de agua,” *Universidad Nacional de Loja, Área de Energía, Industrias y Recursos Naturales No Renovables*, 2010, Accessed: Apr. 30, 2024. [Online]. Available: <http://dspace.unl.edu.ec/jspui/handle/123456789/17007>
- [32] F. Am Water Works Res, B. Langlais, D. A. Reckhow, and D. R. Brink, *Ozone in water treatment: application and engineering*. CRC press, 1991.
- [33] D. R. Brink, B. Langlais, D. A. Reckhow, A. R. Foundation, and C. générale des eaux, *Ozone in water treatment : application and engineering*. Chelsea, Michigan, EE.UU: Lewis Publishers, 1991. [Online]. Available: <https://cir.nii.ac.jp/crid/1130000795010226432>
- [34] S. F. Robles Maldonado, “Generador de ozono para una planta de tratamiento de agua en piscinas recreativas y terapéuticas,” UNIVERSIDAD TECNICA DEL NORTE, Ibarra, 2016. Accessed: May 06, 2024. [Online]. Available: <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/5637>
- [35] J. Vásconez Hurtado and D. Lopez, “Diseño e Implementación de un Prototipo Generador de Ozono para Purificación de Agua para el Consumo Humano,” 2013.
- [36] E. Sánchez, “Manual de procedimientos de medición de ozono residual,” *Refrigeración de Morelos SA de CV Jiutepec, Morelos*, 2004.
- [37] C. Albicker and Neo Corp water, “Desinfección efectiva de agua embotellada con Ozono.” Accessed: Apr. 18, 2024. [Online]. Available: <https://www.neocorpwater.com/desinfeccion-tratamiento-de-agua-embotellada-por-ozono.html>

- [38] J. I. Morales, “UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL, FACULTAD REGIONAL CÓRDOBA-ARGENTINA Análisis de Topologías de Redes Snubber para Transistores de Potencia en Fuentes Conmutadas.”
- [39] A. Rubio Clemente, E. L. Chica Arrieta, and G. A. Peñuela Mesa, “Procesos de tratamiento de aguas residuales para la eliminación de contaminantes orgánicos emergentes,” *Revista Ambiente e Agua*, vol. 8, no. 3, 2013, doi: 10.4136/ambiente-agua.1176.
- [40] D. Roncancio Parra, “Estudio Sobre La Aplicación De Las Técnicas De Filtración Por Membrana a Los Sistemas De Tratamientos De Aguas Residuales,” *Universidad La Gran Colombia*, no. 1, 2015.
- [41] Ministerio del Ambiente, *Texto Unificado de Legislación Secundaria de Medio Ambiente, Norma de Calidad Ambiental y de Descargas de Efluentes: Recurso agua. Libro VI. Anexo 1.*, no. 097. 2015.
- [42] J. K. Carvajal Mejía and M. J. Olives Córdova, “Determinación de puntos de muestreo para el estudio de la calidad de agua de la acequia Pumamaqui,” Universidad Politécnica Salesiana, Quito, 2019.

ANEXOS

ANEXOS A: Datasheet del circuito astable



LM555

SNASS48D – FEBRUARY 2000 – REVISED JANUARY 2015

www.ti.com

Device Functional Modes (continued)

Figure 13 is a nomograph for easy determination of R, C values for various time delays.

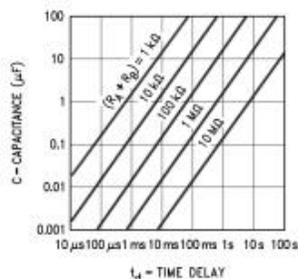


Figure 13. Time Delay

7.4.2 Astable Operation

If the circuit is connected as shown in Figure 14 (pins 2 and 6 connected) it will trigger itself and free run as a multivibrator. The external capacitor charges through $R_A + R_B$ and discharges through R_B . Thus the duty cycle may be precisely set by the ratio of these two resistors.

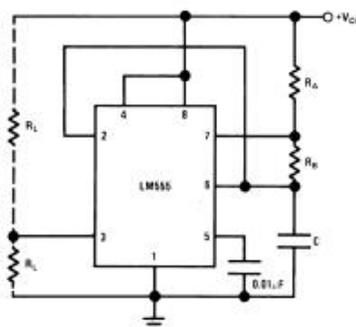
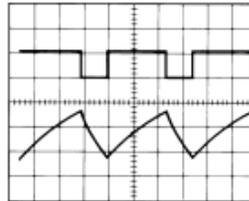


Figure 14. Astable

In this mode of operation, the capacitor charges and discharges between $1/3 V_{CC}$ and $2/3 V_{CC}$. As in the triggered mode, the charge and discharge times, and therefore the frequency are independent of the supply voltage.

Figure 15 shows the waveforms generated in this mode of operation.

Device Functional Modes (continued)



$V_{CC} = 5\text{ V}$
 $\text{TIME} = 20\mu\text{s}/\text{DIV.}$
 $R_A = 3.9\text{ k}\Omega$
 $R_B = 3\text{ k}\Omega$
 $C = 0.01\text{ }\mu\text{F}$

Top Trace: Output 5V/Div.
 Bottom Trace: Capacitor Voltage 1V/Div.

Figure 15. Astable Waveforms

The charge time (output high) is given by:

$$t_1 = 0.693 (R_A + R_B) C \tag{1}$$

And the discharge time (output low) by:

$$t_2 = 0.693 (R_B) C \tag{2}$$

Thus the total period is:

$$T = t_1 + t_2 = 0.693 (R_A + 2R_B) C \tag{3}$$

The frequency of oscillation is:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1.44}{(R_A + 2R_B) C} \tag{4}$$

Figure 16 may be used for quick determination of these RC values.

The duty cycle is:

$$D = \frac{R_B}{R_A + 2R_B} \tag{5}$$

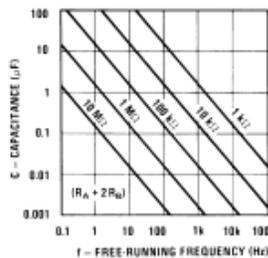


Figure 16. Free Running Frequency

ANEXO B: Equipo generador de ozono funcional

El prototipo propuesto lleva por fuera una bomba pecera la cual nos permite variar el flujo en 3 niveles. la caja contenedora es con una protección IP X2.



ANEXO C: Pruebas de funcionamiento del equipo con el azul de metileno.

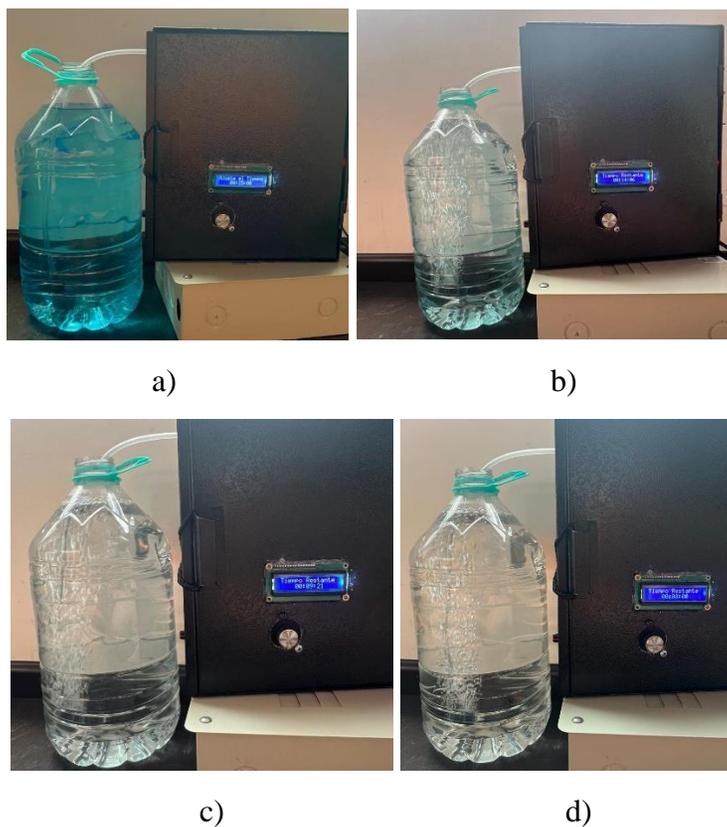


Fig. 36 Prueba inicial del azul de metileno temporizado, **a)** agua con 10 gotas de azul de metileno, **b)** ozonización del agua por 10 minutos, **c)** ozonización de agua por 15 minutos, **d)** ozonización de agua por 25 min

ANEXO D: Toma de muestras y análisis del agua de acequias de un botellón.



a)



b)

c)

Fig. 37 tratamiento del agua con ozono, **a)** ozonización del agua temporizado, **b)** toma de muestra de agua tratada con ozono, **c)** método de filtración por membrana de las muestras.

ANEXO E: Resultados de la incubación para los análisis de E. Coli

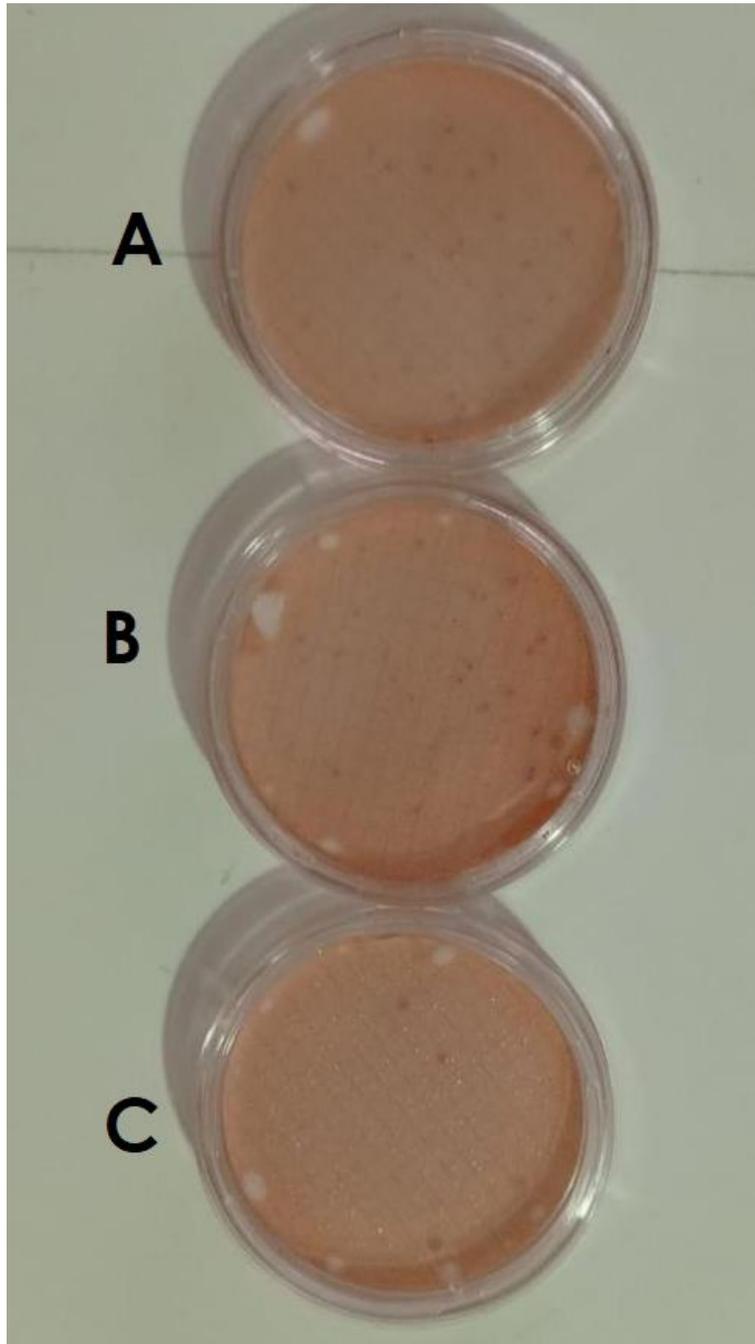


Fig. 38 Identificación y recuento de colonias de los microorganismos retenidos por la membrana. **a)** número de colonias de la muestra sin ozono, **b)** número de colonias de la muestra ozonizada por 30 min **c)** número de colonias de la muestra ozonizada por 45 min

ANEXO F: Resultados de los análisis microbiológicos de laboratorio aerobios totales

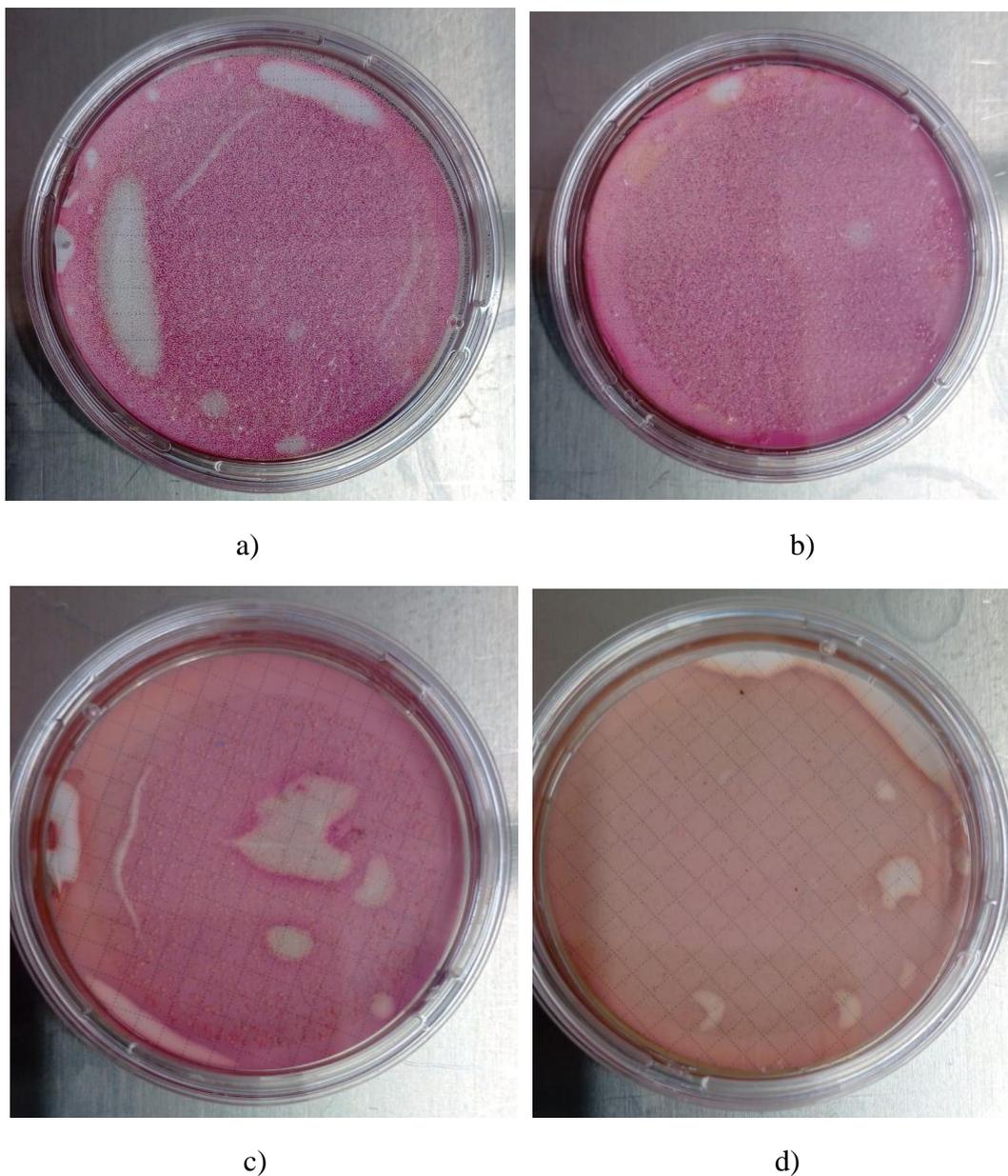


Fig. 39 Recuento de aerobios totales luego de la incubación. **a)** Presencia de aerobios totales de la muestra sin ozono, **b)** Presencia de aerobios totales de la muestra con ozonización por 30 min, **c)** Presencia de aerobios totales de la muestra con ozonización por 60 min, **d)** Presencia de aerobios totales de la muestra con ozonización por 90 min.

De estos resultados se puede verificar la eficiencia del prototipo propuesto, ya que en un tiempo determinado puede eliminar ya sea parcial o total los microorganismos presentes en el agua de riego.

ANEXO G: Diseño del circuito oscilador y su funcionamiento con el transformador Flyback

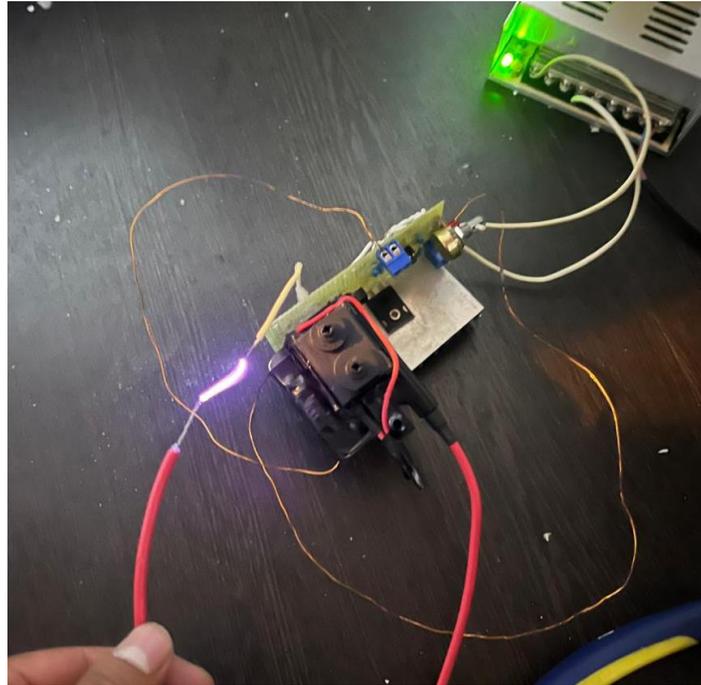


Fig. 40 Formación del arco eléctrico de alto voltaje

ANEXO H: Diseño inicial del prototipo con un compresor de 50 lpm.



Fig. 41 Funcionamiento del sistema ozonificador

ANEXO I: MANUAL DE USO Y FUNCIONAMIENTO DEL OZONIFICADOR

El equipo tiene un menú de opciones, donde se puede configurar el tiempo, en horas, minutos y segundos. Además, tiene menú de información y reinicio de las variables guardadas. Para la selección de opciones dentro del menú, el equipo tiene un encoder rotativo, permitiendo navegar en sentido horario, antihorario y el modo clic para la acceder a cada opción.

MENÚ

TIEMPO: Se debe seleccionar una de las tres opciones del tiempo para poder configurar y guardar mediante un clic.

COMENZAR/ INICIO: dentro de esta opción podemos encontrar los tiempo configurados y guardados previamente y de ser correcto podemos iniciar el temporizado del equipo.

AUTOMÁTICO: si se activa, permite iniciar el equipo con la última configuración.

EEPROM: si se activa, permite guardar los últimos valores configurados.

RESET: permite reiniciar y borrar todos los valores configurados en las variables.

INFORMACIÓN: dentro de esta opción se puede ver los estados de cada variable, por ejemplo, si se tiene activo el modo automático, la Eeprom y los tiempos configurados.

Nota 1: la sensibilidad del encoder rotativo para avanzar en sentido horario o antihorario es de dos posiciones al mismo tiempo, de lo contrario el encoder se posiciona en zona media activa generándose una falla de lectura y volviéndose en sentido antihorario de forma automática; para este problema solo se gira una posición en sentido antihorario lo que permite posicionar en zona inactiva y poderse de nuevo girar en cualquier sentido para la selección.

PASOS PARA EL CORRECTO INICIO DEL EQUIPO

PASO 1: El equipo tiene un encendido directo al conectar el cable de alimentación a los 110V, debido a la incorporación interna de una fuente conmutada y regulada.

PASO 2: Es importante antes de configurar o iniciar el temporizado, precalentar el reactor por 2 minutos como mínimo a una frecuencia del 25% y a un flujo del aire de 50%, ya que si se inicia a una frecuencia alta (>50%) se puede generar arcos indebidos sobre el dieléctrico llegándolos hasta romper.

PASO 3: Una vez pasados los 2 minutos del precalentamiento, se puede ir incrementando la frecuencia y trabajar hasta < 80% y el flujo del aire al 100%. No forzar al equipo llevando al 100% de la frecuencia disponible.

PASO 4: Se pueden presentar fallas de control en el equipo debido a los picos altos de voltaje y corrientes generados por el transformador si se trabaja a frecuencias por encima del 80%, de ser así, se recomienda reiniciar el microcontrolador Arduino Nano directamente desde su placa, mas no desconectar el equipo ya que esto puede elevar aún más los picos y dañar el microcontrolador y el circuito oscilador.

PASO 5: El equipo esta optimizado para poder trabajar sin calentamiento excesivo por 2 horas, se recomienda dar reposos de 30 min como mínimo luego de unas 2 horas de trabajo continuo.

PASO 6: para el apagado solo se debe desconectar el equipo de su alimentación principal.

ANEXOS J: Resultado de los análisis de laboratorio.

Informe N°: 25 -2025

DATOS DEL CLIENTE

Análisis solicitado por:	Sr. Alexis Cuasque
Atención:	Sr. Alexis Cuasque
RUC/Ci:	10046 10489
Dirección:	No informa
Ciudad/Provincia:	Ibarra/Imbabura
Teléfono:	09 793 12793
email:	vacuasquec@utn.edu.ec

DATOS DE LA MUESTRA

Agua de sequia - Imbaya (3 muestras)			
Tipo de muestra:	líquida	Descripción:	No aplica
Fecha de recepción:	30 de mayo de 2025	Número de muestras:	3
Cantidad:	120 ml c/u	Fecha de elaboración:	No Informa
Tipo de conservación:	Refrigeración	Lote:	No Informa
Tipo de envase:	PET	Fecha de caducidad:	No Informa
Tipo de muestreo:	No aplica	Persona quien muestrea:	Propietario

DATOS DE LABORATORIO

Fecha de análisis:	30 de mayo de 2025
Fecha de entrega informe:	05 de junio de 2025
Código Interno	No aplica

Resultado Microbiológico

Parámetro Analizado	Unidad	Resultados			Método de Ensayo
		Entrada	30 min	45 min	
Recuento Aerobios Totales	UFC/100 ml	14600	740	660	Siembra en Placa
Recuento Mohos y Levaduras	UFC/100 ml	< 10	1000	1000	Petrifilm
Recuento E. coli	UFC/100 ml	< 10	< 10	< 10	EPA – 40 CFR
Recuento coliformes totales	UFC/100 ml	1600	550	460	EPA – 40 CFR

Observaciones

Los resultados obtenidos pertenecen exclusivamente para las muestras analizadas

El laboratorio no se responsabiliza del uso que el cliente pueda dar al presente informe.

Los informes se almacenarán por un periodo de dos años a partir del ingreso de la muestra al laboratorio

Tiempo de almacenamiento de las muestras: 5 días a partir de la entrega del informe.

Responsable:
Verónica Espinoza Torres



Dra. Verónica Espinoza Torres
Gerente General

Alfanalítica S.A.S.

RUC: 1091796298001

Dirección: Manuel Peñaherrera 4-106 y Rafael Troya – Parque Boyacá. – Ibarra, Teléfonos: 0983064170, 0989753573, 0983382115,

e-mail: alfanalitica@outlook.com, alfanalitica.ibarra@gmail.com



Análisis Físicos, Químicos y Microbiológicos:
Aguas, Alimentos y Afines

Informe N°: 27 -2025

DATOS DEL CLIENTE

Análisis solicitado por:	Sr. Alexis Cuasque
Atención:	Sr. Alexis Cuasque
RUC/C.I:	1004610489
Dirección:	No informa
Ciudad/Provincia:	Ibarra/Imbabura
Teléfono:	09 79312793
e-mail:	vacuasquec@utn.edu.ec

DATOS DE LA MUESTRA

Agua de sequia - Imbaya (1 muestras)			
Tipo de muestra:	líquida	Descripción:	No aplica
Fecha de recepción:	06 de junio de 2025	Número de muestras:	1
Cantidad:	120 ml c/u	Fecha de elaboración:	No Informa
Tipo de conservación:	Refrigeración	Lote:	No Informa
Tipo de envase:	PET	Fecha de caducidad:	No Informa
Tipo de muestreo:	No aplica	Persona quien muestrea:	Propietario

DATOS DE LABORATORIO

Fecha de análisis:	06 de junio de 2025
Fecha de entrega informe:	12 de junio de 2025
Código Interno	No aplica

Parámetro Analizado	Unidad	Resultados			Método de Ensayo
		Entrada	30 min	45 min	
Sólidos Totales	g/1000 ml	0,6	----	----	Gravimétrico
Cenizas	g/1000 ml	0,47	----	----	Gravimétrico
Materia volátil a 550 °C	g/1000 ml	0,13	----	----	Gravimétrico
Recuento E. coli	UFC/100 ml	40	35	30	EPA – 40 CFR
Recuento coliformes totales	UFC/100 ml	1500	1240	1120	EPA – 40 CFR

Observaciones

Los resultados obtenidos pertenecen exclusivamente para las muestras analizadas

El laboratorio no se responsabiliza del uso que el cliente pueda dar al presente informe.

Los informes se almacenarán por un periodo de dos años a partir del ingreso de la muestra al laboratorio

Tiempo de almacenamiento de las muestras: 5 días a partir de la entrega del informe

Responsable:



Dra. Verónica Espinoza Torres
Gerente General

Alfanalítica S.A.S.

RUC: 1091796298001

Dirección: Manuel Peñaherrera 4-106 y Rafael Troya – Parque Boyacá. – Ibarra, Teléfonos: 0983064170, 0989753573, 0983382115,

e-mail: alfanalitica@outlook.com, alfanalitica.ibarra@gmail.com

Informe N°: 28 -2025

DATOS DEL CLIENTE

Análisis solicitado por:	Sr. Alexis Cuasque
Atención:	Sr. Alexis Cuasque
RUC/Ci:	1004610489
Dirección:	No informa
Ciudad/Provincia:	Ibarra/Imbabura
Teléfono:	09 79312793
email:	vacuasquec@utn.edu.ec

DATOS DE LA MUESTRA

Agua de sequia - Imbaya (1 muestras)

Tipo de muestra:	líquida	Descripción:	No aplica
Fecha de recepción:	11 de junio de 2025	Número de muestras:	1
Cantidad:	120 ml c/u	Fecha de elaboración:	No Informa
Tipo de conservación:	Refrigeración	Lote:	No Informa
Tipo de envase:	PET	Fecha de caducidad:	No Informa
Tipo de muestreo:	No aplica	Persona quien muestrea:	Propietario

DATOS DE LABORATORIO

Fecha de análisis:	11 de junio de 2025
Fecha de entrega informe:	12 de junio de 2025
Código Interno	No aplica

Parámetro Analizado	Unidad	Resultados				Método de Ensayo
		Entrada	30 min	60 min	90 min	
Recuento Aerobios totales	UFC/100 ml	3×10^5	$1,5 \times 10^5$	$7,4 \times 10^4$	<10	EPA – 40 CFR

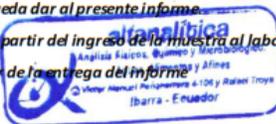
Observaciones

Los resultados obtenidos pertenecen exclusivamente para las muestras analizadas

El laboratorio no se responsabiliza del uso que el cliente pueda dar al presente informe.

Los informes se almacenarán por un periodo de dos años a partir del ingreso de la muestra al laboratorio

Tiempo de almacenamiento de las muestras: 5 días a partir de la entrega del informe



Responsable:



Dra. Verónica Espinoza Torres

Gerente General

Alfanalítica S.A.S.

RUC: 1091796298001

Dirección: Manuel Peñaherrera 4-106 y Rafael Troya – Parque Boyacá. – Ibarra, Teléfonos: 0983064170, 0989753573, 0983382115,

e-mail: alfanalitica@outlook.com, alfanalitica.ibarra@gmail.com