



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

**SISTEMA DE OZONIFICACIÓN EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS DE
ACEQUIAS PARA SISTEMAS HIDROPÓNICOS**

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

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: Producción industrial y tecnología sostenible

AUTOR:

Sr. Adrián Israel Revelo García

Director:

MSc. Diego Luis Ortiz Morales

Asesor:

MSc. Cosme Damián Mejía Echeverría

Ibarra - Ecuador 2026



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, pongo a disposición el 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:	1004807234		
APELLIDOS Y NOMBRES:	Revelo García Adrián Israel		
DIRECCIÓN:	Pedro Vicente Maldonado 9-51 y Miguel Oviedo		
EMAIL:	airevelog@utn.edu.ec		
TELÉFONO FIJO:		TELÉFONO MÓVIL:	0996506681

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	Sistema de ozonificación en el tratamiento de aguas de acequias para sistemas hidropónicos.
AUTOR (ES):	Adrián Israel Revelo García
FECHA: DD/MM/AAAA	10/02/2026
PROGRAMA:	☒ GRADO ☐ POSGRADO
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniero en Mecatrónica
ASESOR /DIRECTOR:	MSc. Diego Luis Ortiz Morales

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 10 días del mes de febrero de 2026.

EL AUTOR:

Firma:.....

Nombre: Revelo García Adrián Israel



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

CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE
INTEGRACIÓN CURRICULAR

Ibarra, 10 de febrero de 2026

MSc. 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)

MSc. 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 “SISTEMA DE OZONIFICACIÓN EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS DE ACEQUIAS PARA SISTEMAS HIDROPÓNICOS.” elaborado por ADRIÁN ISRAEL REVELO GARCÍA, 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. Diego Luis Ortiz Morales
C.C.: 1001586997

(f).....
Ing. Cosme Damián Mejía Echeverría
C.C.: 1002641288

DEDICATORIA

Quiero dedicar este trabajo a Dios, a mis padres, a mi hermana y a mis ángeles en el cielo, Consuelito y Mishell, que han sido mi mayor motivación durante todos estos años de vida Universitaria.

También le dedico a mi abuelita Laurita, ahora eres un angelito más, a pesar de las circunstancias me enseñó a no rendirme y poner en alto los valores que son guía para todo el trayecto de mi vida, te extraño.

AGRADECIMIENTO

Empieza una nueva etapa de mi vida y no olvidaré la que se va. Agradezco a mis padres por todo el apoyo que me dieron durante todo este camino, con altos y bajos jamás dudaron de mí, ahora este logro es para ustedes, gracias por todo el esfuerzo que hacen, gracias Papi por su presión y ayudarme en resolver los problemas durante este tiempo. Gracias a mi ñaña por ser mi compañera de vida, por las risas y enojos, pero siempre presente en cada paso que doy. En general, agradezco a toda mi familia, porque cada uno aportó para que este sueño se haga realidad.

Agradezco a mi novia Alondra, por ser mi compañera, por el amor, cariño y paciencia. Gracias por ser mi inspiración.

Agradezco a mis tutores: Ing. Diego Ortiz e Ing. Cosme Mejía, por sus consejos, tiempo y guía para el desarrollo de este trabajo.

Gracias a todos los docentes que fueron parte de mi formación como profesional, siempre llevaré sus consejos y amistad durante el trayecto de mi vida.

Gracias a todos mis amigos por el apoyo durante todo este tiempo, algunos a la distancia, pero siempre pendientes, y a la gente que estuvo presente todo el tiempo, solo decirles que todo es posible, jamás se rindan.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA.....	2
2. CONSTANCIAS.....	3
CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE	4
INTEGRACIÓN CURRICULAR.....	4
APROBACIÓN DEL COMITÉ CALIFICADOR.....	5
DEDICATORIA.....	6
AGRADECIMIENTO.....	7
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	8
ÍNDICE DE TABLAS.....	13
ÍNDICE DE FIGURAS	14
RESUMEN.....	15
ABSTRACT	16
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.....	17
1.1 Planteamiento del problema	17
Contexto.....	17
1.2 Objetivos.....	19
1.2.1 Objetivo General	19

1.2.2 Objetivos Específicos.....	19
1.3 Justificación	19
1.4 Alcance	20
CAPÍTULO II: MARCO REFERENCIAL	21
2.1 Antecedentes.....	21
2.1 Fundamentos teóricos.....	23
2.2.1 pH del agua	23
2.2.2 Turbidez del agua.....	24
2.2.3 Tipos de sistemas de filtración de agua	25
2.2.4 Tipos de purificación de agua	27
2.2.5 Ozonificación.....	28
2.2.6 Métodos de generación de ozono.....	28
2.2.7 Dosificación de ozono para purificar agua	30
2.2.8 Hidroponía	31
2.2.9 Aplicaciones de la ozonificación en el tratamiento de aguas	31
2.2.10 Sistema Venturi.....	32
2.2.11 Electrónica y automatización.....	34

2.2.12 Normativas sobre generación y uso del ozono	34
CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO.....	36
3.1 Modelo de investigación.....	36
3.1.1 Metodología de desarrollo.....	36
3.2 Diseño de investigación.....	37
CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN	40
4.1 Descripción general.....	40
4.2 Especificaciones del sistema a diseñar.....	41
4.3 Solución propuesta para el sistema de ozonificación.....	43
4.4 Selección de componentes	43
4.4.1 Generador de ozono	43
4.4.2 Bomba de aire	46
4.4.3 Ventilador	47
4.4.4 Fuente de alimentación 12V	49
4.4.5 Válvula Venturi.....	49
4.4.6 Bomba sumergible	51
4.4.7 Determinación del volumen y tiempo de contacto óptimo para la ozonificación...	53
4.4.8 Diseño de programa de control.....	55

4.4.9 Relé	58
4.4.10 Sensor de temperatura y humedad	59
4.4.11 Pantalla LCD.....	60
4.4.12 Regulador DC-DC: módulo LM2596 (HW-411)	62
4.4.13 Filtro de alimentación – condensadores y supresión de transientes	63
4.5 Construcción y ensamblaje	65
4.5.1 Carcasa electrónica	66
4.6 Implementación del código en Arduino.....	67
4.7 Pruebas de funcionamiento	68
4.7.1 Prueba de control	68
4.7.2 Prueba de componentes inductivos.....	68
4.8 Pruebas experimentales del agua tratada	69
4.8.1 Prueba del sistema en 20 litros de agua de acequia con azul de metileno	69
4.8.2 Selección de parámetros de análisis.....	70
4.8.3 Prueba en 20 litros de agua de acequia para análisis de coliformes	71
4.8.4 Prueba de validación con agua residual (PTAR-Ibarra)	73
4.8.5 Resultados del análisis del recuento de coliformes totales del agua tratada	74

En la Tabla 19 se presenta los valores correspondientes a la carga inicial de coliformes totales del agua residual y el resultado obtenido después del tratamiento con ozono.....	74
La comparación entre el valor inicial de 116×10^3 UFC/100 ml y el resultado final de 5 UFC/100 ml (ver Anexo H), evidencia una reducción significativa de la carga microbiológica. A partir de estos valores, se estimó una eficiencia de remoción del 99.995%, lo que demuestra la alta capacidad de desinfección del sistema bajo condiciones de elevada carga microbiológica.....	75
Estos resultados permiten validar el funcionamiento del sistema de ozonificación como una alternativa efectiva para la reducción de microorganismos en el tratamiento de agua, destacando su potencial aplicación en sistemas hidropónicos donde se requiere garantizar condiciones sanitarias adecuadas del recurso hídrico.....	75
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	76
5.1 CONCLUSIONES:	76
5.2 RECOMENDACIONES:.....	77
REFERENCIAS	78
ANEXOS.....	82

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de los sistemas de filtración de agua.	26
Tabla 2. Elementos del sistema de ozonificación.....	41
Tabla 3. Requisitos para el funcionamiento.	42
Tabla 4. Tabla comparativa de generadores de ozono.	45
Tabla 5. Características generador de ozono.	46
Tabla 6. Características de la bomba de aire.	47
Tabla 7. Características del ventilador.	48
Tabla 8. Características de la fuente de alimentación 12V.	49
Tabla 9. Características de la bomba sumergible.	53
Tabla 10. Resultados comparativos CT.....	54
Tabla 11. Comparación de microcontroladores evaluados.....	57
Tabla 12. Características del controlador Arduino UNO.	58
Tabla 13. Características del relé electromecánico.	59
Tabla 14. Características Del sensor DHT11.	60
Tabla 15. Características de la pantalla LCD.	61
Tabla 16. Características del regulador DC-DC.....	63
Tabla 17. Componentes del filtro de alimentación.....	65
Tabla 18. Análisis del agua	72
Tabla 19 Análisis recuento de coliformes.	75

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1 Fotografía acequia sector de Imbaya	23
Fig. 2 Sistema de ozonificación planteado.....	40
Fig. 3 Generador de ozono.....	46
Fig. 4 Ventilador axial.	48
Fig. 5 Válvula Venturi	50
Fig. 6 Bomba de agua sumergible.....	53
Fig. 7 Arduino UNO.	57
Fig. 8 Módulos relé.	59
Fig. 9 Sensor de humedad y temperatura DHT11.....	59
Fig. 10 Caja para pantalla LCD.....	61
Fig. 11 Regulador DC-DC.	62
Fig. 12 Caja aislada para filtro de alimentación.....	64
Fig. 13 Instalación de filtro de alimentación.....	64
Fig. 14 Ensamblaje general del sistema.	66
Fig. 15 CAD de carcasa electrónica.....	66
Fig. 16 Montaje de componentes en carcasa.....	67
Fig. 17 Visualización de datos en pantalla LCD.....	68
Fig. 18 Prueba de aislamiento y puesta a tierra.....	69
Fig. 19 Imagen del tratamiento en 20 litros de agua con azul de metileno.....	70
Fig. 20 Proceso de filtración para estudio de coliformes.	72
Fig. 21 Membrana con partículas microbiológicas.....	73
Fig. 22 Agua residual con azul de metileno.....	74

RESUMEN

La presente investigación aborda el diseño, construcción e implementación de un sistema de ozonificación para el tratamiento de aguas de acequias destinadas a sistemas hidropónicos. Dado que la hidroponía depende directamente de la calidad del agua como medio de cultivo, el uso de fuentes hídricas superficiales sin tratamiento representa un riesgo significativo debido a la presencia de contaminantes microbiológicos y materia orgánica. En este contexto, la ozonificación se plantea como una alternativa eficiente y ambientalmente sostenible frente a métodos convencionales de desinfección.

El estudio se desarrolló bajo un enfoque de investigación aplicada, con apoyo de revisión bibliográfica, diseño experimental y validación en campo. Se empleó el modelo en V como metodología de desarrollo, lo que permitió estructurar de forma ordenada el diseño, la selección de componentes, la construcción del prototipo y la verificación de su funcionamiento. El sistema diseñado integra un generador de ozono con una capacidad de producción de 3 g/h, una bomba sumergible, una válvula Venturi para la inyección del gas y un sistema de control automatizado basado en Arduino UNO, encargado de gestionar los tiempos de operación y la visualización de variables mediante una pantalla LCD.

Las pruebas experimentales realizadas en muestras de agua de acequia evidenciaron que el sistema es capaz de tratar aguas con condiciones microbiológicas compatibles con aplicaciones hidropónicas, confirmando la viabilidad del proceso de ozonificación bajo los parámetros establecidos. En conjunto, los resultados demuestran que el sistema propuesto constituye una solución técnica funcional, de bajo costo y escalable, que contribuye a mejorar la calidad del agua utilizada en cultivos hidropónicos y promueve el uso de tecnologías limpias en el sector agrícola.

Palabras clave: hidroponía, ozonificación, generador de ozono, sistema automatizado.

ABSTRACT

This research addresses the design, construction, and implementation of an ozonation system for the treatment of irrigation ditch water intended for hydroponic systems. Since hydroponics directly depends on water quality as a cultivation medium, the use of untreated surface water sources represents a significant risk due to the presence of microbiological contaminants and organic matter. In this context, ozonation is proposed as an efficient and environmentally sustainable alternative to conventional disinfection methods.

The study was developed under an applied research approach, supported by literature review, experimental design, and field validation. The V-model was employed as the development methodology, which allowed for a structured organization of the design, component selection, prototype construction, and operational verification. The designed system integrates an ozone generator with a production capacity of 3 g/h, a submersible pump, a Venturi valve for gas injection, and an automated control system based on Arduino UNO, responsible for managing operation times and displaying variables via an LCD screen.

Experimental tests conducted on irrigation ditch water samples showed that the system is capable of treating water with microbiological conditions compatible with hydroponic applications, confirming the feasibility of the ozonation process under the established parameters. Overall, the results demonstrate that the proposed system constitutes a functional, low-cost, and scalable technical solution that contributes to improving the quality of water used in hydroponic crops and promotes the use of clean technologies in the agricultural sector.

Keywords: hydroponics, ozonation, ozone generator, automated system.

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento del problema

La agricultura en Ecuador es un sector fundamental para la economía del país, que proporciona empleo, alimentos y contribuye a la seguridad alimentaria tanto a nivel nacional como internacional. Sin embargo, el sector agrícola, enfrenta desafíos que requieren una gestión cuidadosa y políticas efectivas para garantizar su desarrollo sostenible y su contribución al bienestar de la población.

En Ecuador, la agricultura hidropónica ha ido ganando popularidad debido a su eficiencia en el uso de recursos y su capacidad para producir cultivos de alta calidad en espacios reducidos, donde es común usar el agua de vertientes naturales y canales. No obstante, uno de los conflictos principales que enfrentan los agricultores hidropónicos es la calidad del agua utilizada en sus sistemas. Las acequias, fuentes comunes de agua para estos sistemas, pueden contener contaminantes como bacterias, virus, materia orgánica y metales pesados, que pueden afectar la salud de las plantas y comprometer la calidad y cantidad de los cultivos hidropónicos. Aunque existen métodos de tratamiento convencionales, como la cloración y la filtración, estos pueden ser insuficientes para eliminar ciertos contaminantes persistentes y no deseados, lo que podría afectar los cultivos y la seguridad al consumidor.

Con base en lo expuesto, el presente trabajo de integración curricular propone el desarrollo de un sistema de tratamiento de agua de acequias con ozono para sistemas hidropónicos enfocado en el análisis de calidad del agua y la productividad del sistema en un cultivo hidropónico.

Contexto

Partiendo del concepto de hidroponía, una técnica de cultivo que no hace uso del suelo, sino a través del agua, donde lleva todos los nutrientes que necesita la planta para su desarrollo, genera varias ventajas para la agricultura, como son la reducción de espacios requeridos para el cultivo,

optimización del uso del agua, producción en zonas infértiles, entre otros. Al igual que los beneficios, existen limitaciones a considerar como el agua de buena calidad.

Para el Ministerio de Ambiente y Agua “La hidroponía es una técnica que permite el desarrollo de cultivos a partir del uso de agua y soluciones nutritivas permanentes. Con esta tecnología se puede cultivar una amplia variedad de productos en áreas limitadas, optimizando el uso del agua, la cual circula constantemente a través de un sistema de bombeo donde se regula la fertilización según datos de un dispositivo que mide pH, conductividad eléctrica y humedad. Esta medida de adaptación al cambio climático responde a la necesidad de optimizar el uso del agua y la protección del suelo”. [1]

La hidroponía representa una herramienta invaluable en la búsqueda de prácticas agrícolas sostenibles y resilientes al cambio climático. Su capacidad para optimizar el uso del agua, su flexibilidad para adaptarse a diferentes entornos y su eficiencia en la producción de alimentos la convierten en una opción prometedora para enfrentar los desafíos en la agricultura.

El ozono fue descubierto por Van Mauten en 1785 y esto sucedió en 1857 cuando Werner Von Siemens diseñó un generador de ozono. En 1893 se utilizó por primera vez para desinfectar agua en los Países Bajos y en 1906 en la depuradora de Niza. Durante los últimos 25 años, el mayor progreso y desarrollo en este campo se ha traducido en mejoras significativas en los equipos de producción y una mayor desinfección del agua. [2]

Se muestra cómo el descubrimiento inicial del ozono ha llevado a una serie de avances tanto en la comprensión científica como en la aplicación práctica, especialmente en el campo de la desinfección del agua, y cómo estos avances continúan hasta el día de hoy, con mejoras constantes en la tecnología y la eficacia de los equipos de producción. En el apartado “Tratamientos de agua con ozono” explica que “El ozono es un potente oxidante que se ha utilizado durante décadas en

muchos campos diferentes, en el agua y el aire. Las propiedades de este desinfectante lo hacen ideal para la depuración de agua y todo tipo de recogida de aguas residuales” [3].

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Desarrollar un sistema de tratamiento de agua de acequias con ozono para uso en sistemas hidropónicos.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Definir los parámetros para el proceso de ozonificación del agua de las acequias.
- Diseñar el prototipo.
- Construir el prototipo.
- Validar la funcionalidad del sistema de tratamiento de agua de acequias con ozono.

1.3 Justificación

Dado el crecimiento de la hidroponía en Ecuador, un sistema de tratamiento de agua de acequias efectivo y sostenible contribuye considerablemente al desarrollo agrícola y económico en el país. El diseño de un sistema de tratamiento de agua de acequias con ozono para sistemas hidropónicos es crucial para garantizar la calidad de agua, maximizar la rentabilidad y productividad en cultivos hidropónicos. El agua de las acequias contiene una variedad de contaminantes que afectan la salud de las plantas y su entorno. El usar ozono como principal agente de tratamiento de agua, ofrece una mayor absorción de nutrientes, eficaz en la eliminación de contaminantes microbiológicos, patógenos, virus, entre otros. El ozono es altamente efectivo para controlar el crecimiento de bacterias, reduciendo el riesgo de enfermedades y la necesidad de usar otros productos químicos como el cloro, el ozono es capaz de descomponerse de manera instantánea en oxígeno, reduciendo el impacto con el medio ambiente, lo que ayuda a cumplir con normativas ambientales.

1.4 Alcance

El presente proyecto se basa en la investigación científico-técnica de la funcionalidad del ozono para el tratamiento de agua en sistemas hidropónicos. Para ello, es importante identificar la acequia, recopilar datos y condiciones sobre la calidad del agua en el sector de Imbaya. Posteriormente se lleva a cabo el diseño y construcción de un prototipo, tomando en cuenta los parámetros y requisitos necesarios para un cultivo hidropónico.

Finalmente, se realizan pruebas de funcionalidad y se analizan los resultados del sistema de tratamiento de agua de la acequia con ozono, al igual que la medición de condiciones del agua que alimenta al sistema.

CAPÍTULO II: MARCO REFERENCIAL

2.1 Antecedentes

El uso del ozono en el tratamiento de agua se remonta a finales del siglo XIX. El primer sistema de ozonificación para desinfección del agua potable fue instalado en Ousbaden, Países Bajos, en 1893, marcando un hito en la aplicación de este gas como agente desinfectante. Posteriormente, en 1906, la planta de tratamiento de agua de Niza, Francia, adoptó la ozonificación de forma permanente, consolidando su uso en sistemas de abastecimiento de agua a gran escala [4].

Desde entonces, la tecnología de generación y aplicación del ozono ha experimentado un desarrollo técnico y tecnológico significativo. En las últimas décadas, la investigación científica se ha enfocado en mejorar la eficiencia de generación, optimizar los sistemas de transferencia gas-líquido y reducir los costos operativos asociados al proceso [5]. Actualmente, el ozono es reconocido como uno de los agentes oxidantes más potentes utilizados en el tratamiento de aguas. El ozono se genera a partir del oxígeno molecular (O_2) mediante procesos de descarga eléctrica, comúnmente conocidos como descarga por corona. En este proceso, una alta tensión eléctrica rompe la molécula de oxígeno y permite la formación del ozono (O_3). Este gas es posteriormente inyectado en el agua mediante sistemas que aseguran la dispersión homogénea, maximizando el contacto entre el ozono y los contaminantes presentes [6].

En el tratamiento del agua potable, la ozonificación se emplea principalmente para la desinfección y la eliminación de compuestos orgánicos e inorgánicos. Es especialmente eficaz en la inactivación de microorganismos patógenos resistentes a otros desinfectantes tradicionales, como *Giardia lamblia* y *Cryptosporidium parvum*. Además, el ozono contribuye a la mejora de las características organolépticas del agua, eliminando olores, sabores y coloración indeseada causados por compuestos orgánicos naturales [7].

Asimismo, la ozonificación ha sido ampliamente utilizada en el tratamiento de aguas residuales

industriales y municipales, donde aplica para la reducción de la demanda química de oxígeno (DQO), la demanda biológica de oxígeno (DBO) y la eliminación de compuestos orgánicos recalcitrantes. En este contexto, el ozono actúa como un oxidante selectivo capaz de transformar contaminantes complejos en sustancias más simples y menos tóxicas [8].

En el caso específico de las aguas de acequias, estas suelen presentar una carga significativa de materia orgánica, sólidos suspendidos y microorganismos, lo que limita su uso directo en sistemas hidropónicos. Por esta razón, el presente estudio se enfoca en la evaluación de parámetros microbiológicos, como coliformes totales, que constituyen indicadores críticos de contaminación. El análisis de estos parámetros permite determinar de manera directa la eficiencia del proceso de ozonificación y verificar la aptitud del agua tratada para uso agrícola.

Si bien la ozonificación presenta ventajas importantes frente a otros métodos de desinfección, como la cloración, también implica ciertas consideraciones técnicas. Entre sus principales beneficios se encuentran su elevada capacidad de inactivación microbiológica, la ausencia de subproductos químicos persistentes y su descomposición rápida en oxígeno. No obstante, en aguas con presencia de bromo puede producirse la formación de bromatos, compuestos potencialmente tóxicos que requieren un control adecuado del proceso. Además, debido a que el ozono es un gas altamente oxidante, su generación y aplicación deben realizarse en sistemas diseñados para garantizar la seguridad operativa y evitar fugas al ambiente [9].

En la **Fig.1** se muestra una fotografía del sector de Imbaya, donde se localiza la acequia utilizada como fuente de agua para el desarrollo de la presente investigación.



Fig. 1 Fotografía acequia sector de Imbaya

2.1 Fundamentos teóricos

Los fundamentos teóricos permiten comprender los principios científicos y técnicos que sustentan el diseño y funcionamiento del sistema de ozonificación propuesto, así como su aplicación en el tratamiento de aguas de acequias destinadas a sistemas hidropónicos.

2.2.1 pH del agua

El pH constituye uno de los parámetros más importantes en la evaluación de la calidad del agua, ya que indica su carácter ácido o básico y afecta directamente tanto la disponibilidad de nutrientes para las plantas como la eficiencia de los procesos de tratamiento. El pH se define como el logaritmo negativo de la concentración de iones hidrógeno presentes en una solución acuosa.

En sistemas hidropónicos, el pH del agua juega un papel fundamental en la absorción de nutrientes por parte de las plantas. Diversos estudios indican que el rango óptimo de pH para cultivos hidropónicos se encuentra generalmente entre 5.5 y 6.5, ya que en este intervalo los nutrientes esenciales como nitrógeno, fósforo, potasio, calcio y magnesio presentan una mayor disponibilidad y son absorbidos con mayor eficiencia por el sistema radicular [10]. Cabe aclarar que este rango corresponde específicamente a aplicaciones hidropónicas y no necesariamente a los valores recomendados para agua potable.

En el caso de las aguas de acequia, el pH suele encontrarse cercano a la neutralidad (cercano a 7),

dependiendo de la composición geológica del suelo y de la presencia de materia orgánica disuelta. Estas condiciones permiten influir en la eficiencia del proceso de ozonificación, ya que la estabilidad del ozono en solución acuosa es mayor en medios ligeramente ácidos y disminuye a medida que el pH se incrementa. A valores de pH elevados, el ozono tiende a descomponerse más rápidamente, generando radicales hidroxilos que, si bien pueden contribuir a la oxidación, reducen la concentración de ozono disponible como desinfectante directo [11].

Por esta razón, el control de pH del agua tratada resulta esencial para optimizar la eficiencia del proceso de ozonificación y garantizar que el agua cumpla con las condiciones adecuadas para su posterior uso en sistemas hidropónicos.

2.2.2 Turbidez del agua

La turbidez es un parámetro físico que describe el grado de pérdida de transparencia del agua, causado por la presencia de partículas suspendidas, coloidales que dispersan y absorben luz incidente. Estas partículas pueden estar constituidas por arcillas, limos, materia orgánica, microorganismos, óxidos metálicos y otros sólidos finos que no sedimentan fácilmente.

Este parámetro es considerado un indicador indirecto de la calidad del agua, ya que niveles elevados de turbidez suelen estar asociados a una mayor carga microbiológica y a la presencia de contaminantes orgánicos e inorgánicos. En el contexto de las aguas de acequias, la turbidez puede variar significativamente debido a factores como la erosión del suelo, el arrastre de sedimentos, la actividad agrícola y las lluvias estacionales [12].

Desde el punto de vista del tratamiento del agua, la turbidez influye directamente en la eficiencia de los procesos de desinfección. La presencia de partículas en suspensión puede proteger a los microorganismos del contacto directo con los agentes desinfectantes, reduciendo su efectividad. En el caso de la ozonificación, una turbidez elevada incrementa la demanda de ozono, dado que una parte del oxidante se consume en la reacción con la materia orgánica y los sólidos suspendidos antes

de actuar sobre los microorganismos patógenos [13].

Por esta razón, en sistemas de tratamiento de agua destinados a aplicaciones hidropónicas, resulta recomendable la implementación de etapas de prefiltración que permitan reducir la turbidez antes del proceso de ozonificación. De esta manera, se optimiza la transferencia de ozono al agua, se mejora la eficiencia de desinfección y se garantiza una mayor estabilidad en calidad del agua tratada.

2.2.3 Tipos de sistemas de filtración de agua

La filtración constituye un proceso físico fundamental en el tratamiento del agua, cuyo objetivo principal es la remoción de sólidos suspendidos, partículas coloidales y parte de la materia orgánica presente en el fluido. Este proceso constituye una etapa previa esencial antes de aplicar métodos de desinfección, puesto que contribuye a mejorar la eficiencia de los tratamientos posteriores [14]. En la siguiente **Tabla 1** se muestra la clasificación de los sistemas de filtración.

Tabla 1. Clasificación de los sistemas de filtración de agua.

Tipo de filtración	Descripción
Mecánica	Utiliza medios físicos como mallas, arenas o cartuchos para retener partículas suspendidas. Se aplican comúnmente como pretratamiento antes de la purificación.
Carbón activado	Absorbe compuestos orgánicos, cloro y algunos metales pesados. Mejora el sabor y olor de agua, pero no elimina microorganismos patógenos.
Cerámica	Mediante poros finos, retiene bacterias y sedimentos. Es adecuada para zonas rurales.
Ultrafiltración y nano filtración	Técnicas de membranas presurizadas que remueven virus, bacterias y macromoléculas sin alterar minerales beneficiosos.
Ósmosis inversa (RO)	Emplea membranas semipermeables para eliminar la mayoría de los contaminantes, incluyendo sales disueltas, metales pesados y microorganismos.

En el contexto del presente proyecto, la filtración previa del agua de acequia resulta indispensable para reducir la turbidez y la carga de sólidos suspendidos, permitiendo una mayor eficiencia del proceso de ozonificación y evitando el consumo innecesario de ozono en la oxidación de partículas no biológicas.

2.2.4 Tipos de purificación de agua

La purificación del agua comprende un conjunto de procesos físicos, químicos y biológicos destinados a eliminar contaminantes disueltos, microorganismos patógenos y sustancias indeseables, con el fin de adecuar el agua para un uso específico. Dependiendo de la aplicación final, los métodos de purificación pueden variar en complejidad y efectividad. En *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery* [15], nombra que existen varios métodos de purificación, entre los más utilizados están:

Cloración: método convencional para desinfección por su bajo costo y alta efectividad contra bacterias y virus. Sin embargo, la cloración produce subproductos como trihalometanos (THM) y ácidos haloacéticos (HAA), que pueden ser potencialmente cancerígenos y alterar el sabor del agua.

Luz ultravioleta (UV): inactiva microorganismos al alterar su ADN, es eficaz como desinfección final, pero no elimina partículas sólidas ni compuesto químicos. Requiere agua con baja turbidez para su correcta aplicación.

Ozono (O₃): considerada una de las técnicas más avanzadas por su poder oxidante, elimina bacterias, virus, hongos y compuestos orgánicos. A diferencia del cloro, el ozono no deja residuos químicos, convirtiéndose en un método ecológico ideal para aplicaciones hidropónicas.

Destilación: proceso físico que evapora el agua y condensa el vapor, separándola de contaminantes disueltos y sólidos. Aunque ofrece una alta pureza, es un proceso energéticamente costoso.

Intercambio iónico: sustituye iones no deseados como el calcio, magnesio o hierro por iones benignos (sodio o hidrógeno). Es común en procesos de ablandamiento de agua y pretratamiento para ósmosis inversa.

No obstante, para garantizar la seguridad del proceso, es necesario considerar que el ozono es un gas tóxico en concentraciones elevadas. Por esta razón, los sistemas de ozonificación deben diseñarse de manera que se limite la exposición personal, manteniendo las concentraciones ambientales dentro

de los límites establecidos por organismos internacionales de seguridad ocupacional [16].

2.2.5 Ozonificación

La ozonificación, es un proceso que utiliza ozono (O_3) como agente oxidante, ha demostrado ser efectivo en la desinfección y purificación de aguas en diversas aplicaciones, incluyendo el tratamiento de aguas potables y residuales [17]. El ozono, conocido por su fuerte capacidad oxidativa, puede descomponer y eliminar contaminantes orgánicos, inactivar patógenos y reducir compuestos nocivos sin dejar residuos químicos [18].

Su uso en el tratamiento de aguas de acequias podría ofrecer una solución eficaz para proporcionar agua de alta calidad a los sistemas hidropónicos, mejorando así el rendimiento de los cultivos.

2.2.5.1 Propiedades del ozono

Entre las principales propiedades del ozono se destacan su alta solubilidad en agua, su capacidad de desinfección y su rápida descomposición en oxígeno. Estas características hacen que el ozono sea especialmente eficaz en la inactivación de bacterias, virus, hongos y protozoarios, incluso aquellos resistentes a desinfectantes convencionales. Además, el ozono es capaz de oxidar compuestos responsables de olores, sabores y coloración, mejorando significativamente las características físicas del agua tratada [19].

No obstante, la estabilidad del ozono en solución acuosa depende de diversos factores, como el pH, la temperatura y la presencia de materia orgánica. A pH elevados y temperaturas altas, el ozono se descompone con mayor rapidez, lo que puede reducir su eficiencia como desinfectante directo. Este comportamiento debe ser considerado en el diseño y operación de sistemas de ozonificación [20].

2.2.6 Métodos de generación de ozono

El ozono no se encuentra de forma estable en la naturaleza en concentraciones aprovechables, por lo que debe ser generado *in situ* mediante procesos físicos. El método más utilizado en aplicaciones

industriales y de tratamiento de agua es la descarga corona, que consiste en aplicar una alta tensión eléctrica a una corriente de aire u oxígeno, provocando la disociación de las moléculas de oxígeno y la posterior formación de ozono [21].

Los generadores de ozono por descarga corona están compuestos principalmente por una fuente de alta tensión, electrodos y un dieléctrico que permite controlar la descarga eléctrica. La eficiencia de generación depende de variables como el tipo de gas de alimentación, la humedad, la temperatura y la frecuencia de la descarga. El uso de oxígeno seco como gas de entrada incrementa significativamente la producción de ozono y mejora la estabilidad del sistema [22].

Existen otros métodos de generación de ozono, como la radiación ultravioleta y la electrólisis, aunque su uso es menos común debido a su menor eficiencia y a las limitaciones en la concentración de ozono que pueden alcanzar. Por esta razón, la descarga corona continúa siendo la tecnología predominante en sistemas de tratamiento de agua a mediana y gran escala.

2.2.6.1 Efectos del ozono en el agua

Según Von Gunten [23], el ozono actúa como un oxidante selectivo con múltiples beneficios para el tratamiento de agua:

Desinfección: El ozono destruye bacterias, virus, hongos y esporas por oxidación directa de sus membranas celulares. Es eficaz contra microorganismos resistentes al cloro como *Giardia lamblia* y *Cryptosporidium parvum*.

Oxidación de contaminantes: Reacciona con compuestos orgánicos (pesticidas, fenoles, detergentes) y metales pesados, transformándolos en sustancias menos tóxicas o en precipitados filtrables.

Eliminación de color y olor: Rompe enlaces de compuestos aromáticos responsables de olores y

colores no deseados, mejorando las características organolépticas del agua.

Precipitación de metales: Oxida hierro, manganeso y arsénico, facilitando su eliminación.

Aumento de oxígeno disuelto: Tras su descomposición, el ozono se convierte en oxígeno molecular, aumentando la disponibilidad de O_2 , lo cual favorece el metabolismo radicular en sistemas hidropónicos.

Compatibilidad ambiental: Su descomposición espontánea en oxígeno hace que el proceso sea ecológico, sin residuos secundarios.

Desde el punto de vista de la seguridad, es importante considerar que el ozono es tóxico cuando se inhala en concentraciones elevadas. Las normativas internacionales establecen límites de exposición ocupacional que no deben ser superados durante la operación de los sistemas de ozonificación. Por ello, el diseño de estos sistemas debe incluir medidas de ventilación, control y sellado que garanticen una operación segura para el personal [24].

2.2.7 Dosificación de ozono para purificar agua

El proceso de ozonificación depende de una dosificación adecuada, expresada por el parámetro CT (Concentración $\times$ Tiempo), que relaciona la concentración de ozono disuelto (mg/L) con el tiempo de contacto (min), para ello es importante considerar los siguientes valores de referencia:

- Agua potable: $CT = 0.5\text{--}2 \text{ mg}\cdot\text{min/L}$.
- Aguas superficiales o de acequias: $CT = 5\text{--}10 \text{ mg}\cdot\text{min/L}$.
- Eliminación de E. coli: concentración mínima de 0.1 mg/L durante 10 minutos.

Factores que influyen:

- Calidad inicial del agua (turbidez, coliformes).

- Temperatura (mayor temperatura, menor solubilidad del ozono).
- pH (pH ácido mejora la estabilidad del ozono).

El diseño de los sistemas de ozonificación debe garantizar un tiempo de contacto suficiente (10–20 min) y una disolución homogénea mediante difusores de microburbujas o sistemas Venturi. Un exceso de ozono puede generar reacciones indeseadas o aumentar el costo operativo.

Por esta razón, se recomienda un control automatizado de la dosificación y monitoreo en tiempo real de los niveles de O₃ disuelto. [18].

2.2.8 Hidroponía

La hidroponía es una técnica de cultivo sin suelo donde las plantas crecen en una solución nutritiva [19]. Existen varios tipos de sistemas hidropónicos, incluyendo la Técnica de Película de Nutrientes (NFT), la Cultura en Agua Profunda (DWC) y la Aeroponía [20]. En la NFT, una película delgada de solución nutritiva fluye continuamente sobre las raíces de las plantas. En la DWC, las raíces están sumergidas en una solución rica en nutrientes y oxigenada. Para que estos sistemas funcionen de manera eficiente, es fundamental utilizar un tipo de agua adecuada, preferiblemente con bajo contenido de sales disueltas (conductividad eléctrica baja), sin contaminantes químicos ni biológicos, y con un pH controlado, generalmente entre 5.5 y 6.5 [21]. El agua ideal para hidroponía debe ser limpia, libre de metales pesados, microorganismos patógenos y compuestos orgánicos no deseados, ya que cualquier impureza puede interferir con la absorción de nutrientes y afectar el crecimiento de las plantas [22]. Por ello, en muchos casos se recurre al uso de agua purificada, filtrada o tratada, siendo común el uso de sistemas de ósmosis inversa o desinfección mediante ozono para garantizar su calidad [23].

2.2.9 Aplicaciones de la ozonificación en el tratamiento de aguas

La ozonificación se ha utilizado con éxito en el tratamiento de aguas potables, industriales y

residuales [24]. En el contexto de la hidroponía, su capacidad para eliminar patógenos y mejorar la calidad del agua la hace especialmente útil [25]. Estudios han demostrado que la ozonificación puede reducir significativamente la carga microbiana y los niveles de contaminantes químicos en el agua utilizada para cultivos hidropónicos [26].

La ozonificación puede eliminar una amplia gama de contaminantes presentes en las aguas de acequias, incluyendo bacterias, virus, algas, y compuestos orgánicos e inorgánicos [27]. Al eliminar estos contaminantes, se reduce el riesgo de enfermedades en las plantas y se mejora la disponibilidad de nutrientes.

2.2.10 Sistema Venturi

La válvula Venturi es un dispositivo hidráulico utilizado para generar una diferencia de presión a partir de una variación controlada del área de flujo de un fluido. Este principio permite la succión de un fluido secundario, como un gas, sin necesidad de equipos mecánicos adicionales, lo que la convierte en una solución eficiente y ampliamente utilizada en sistemas de inyección de productos químicos y gases en aplicaciones industriales y agrícolas.

2.2.10.1 Principio de funcionamiento de la válvula Venturi

El funcionamiento de la válvula Venturi se basa en el principio de Bernoulli, el cual establece que, para un fluido en movimiento, el aumento de la velocidad se traduce en una disminución de la presión estática. La válvula está compuesta por tres secciones principales: una zona de entrada, una sección convergente, una garganta y una sección divergente.

Cuando el agua circula a través de la sección convergente, su velocidad aumenta progresivamente hasta alcanzar un valor máximo en la garganta. En este punto, la presión disminuye de forma significativa, generando una zona de presión negativa que permite la succión del gas a través de una entrada lateral. Posteriormente, en la sección divergente, el fluido reduce su velocidad y recupera parcialmente la presión, asegurando la continuidad del flujo [28].

Este fenómeno permite la inyección de ozono de manera controlada, aprovechando únicamente la energía hidráulica del sistema, sin requerir compresores o elementos mecánicos adicionales.

2.2.10.2 Aplicación de la válvula Venturi en la inyección de ozono

En los sistemas de ozonificación, la válvula Venturi se utiliza como un inyector gas-líquido que facilita la disolución del ozono en el agua. El gas generado por el ozonizador es conducido hacia la entrada de succión de la válvula, donde es arrastrado por el flujo de agua y fragmentado en microburbujas, incrementando el área de contacto entre ambas fases.

Este mecanismo mejora significativamente la transferencia de masa del ozono al agua, aumentando la eficiencia del proceso de desinfección. Además, la inyección mediante Venturi permite una recirculación continua del agua tratada, favoreciendo una distribución homogénea del ozono en todo el volumen del tanque [29].

En el contexto del presente proyecto, la implementación de una válvula Venturi permitió optimizar el sistema de ozonificación, reemplazando el método de burbujeo convencional, el cual presentaba limitaciones en cuanto a la eficiencia de transferencia de ozono y el tiempo de tratamiento requerido.

2.2.10.3 Ventajas de la válvula Venturi

El uso de la válvula Venturi para la inyección de ozono presenta diversas ventajas frente al método de burbujeo tradicional. En primer lugar, la válvula Venturi permite una mayor eficiencia de transferencia de ozono, debido a la generación de microburbujas y a la mayor turbulencia inducida en el flujo, lo que incrementa el contacto gas-líquido.

Otra ventaja significativa es la reducción del tiempo de tratamiento necesario para alcanzar niveles adecuados de desinfección, lo que se traduce en un menor consumo energético del sistema. Asimismo, al no requerir difusores porosos, la válvula Venturi reduce los problemas de obstrucción y mantenimiento asociados al burbujeo convencional [30].

Desde el punto de vista operativo, la válvula Venturi ofrece una mayor estabilidad del proceso y un

control más preciso de la dosificación de ozono. Estas características resultan especialmente relevantes en aplicaciones agrícolas e hidropónicas, donde la calidad del agua influye directamente en el desarrollo de los cultivos. En consecuencia, la selección de la válvula Venturi como método de inyección de ozono se justifica plenamente desde una perspectiva técnica, económica y operativa.

2.2.11 Electrónica y automatización

La automatización permite controlar de manera precisa las variables del proceso de ozonificación, optimizando su eficiencia y seguridad. Los principales componentes del sistema electrónico son:

Microcontrolador: Dispositivo central encargado de gestionar la operación de bombas, generador de ozono, sensores y pantalla de visualización.

Sensores: Monitorean diferentes parámetros a considerar en el sistema de ozonificación.

Actuadores: Incluyen relés, válvulas y bombas, controlados según la lógica programada.

Interfaz de usuario: La pantalla LCD permite visualizar parámetros en tiempo real y facilitar la operación del sistema.

Control de potencia: Se garantiza la estabilidad eléctrica de los módulos, evitando interferencias electromagnéticas del generador de ozono.

Gracias a la automatización, el sistema permite:

- Control del proceso sin intervención constante del operario.
- Posibilidad de escalabilidad para sistemas mayores o integración IoT en el futuro.

2.2.12 Normativas sobre generación y uso del ozono

El uso del ozono en el tratamiento de agua está regulado por diversas normativas internacionales que garantizan la seguridad, eficacia y sostenibilidad de su aplicación. La norma **UNE-EN 1278:2015** establece los requisitos de pureza, producción y control del ozono utilizado en el tratamiento de agua destinada al consumo humano, especificando límites de concentración y condiciones de almacenamiento para evitar riesgos de exposición. Asimismo, la **Organización**

Mundial de la Salud (OMS), en sus *Directrices para la calidad del agua potable (2022)*, reconoce al ozono como un agente desinfectante eficaz y ambientalmente seguro, siempre que se controle adecuadamente su dosis residual [31]. En el ámbito ambiental, la **ISO 14001:2015** promueve la implementación de tecnologías limpias como la ozonificación para reducir el uso de productos químicos y minimizar impactos negativos en los ecosistemas acuáticos. Estas normativas proporcionan un marco de referencia técnico y legal para el diseño de sistemas de ozonificación, asegurando que su uso en la purificación de aguas de acequias se realice bajo estándares internacionales de seguridad y sostenibilidad [32].

CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO

Este capítulo describe las herramientas utilizadas, el procedimiento y la forma en que se ejecuta el trabajo para alcanzar los objetivos propuestos.

3.1 Modelo de investigación

El desarrollo de un sistema de ozonificación se enmarca en una investigación aplicada, ya que se orienta a utilizar conocimientos técnicos con el fin de ofrecer soluciones concretas a un problema determinado [33]. Además, se clasifica como una investigación documental, debido a la necesidad de recolectar información proveniente de diversas fuentes académicas sobre temas como los cultivos hidropónicos y las propiedades del ozono [34].

De igual manera, el presente estudio adopta un enfoque de investigación de campo, debido a que requiere la visita al lugar de estudio para evaluar las condiciones iniciales del agua de acequia y recopilar datos relevantes directamente de la fuente [35].

Adicionalmente, la investigación es de tipo experimental, dado que se diseñan y ejecutan pruebas controladas sobre el sistema de ozonificación propuesto, con el propósito de analizar su comportamiento y desempeño bajo condiciones previamente definidas [36].

Finalmente, el estudio corresponde a una investigación de enfoque cuantitativa, puesto que los datos obtenidos durante las pruebas se registran, procesan y analizan mediante valores numéricos, permitiendo evaluar de forma objetiva la eficiencia del sistema en el tratamiento del agua [37].

3.1.1 Metodología de desarrollo

El método de investigación seleccionado corresponde al modelo en V, ampliamente utilizado en proyectos de ingeniería debido a su estructura ordenada y su énfasis en la verificación y validación en cada etapa del desarrollo.

Este modelo permite iniciar el proceso a partir de la definición de los requerimientos del sistema de ozonificación, continuar con el diseño conceptual y detallado, así como con la selección de los componentes mecánicos, eléctricos y electrónicos necesarios para la construcción del prototipo. Posteriormente, se realiza la integración de los subsistemas hasta obtener un sistema funcional. Finalmente, el modelo en V facilita la evaluación del desempeño del prototipo mediante la ejecución de pruebas planificadas, en las cuales los resultados obtenidos son comparados con los requerimientos establecidos al inicio del proyecto, asegurando el cumplimiento de los objetivos propuestos. [33].

3.2 Diseño de investigación

En este apartado se describen las fases del estudio y las actividades necesarias para su correcta ejecución. La secuencia metodológica propuesta se organiza en función de los objetivos específicos planteados en la investigación, de manera que cada fase contribuya de forma directa al diseño, construcción, automatización y evaluación del sistema de ozonificación aplicado al tratamiento de agua de acequia.

Esta organización metodológica permite asegurar una progresión lógica del proyecto, facilitando el control de cada etapa y garantizando la coherencia entre los objetivos, las actividades desarrolladas y los resultados obtenidos.

Fase 1: Adquisición de información

Actividad 1: Realizar una revisión bibliográfica detallada sobre la ozonificación, enfocándose en su funcionamiento, ventajas y aplicaciones en el tratamiento de aguas.

Actividad 2: Investigar los diferentes tipos de generadores de ozono disponibles en el mercado, con el fin de analizar sus características técnicas, capacidad de producción, requerimientos eléctricos y condiciones de operación.

Actividad 3: Analizar los parámetros técnicos que influyen en la efectividad del ozono, como su concentración, tiempo de contacto y eficiencia de transferencia al agua.

Fase 2: Diseño del sistema de ozonificación

Actividad 1: Definir los parámetros de diseño tomando como base los resultados de la revisión bibliográfica y técnica sobre ozonificación aplicada al tratamiento de aguas.

Actividad 2: Identificar las funciones principales y los componentes que conformarán el sistema generador de ozono.

Actividad 3: Estudiar diferentes materiales disponibles en el mercado que cumplan con los requisitos técnicos de resistencia al ozono y adecuación al entorno hidropónico.

Actividad 4: Seleccionar los materiales más adecuados en función de su compatibilidad, durabilidad, eficiencia y costo.

Actividad 5: Diseñar el sistema de ozonificación considerando la capacidad de tratamiento, tiempo de contacto, volumen de agua y condiciones ambientales del entorno agrícola.

Actividad 6: Analizar las distintas tecnologías disponibles para la generación y aplicación de ozono, evaluando su factibilidad técnica y económica.

Actividad 7: Calcular los parámetros operativos del sistema de ozonificación, tales como el tiempo de contacto, el caudal de tratamiento y la concentración de ozono, con el propósito de asegurar una desinfección eficiente del agua de acequia.

Actividad 8: Definir las condiciones óptimas de operación del prototipo, incluyendo los rangos de caudal, tiempos de operación y criterios de seguridad, considerando tanto las restricciones del entorno de uso como la estabilidad del proceso de ozonificación.

Fase 3: Implementación del prototipo funcional

Actividad 1: Construir el prototipo integrando los componentes eléctricos, electrónicos y mecánicos según el diseño establecido.

Actividad 2: Realizar pruebas iniciales y ajustar el sistema en caso de detectar errores de funcionamiento o desviaciones del diseño previsto.

Fase 4: Automatización y control del sistema

Actividad 1: Definir los requerimientos de automatización del sistema, considerando variables como tiempo de tratamiento, temperatura y humedad interna del sistema.

Actividad 2: Diseñar el sistema de control utilizando un microcontrolador, integrando sensores, actuadores y módulos de visualización.

Actividad 3: Programar la rutina de operación y realizar pruebas funcionales para verificar su correcto desempeño.

Actividad 4: Ensamblar una carcasa protectora para alojar el sistema de control, asegurando su funcionamiento seguro frente a factores ambientales.

Fase 5: Evaluación del funcionamiento del prototipo

Actividad 1: Realizar pruebas de funcionamiento del sistema completo para validar su eficiencia en la desinfección del agua.

Actividad 2: Analizar los resultados obtenidos a partir de las mediciones de parámetros microbiológicos del agua, específicamente coliformes, antes y después del tratamiento con ozono. Este análisis permite evaluar de manera objetiva la eficiencia de desinfección del sistema y verificar el cumplimiento de los objetivos planteados en la investigación.

Actividad 3: Documentar los resultados mediante gráficos, tablas y observaciones técnicas.

Actividad 4: Comparar los resultados obtenidos en las diferentes etapas del tratamiento y validar el funcionamiento del sistema en condiciones reales de operación.

CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el presente capítulo se muestran los resultados obtenidos durante el diseño, construcción y validación del sistema de ozonificación propuesto. Se describen las pruebas realizadas, la selección de componentes, los cálculos aplicados y el análisis del desempeño del sistema en el tratamiento de agua de acequia, con el fin de evaluar su efectividad y viabilidad para aplicaciones hidropónicas.

4.1 Descripción general

El sistema de ozonificación propuesto para el tratamiento de aguas de acequias destinadas a sistemas hidropónicos fue diseñado con énfasis en la mejora de la calidad del agua y en la eficiencia del proceso de desinfección.

En la **Fig. 2** se muestra la configuración general del sistema, donde se identifican los principales componentes mecánicos, hidráulicos y de control, como el tanque de tratamiento, la bomba sumergible, la válvula Venturi, el generador de ozono y el sistema de automatización.



Fig. 2 Sistema de ozonificación planteado.

En la **Tabla 2** se describen los elementos que conforman el sistema de ozonificación y la función

que cumple cada uno dentro del proceso.

Tabla 2. Elementos del sistema de ozonificación.

Nº	Descripción	Función
1	Generador de ozono	Genera el ozono
2	Válvula Venturi	Inyección del ozono en el agua
3	Tanque	Almacenamiento de agua
4	Bomba sumergible	Recirculación del agua en el sistema
5	Tablero de control	Activación y monitoreo del sistema

4.2 Especificaciones del sistema a diseñar

En este apartado se establecen los requisitos y las características técnicas que debe cumplir el sistema de ozonificación para garantizar su correcto funcionamiento. Estos requerimientos fueron definidos considerando criterios de eficiencia de desinfección, sostenibilidad, compatibilidad de materiales, relación costo-beneficio y posibilidad de escalabilidad del sistema.

Los requerimientos identificados se resumen en la **Tabla 3**, la cual sirve como base para el diseño, selección de componentes y evaluación del desempeño del sistema.

Tabla 3. Requisitos para el funcionamiento.

Requerimientos	Descripción	Prioridad		
		Baja	Media	Alta
Eficacia de desinfección	Eliminación efectiva de microorganismos en el agua tratada			X
Monitorización interna del sistema	Lectura en tiempo real de temperatura y humedad		X	
Sostenibilidad	Reducción del uso de químicos y bajo consumo energético		X	
Compatibilidad material	Uso de materiales resistentes al ozono			X
Costo-beneficio	Relación favorable entre inversión inicial y beneficios obtenidos		X	
Escalabilidad	Posibilidad de adaptar el sistema a diferentes volúmenes de agua		X	

La asignación de prioridades se realizó considerando el impacto de cada requerimiento sobre el desempeño global del sistema de ozonificación. La eficacia de desinfección y la compatibilidad de materiales se establecieron como prioridades altas, debido a su influencia directa en la calidad del agua tratada y en la durabilidad del sistema frente al carácter oxidante del ozono.

Por otro lado, aspectos como la sostenibilidad, la relación costo-beneficio y la monitorización interna del sistema se clasificaron como prioridades medias, puesto que contribuyen al desempeño operativo

y a la viabilidad del proyecto sin comprometer su funcionamiento básico. Esta jerarquización permitió orientar el diseño hacia una solución técnica equilibrada y funcional.

4.3 Solución propuesta para el sistema de ozonificación

La propuesta consiste en desarrollar un sistema de tratamiento que combine la generación de ozono y la mezcla eficiente del gas en el agua mediante una válvula Venturi, y un sistema de bombeo que garantice la recirculación del agua tratada con ozono dentro del tanque a través de una tubería de PVC. Este sistema será gestionado por un módulo de control automatizado, el cual permitirá programar los tiempos en el ciclo de tratamiento, así como monitorear parámetros de temperatura y humedad, mediante sensores.

4.4 Selección de componentes

Con base en la revisión técnica realizada y en la disponibilidad de componentes en el mercado local, este apartado se enfoca en la selección de los elementos necesarios para la construcción del sistema de ozonificación. La selección se realizó priorizando criterios de compatibilidad entre componentes, eficiencia de operación, durabilidad de los materiales y facilidad de integración dentro del sistema propuesto.

4.4.1 Generador de ozono

En el proceso de diseño del sistema de ozonificación, se consideraron múltiples alternativas de generadores de ozono disponibles en el mercado, con el objetivo de garantizar un tratamiento efectivo del agua de acequias en sistemas hidropónicos. Entre los modelos evaluados, se analizaron dos opciones principales: el generador RDEXP de 3 g/h y un generador compacto comercializado modelo Kuiper.

El generador RDEXP, basado en tecnología de descarga de corona con tubo de cuarzo, ofrece una capacidad de producción de ozono de hasta 3 gramos por hora, alimentado a 110V AC. Esta

capacidad permite tratar volúmenes de hasta 100 litros en un tiempo de contacto de 20 minutos, garantizando la desinfección del agua. Además, su diseño compacto, su compatibilidad con sistemas de automatización y su construcción resistente lo convierten en una opción robusta para aplicaciones agrícolas.

Por otro lado, el modelo Kuiper presenta una producción de ozono estimada de 400 a 500 mg/h, utilizando tecnología por placa cerámica y alimentación mediante USB o adaptador DC. Aunque presenta ventajas como bajo consumo energético y portabilidad, su capacidad es limitada, resultando insuficiente para el tratamiento de volúmenes de agua superiores a 20 litros sin extender considerablemente los tiempos de operación. Adicionalmente, no cuenta con características técnicas específicas que permitan su integración eficiente con sistemas automatizados o condiciones de operación continua. En la **Tabla 4** se observa una comparación de los generadores disponibles en el mercado.

Tabla 4. Tabla comparativa de generadores de ozono.

Características	RDEXP 3g/h	Kuiper (400-500 mg/h)
Tecnología	Descarga de corona con tubo de cuarzo	Placa cerámica
Producción de ozono	3 gramos por hora	400-500 mg/h
Alimentación	110V AC	USB-DC
Capacidad de tratamiento	Hasta 100 litros en 20 minutos	5 litros
Compatibilidad con automatización	Alta	Limitada
Construcción	Robusta, materiales resistentes	Ligera, sin carcasa protectora
Aplicación recomendada	Sistemas agrícolas e hidropónicos	Uso doméstico o experimental
Eficiencia energética	Moderada	Alta (bajo consumo)
Ventajas destacadas	Alta capacidad, durabilidad, integración avanzada	Bajo consumo, portátil
Limitaciones	Mayor consumo que modelos portátiles	Baja capacidad, limitada integración

En base al análisis comparativo, se seleccionó el generador RDEXP de 3 g/h como el componente más adecuado para el presente sistema, ya que cumple con los criterios de eficiencia de desinfección, sostenibilidad, compatibilidad con materiales resistentes al ozono, posibilidad de automatización y escalabilidad del sistema. Esta elección asegura un desempeño confiable del sistema de tratamiento y permite alcanzar los objetivos de calidad del agua requeridos para su uso en cultivos hidropónicos. Sus características se muestran en la **Tabla 5**.



Fig. 3 Generador de ozono.

Tabla 5. Características generador de ozono.

Características	Descripción
Voltaje de entrada	110V AC/50Hz
Voltaje de salida	8.0 ± 0.5 kV AC
Dimensiones de la unidad de potencia	147 x 60 x 40 mm
Tamaño del tubo de ozono	220 x 35 mm
Peso	500 g

4.4.2 Bomba de aire

Para mejorar la eficiencia del proceso de ozonificación, se incorporó una bomba de aire que permita una mejor dispersión del ozono en el agua. La función principal de este componente es suministrar un flujo constante de aire al generador de ozono y a la válvula Venturi, asegurando una mezcla homogénea y maximizando el contacto del ozono con los contaminantes presentes en el agua.

La inclusión de una bomba de aire permite optimizar la transferencia de masa gas-líquido, lo cual se traduce en una mayor concentración de ozono disuelto y una reducción del tiempo requerido

para alcanzar valores CT efectivos. Además, al mantener un flujo constante de burbujas finas, se mejora la oxigenación del agua, beneficiando indirectamente la salud de las raíces en sistemas hidropónicos.

Para la selección se consideraron criterios como el caudal de aire requerido, compatibilidad con el difusor y presión de operación. En base a estos parámetros, se eligió una bomba de aire tipo compresor lineal con capacidad suficiente para generar un flujo continuo de entre 2x4 litros por minuto (L/min), adecuada para tratamiento del agua. Esta bomba opera a 110V AC, presenta un consumo energético bajo (3 W) y está fabricada con materiales resistentes a gases oxidantes como el ozono. La **Tabla 6** resume las características de la bomba de aire seleccionada.

Tabla 6. Características de la bomba de aire.

Características	Descripción
Modelo	JAD S-2000
Voltaje	110V AC – 60Hz
Potencia	3W
Salida	2x4 L/min
Presión	0.012MPa

4.4.3 Ventilador

El sistema requiere un ventilador para disipar el calor generado por el módulo de ozono y mantener su funcionamiento dentro de rangos térmicos seguros. Inicialmente se propuso un ventilador de 110V AC por su capacidad de conexión directa a la red eléctrica. No obstante, tras el análisis del sistema y con el objetivo de optimizar el consumo energético y la integración electrónica, se considera viable el uso de un ventilador de 12V DC.

Este tipo de ventilador presenta múltiples ventajas: menor consumo eléctrico, mayor seguridad operativa y mejor compatibilidad con el sistema de control basado en Arduino UNO. Además, al compartir la fuente de alimentación con otros componentes de baja tensión, se simplifica el diseño eléctrico y se reduce la necesidad de protecciones adicionales.

Por lo tanto, se recomienda utilizar un ventilador de 12V DC tipo axial, con un caudal de aire adecuado para la refrigeración del generador, preferiblemente con dimensiones de 80 x 80 x 25 mm y un consumo inferior a 2W, garantizando un funcionamiento eficiente y continuo del sistema. La **Tabla 7** muestra las características del ventilador.



Fig. 4 Ventilador axial.

Tabla 7. Características del ventilador.

Características	Descripción
Voltaje de operación	12V DC
Dimensiones	80 x 80 x 25 mm
Consumo eléctrico	1.8 W (150 mA aprox.)
Flujo de aire	25–35 CFM (pies cúbicos por minuto)
Conector	2 pines
Vida útil estimada	30,000 – 50,000 horas

4.4.4 Fuente de alimentación 12V

Para la alimentación de los dispositivos electrónicos que requieren bajo voltaje, como el ventilador axial de 12V, sensores y otros módulos asociados al sistema de control, se adquirió una fuente de alimentación con entrada de 110V AC y salida de 12V DC. Esta fuente permite convertir la tensión alterna de red en una tensión continua estable, indispensable para el funcionamiento seguro de los dispositivos sensibles del sistema de ozonificación.

La elección de esta fuente se basó en su compatibilidad con los componentes del sistema y su capacidad de suministro continuo de corriente con bajo nivel de ondulación. Además, facilita la implementación de un esquema de alimentación común para todos los periféricos de 12V, optimizando el diseño eléctrico y reduciendo el número de adaptadores independientes. La **Tabla 8** resume sus características principales.

Tabla 8. Características de la fuente de alimentación 12V.

Características	Descripción
Voltaje de entrada	110V AC / 60 Hz
Voltaje de salida	12V DC
Corriente de salida	10 A
Potencia nominal	120 W
Protección	Contra cortocircuito y sobrecarga
Montaje	Fijo en gabinete metálico

4.4.5 Válvula Venturi

La válvula Venturi es un dispositivo de inyección que aprovecha una sección convergente-

divergente en la tubería para generar una caída de presión que induce la succión del ozono hacia el flujo líquido. En comparación con sistemas de burbujeo por difusores porosos, la inyección mediante Venturi ofrece mayor transferencia de masa gas-líquido, menor ventilación de ozono al ambiente y mayor fracción de ozono disuelto para el mismo caudal del generador. Estas características hacen a la Venturi particularmente adecuada para sistemas de recirculación en tanques. Para garantizar compatibilidad se recomienda usar mangueras de grado alimenticio entre el generador y la válvula Venturi.



Fig. 5 Válvula Venturi

4.4.5.1 Manguera y tubos PVC

Para el sistema de recirculación se emplearon tubos y accesorios de PVC de $\frac{1}{2}$ pulgada, debido a que este diámetro permite mantener un caudal adecuado para el funcionamiento de la válvula Venturi y garantiza una circulación continua del agua dentro del tanque de tratamiento. El PVC es un material ampliamente utilizado en sistemas hidráulicos por su resistencia química, durabilidad, facilidad de instalación y bajo costo, características que lo hacen apropiado para aplicaciones de tratamiento de agua a pequeña escala.

Los tubos de $\frac{1}{2}$ pulgada proporcionan un equilibrio entre velocidad de flujo y pérdida de carga, permitiendo que la bomba sumergible opere dentro de un rango eficiente. Este diámetro favorece la generación de la caída de presión necesaria en la garganta de la válvula Venturi, asegurando una buena succión del ozono y una mezcla estable durante el proceso de recirculación.

Además, se utilizaron mangueras flexibles de grado alimenticio en los tramos donde se conecta la

salida del generador de ozono hacia la entrada lateral de la Venturi. Este tipo de manguera evita reacciones indeseadas con el ozono, reduce el riesgo de fugas, facilita el montaje y desmontaje del sistema para mantenimiento.

4.4.6 Bomba sumergible

Para la selección adecuada de la bomba sumergible en un sistema de tratamiento de agua mediante ozonificación aplicado a hidroponía, se deben considerar diversos parámetros técnicos, tales como el caudal requerido, la altura de elevación y las pérdidas de carga presentes en el sistema hidráulico. Estos factores influyen directamente en la eficiencia de la recirculación del agua y en la correcta operación de la válvula Venturi, ya que un caudal insuficiente o una altura de elevación inadecuada pueden limitar la capacidad de succión e inyección del ozono, afectando el desempeño global del sistema.

4.4.6.1 Caudal requerido

El caudal depende del volumen del sistema hidropónico y la frecuencia de recirculación deseada como se muestra en la **ecuación (1)**.

$$Q = \frac{V}{t} \quad (1)$$

Donde:

Q: Caudal (L/h)

V: Volumen total del sistema (L)

t: Tiempo de circulación deseado (h)

4.4.6.2 Altura de elevación (H)

La altura de elevación (H) corresponde a la distancia vertical existente entre el nivel del agua en el tanque de tratamiento y el punto más alto del sistema hidráulico. Este parámetro es determinante para la selección de la bomba sumergible y para asegurar una operación estable del sistema.

Para un funcionamiento seguro y eficiente, se recomienda que la altura real de operación no supere el 70 % de la altura máxima especificada por el fabricante de la bomba, con el fin de evitar sobrecargas, pérdida de eficiencia y reducción de la vida útil del equipo.

4.4.6.3 Selección de la bomba sumergible

Para la selección de la bomba sumergible se tomó como base teórica el volumen total del sistema hidropónico, estimado en 100 litros. Se estableció una frecuencia de recirculación de 30 minutos, lo que implica un caudal mínimo requerido de 200 litros por hora para asegurar la renovación constante del agua tratada con ozono. Considerando este requerimiento y con el objetivo de proporcionar un margen de seguridad que permita mantener un flujo turbulento favorable para la disolución del ozono, se seleccionó una bomba sumergible de 2000 litros por hora (550 GPH). Esta bomba ofrece una capacidad superior al mínimo necesario, lo que garantiza un funcionamiento eficiente incluso en presencia de pérdidas de carga por altura y fricción en las tuberías. En la **Tabla 9** se muestran las características de la bomba sumergible seleccionada.



Fig. 6 Bomba de agua sumergible.

Tabla 9. Características de la bomba sumergible.

Características	Descripción
Caudal	550 GPH (2000 L/h)
Consumo energético	30 W
Elevación máxima	7.2 pies (aprox. 2.2 m)
Boquillas	3 tamaños (1/2", 5/8", 3/4")
Potencia de la bomba	5 W

4.4.7 Determinación del volumen y tiempo de contacto óptimo para la ozonificación

Para que el proceso de ozonificación sea efectivo, es necesario que el ozono disuelto en el agua alcance una concentración adecuada y permanezca el tiempo suficiente para actuar sobre los contaminantes presentes. Este comportamiento se describe mediante el parámetro CT (concentración $\times$ tiempo), el cual constituye la base para definir el tiempo de operación del sistema en cada ciclo de tratamiento.

La válvula Venturi genera una zona de baja presión que permite la succión e inyección eficiente del ozono en el flujo de agua, produciendo burbujas de menor tamaño y, por ende, una mayor área de contacto gas-líquido. No obstante, el tiempo de contacto requerido depende también de la

calidad inicial del agua, dado que la presencia de materia orgánica y una elevada carga microbiana incrementan la demanda de ozono antes de que este actúe como desinfectante.

El generador de ozono empleado tiene una capacidad de producción de 3 g/h (3000 mg/h), mientras que el volumen de tratamiento propuesto inicialmente fue de 100 litros. Para determinar el volumen óptimo, se evaluaron diferentes escenarios de operación considerando concentraciones efectivas de ozono y valores de tiempo de contacto (CT) requeridos para eliminar microorganismos presentes en el agua. Para evaluar esta interacción, se utiliza el valor CT, aplicando la **ecuación (2)**.

$$CT = C \times T \quad (2)$$

Donde:

C: Concentración efectiva de ozono en el agua (mg/L)

T: Tiempo de contacto (h)

La concentración efectiva de ozono en el agua depende de la eficiencia de transferencia del sistema, estimada entre 60 % y 80 % para configuraciones con difusores porosos y Venturi. En la **Tabla 10** se resumen los resultados comparativos.

Tabla 10. Resultados comparativos CT.

Volumen de agua (L)	de O₃ disponible (mg/L)	Eficiencia estimada (%)	Concentración efectiva (mg/L)	Tiempo mínimo requerido (min) para CT ≈ 6 mg·h/L
50	60	60–80	36 – 48	8 – 10
75	40	60–80	24 – 32	12 – 15
100	30	60–80	18 – 24	15 – 20

Como se observa, el tratamiento de 75 litros de agua durante un tiempo de contacto de 15 minutos permite alcanzar un valor CT estimado de $6.3 \text{ mg}\cdot\text{h/L}$, suficiente para lograr una desinfección eficiente sin necesidad de operar el generador durante periodos prolongados. Esta configuración también favorece el equilibrio entre consumo energético, tiempo de proceso y seguridad del sistema.

Por lo tanto, con la ecuación se puede estimar la cantidad de agua y el tiempo de contacto con el ozono para optimizar el rendimiento del sistema y garantizar una calidad adecuada del agua tratada para su uso en hidroponía.

4.4.8 Diseño de programa de control

El sistema de control está basado en una plataforma Arduino UNO, la cual se encarga de gestionar el tiempo de operación de la bomba sumergible mediante el uso de un módulo relé. Para asegurar el funcionamiento adecuado y eficiente del sistema, la operación del generador de ozono se realiza de forma manual mediante un switch que debe ser encendido por el operario en los tiempos asignados en la programación, se incorporan sensores de temperatura y humedad que permiten monitorear el ambiente, considerando que estas variables influyen directamente en la estabilidad del ozono. Asimismo, se implementa una pantalla LCD para mostrar en tiempo real los parámetros de humedad y temperatura.

4.4.8.1 Selección del microcontrolador

La selección del microcontrolador es una decisión clave en todo sistema automatizado, en este caso se optó por el uso del Arduino UNO, considerando su simplicidad, robustez y amplia compatibilidad con módulos comerciales. Esta placa, basada en el microcontrolador ATmega328P, permite controlar de manera confiable los diferentes dispositivos involucrados en el sistema de ozonificación.

Una de las principales ventajas del Arduino UNO es su fácil integración con sensores como el DHT11, módulos de visualización LCD mediante protocolo I2C, y controladores de potencia como relés electromecánicos. Además, su entorno de desarrollo (Arduino IDE) ofrece una curva de aprendizaje accesible, ideal para implementar sistemas funcionales sin requerir conocimientos avanzados en programación.

Para justificar su elección, se realizó una comparación con otros microcontroladores ampliamente utilizados en aplicaciones similares, tales como el ESP32, el Raspberry Pi Pico y la placa STM32 (Blue Pill). Si bien estos modelos ofrecen mayores capacidades de procesamiento, memoria o conectividad, también implican una complejidad mayor en su implementación, además de un sobre dimensionamiento respecto a las necesidades reales del sistema.

El ESP32, por ejemplo, ofrece conectividad Wifi, Bluetooth integrado y una arquitectura más avanzada, sin embargo, su uso no se justifica en este proyecto al no requerirse comunicación inalámbrica. El Raspberry Pi Pico, aunque potente y económico, demanda programación en C++ o Micro Python, lo cual puede dificultar la implementación para sistemas de automatización sencillos. Por su parte, la placa STM32 posee excelentes capacidades técnicas, pero su entorno de desarrollo es menos intuitivo y requiere conocimientos más especializados. En la **Tabla 11** se puede evidenciar la comparación de los microcontroladores mencionados.

Tabla 11. Comparación de microcontroladores evaluados.

Microcontrolador	Ventajas	Desventajas
Arduino UNO	Uso sencillo, económico, buena compatibilidad con sensores.	Menor capacidad de procesamiento y memoria.
ESP32	Wifi y bluetooth integrados, mayor velocidad y memoria.	Complejidad de programación, sobre potenciado.
Raspberry Pi Pico	Bajo costo, velocidad moderada, dos núcleos, mayor memoria.	Requiere lenguaje C/C++ o Micro Python, menor comunidad Arduino.
STM32	Alta velocidad, bajo consumo, múltiples periféricos.	Curva de aprendizaje alta, entorno de desarrollo más complejo.

En comparación, el Arduino UNO ofrece una solución equilibrada: bajo consumo energético, soporte extendido, facilidad de programación y compatibilidad inmediata con todos los componentes definidos en este proyecto. Estas características lo convierten en la opción más adecuada para automatizar el sistema de tratamiento de agua con ozono en aplicaciones hidropónicas de pequeña y mediana escala. En la **Tabla 12** se indica las características técnicas de controlador.

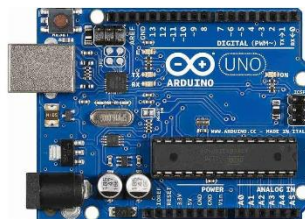


Fig. 7 Arduino UNO.

Tabla 12. Características del controlador Arduino UNO.

Características	Descripción
Microcontrolador	ATmega328P
Frecuencia reloj	16 MHz
Memoria	32 KB Flash (0.5 KB usados por el bootloader), 2 KB SRAM, 1 KB EEPROM
Entradas/Salidas	14 digitales (6 PWM), 6 analógicas
Interfaces	1 USART, SPI, I2C
Alimentación	Vía USB o adaptador AC/DC externo (7–12 V recomendado)

4.4.9 Relé

Para el control de la bomba sumergible, se opta por el uso de un relé electromecánico en lugar de uno de estado sólido. Esta decisión se basa en que el sistema no requiere conmutaciones rápidas ni de alta frecuencia, por lo que un relé convencional cumple adecuadamente con las funciones de encendido y apagado.

Además, el relé electromecánico representa una opción más económica y accesible, sin comprometer la seguridad ni la funcionalidad del sistema. Su integración con el Arduino UNO se realiza fácilmente mediante un módulo de control con aislamiento óptico.

Un módulo relé electromecánico (SRD-05VDC-SL-C) 5V, 10A, con optoacoplador incorporado, adecuado para conmutar cargas de hasta 250V AC o 30V DC. Este módulo es compatible con microcontroladores como el Arduino UNO y ofrece una vida útil suficiente para aplicaciones de automatización. Sus características se muestran en la **Tabla 13**.



Fig. 8 Módulos relé.

Tabla 13. Características del relé electromecánico.

Características	Descripción
Tensión de activación	5V DC
Corriente de conmutación	Hasta 10A @ 250V AC / 30V DC
Indicador	Led de estado

4.4.10 Sensor de temperatura y humedad

El sensor de temperatura y humedad DHT11 se integra al sistema para monitorear condiciones ambientales que influyen directamente en la eficiencia del proceso de ozonificación. La temperatura afecta la estabilidad del ozono disuelto, y una humedad inadecuada puede comprometer el funcionamiento de los componentes electrónicos. Su uso permite tomar decisiones automatizadas para mantener condiciones óptimas, garantizando así la eficacia y seguridad del sistema. En la **Tabla 14** se muestran las características del sensor DHT11.

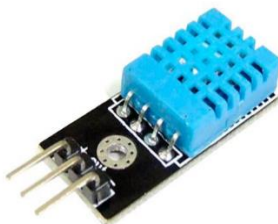


Fig. 9 Sensor de humedad y temperatura DHT11.

Tabla 14. Características Del sensor DHT11.

Características	Descripción
Modelo	DHT11
Voltaje de operación	3.3 – 5 VDC
Rango de medición	Humedad: 20 – 90% HR Temperatura: 0 – 50 °C
Precisión	Humedad: $\pm 2\%$ HR (máx. $\pm 5\%$) Temperatura: ± 2 °C
Dimensiones	12 x 15 x 5.5 mm

4.4.11 Pantalla LCD

Para la visualización de datos y estados del sistema de ozonificación, se integró una pantalla LCD de 16 caracteres por 2 líneas, equipada con un módulo I2C. Esta elección se basa en su bajo consumo energético, fácil conexión mediante solo dos pines de comunicación (SDA y SCL) y compatibilidad con el microcontrolador Arduino UNO.

La pantalla LCD 16x2 permite mostrar de manera clara y compacta información clave como la temperatura y la humedad detectadas por el sensor DHT11, así como el estado operativo del sistema de ozonificación. Esta visualización facilita al operador la supervisión en tiempo real del proceso sin requerir interfaces más complejas o costosas.

Asimismo, el uso del protocolo I2C reduce considerablemente el número de pines utilizados en el Arduino, permitiendo que los demás pines digitales queden disponibles para controlar otros componentes del sistema, como los relés o sensores adicionales. La pantalla LCD se encuentra aislada con una caja impresa en 3D como se muestra en la **Fig. 10**, para evitar corrientes parásitas que alteran el funcionamiento de la pantalla. La **Tabla 15** resume las características principales de la pantalla utilizada.

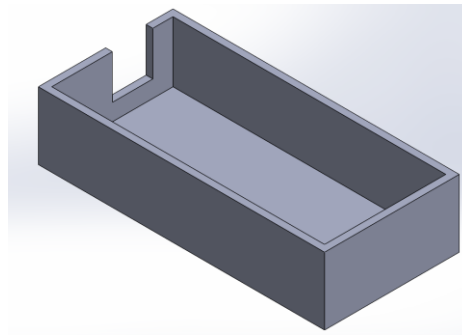


Fig. 10 Caja para pantalla LCD.

Tabla 15. Características de la pantalla LCD.

Características	Descripción
Modelo	LCD 1602 con módulo I2C
Tamaño de visualización	16 caracteres x 2 líneas
Voltaje de operación	5 VDC
Corriente típica	~60 mA (con retroiluminación)
Controlador	HD44780 compatible
Dimensiones	8.0 x 3.6 cm aprox.

4.4.12 Regulador DC-DC: módulo LM2596 (HW-411)

El módulo regulador DC-DC basado en el chip LM2596 es un convertidor reductor tipo Buck de conmutación, convierte una tensión continua de entrada superior, en este caso para el sistema 12V, a una tensión de salida regulada menor (5V) con alta eficiencia. Se seleccionó el LM2596 HW-411 por su relación eficiencia-corriente, bajo calor disipado en comparación con reguladores lineales y su disponibilidad. Al entregar 5V robusto y estable evita que variaciones en la línea de 12V o el arranque de cargas como la bomba y los relés provoquen reinicios o comportamiento errático en el Arduino y la pantalla LCD. En la **Tabla 16** se muestra las características del regulador DC-DC.



Fig. 11 Regulador DC-DC.

Tabla 16. Características del regulador DC-DC.

Características	Descripción
Rango de tensión de entrada	Típicamente 7-40V
Tensión de salida	Ajustable mediante potenciómetro (1.25V hasta $\approx V_{in}$)
Corriente de salida máxima práctica	$\approx 2-3$ A
Frecuencia de conmutación	≈ 150 kHz
Tipo	Reductor Buck con diodo Schottky, inductancia y circuito de control integrados.
Eficiencia	80-95% según condiciones de corriente y diferencia $V_{in}-V_{out}$.

4.4.13 Filtro de alimentación – condensadores y supresión de transientes

El objetivo del filtro de alimentación es disminuir la caída de tensión instantánea (inrush), reducir ondulación y atenuar ruido de alta frecuencia y transientes generados por la conmutación del regulador o por la activación de cargas inductivas como es el generador de ozono y la bomba sumergible, garantizando estabilidad del bus de 5V para la electrónica de control.

4.4.13.1 Estrategia de filtrado

Es recomendable usar una combinación de condensadores en paralelo (combinación multibanda) en cada punto de alimentación crítico.

Entrada 12V (inmediato al IN del LM2596)

Electrolítico 1000 uF, 16V (filtrado de baja frecuencia / reserva de energía ante picos).

cerámico (bypass HF) 0.1 uF MLCC (disipación de ruido de alta frecuencia).

Salida 5V (salida del LM2596 y punto de alimentación del Arduino)

Electrolítico 470 μ F, 16V (mantiene la estabilidad ante variaciones moderadas).

Cerámico 0.1 μ F MLCC colocado justo entre 5V y GND en la placa del Arduino.

Cada tipo de condensador cubre una banda de frecuencia distinta. Los electrolíticos ponen energía almacenada para picos lentos/bajas frecuencias; los cerámicos responden a ruidos de alta frecuencia. Al colocarlos en paralelo entre VCC y GND se consigue un filtrado efectivo y estable.

El regulador DC-DC y el filtro de alimentación se encuentran aislados en una caja diseñada para evitar el contacto con otros componentes electrónicos (ver **Fig. 12**). En la **Tabla 17** se enlistan los componentes del filtro de alimentación.

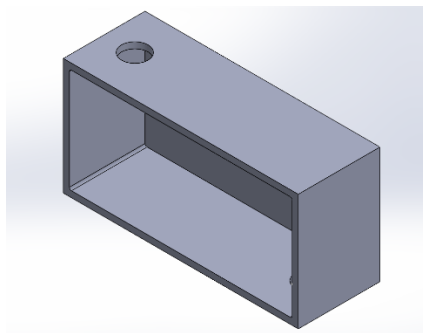


Fig. 12 Caja aislada para filtro de alimentación.



Fig. 13 Instalación de filtro de alimentación.

Tabla 17. Componentes del filtro de alimentación.

Componente	Descripción
Electrolítico (entrada)	1000 uF, 16V cerca de LM2596 IN
Cerámico (bypass entrada)	0.1 uF MLCC en paralelo con electrolítico de entrada
Electrolítico (salida)	470 uF, 16V salida 5V, cerca Arduino pin 5V
Cerámico (bypass salida)	0.1 uF MLCC entre 5V y GND Arduino

4.5 Construcción y ensamblaje

Con el fin de proteger y organizar adecuadamente todos los componentes del sistema de ozonificación, se empleó un gabinete metálico de 30 cm x 30 cm. Este gabinete actúa como estructura principal para el montaje de los dispositivos electrónicos y eléctricos, ofreciendo una solución compacta, segura y resistente al entorno agrícola. En su interior se montaron el generador de ozono, la fuente de alimentación de 12V DC, una caja aislada que contiene el Arduino UNO y los módulos de relé, así como las conexiones internas del sistema. Para asegurar la ventilación del generador y evitar sobrecalentamientos, se instalaron dos ventiladores de 12V DC en los laterales del gabinete, permitiendo una circulación de aire constante. En la tapa frontal se ubicaron la pantalla LCD y el pulsador de control del generador, facilitando la interacción del usuario sin necesidad de abrir el gabinete. Adicionalmente, en uno de los laterales se colocaron el interruptor de encendido del sistema (switch) y la toma de alimentación de 110V AC, lo que permite una conexión segura y un control manual de encendido desde el exterior. Este diseño no solo garantiza protección mecánica y eléctrica, sino que también facilita el mantenimiento y la escalabilidad futura del sistema. En la **Fig. 14** se proporciona una visualización general del ensamblaje.



Fig. 14 Ensamblaje general del sistema.

4.5.1 Carcasa electrónica

La carcasa electrónica es un componente principal para el aislamiento de los componentes de control como es el Arduino y los módulos relé. La carcasa fue diseñada e impresa en 3D, como se observa en la **Fig. 15**.

La carcasa está adaptada a las dimensiones de los componentes electrónicos, manteniendo un orden dentro del gabinete y protegiendo de posibles daños físicos durante la operación del sistema de ozonificación. Se agregó una tapa y aislamiento plástico ya que al encender el generador se produce un campo magnético generando corrientes parásitas que alteran la funcionalidad del sistema de control. En la **Fig. 16** se puede observar los componentes montados en la carcasa impresa junto a la pantalla LCD y el sensor DHT11.

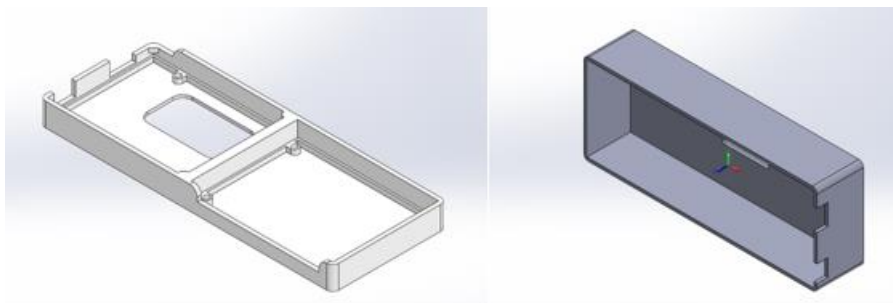


Fig. 15 CAD de carcasa electrónica.

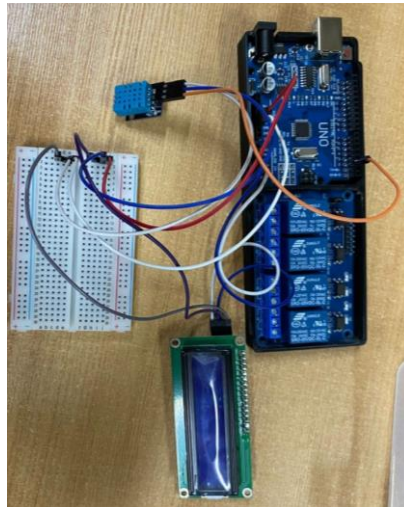


Fig. 16 Montaje de componentes en carcasa.

4.6 Implementación del código en Arduino

Para dar funcionamiento automático al sistema de ozonificación, se desarrolló un programa en el entorno Arduino IDE, utilizando una placa Arduino UNO como controlador principal. Este código fue diseñado para gestionar los tiempos de activación de la bomba sumergible, al mismo tiempo que permite visualizar en una pantalla LCD de 16x2 los valores de temperatura y humedad obtenidos por el sensor DHT11.

Al encender el sistema, la pantalla muestra un mensaje de bienvenida con la leyenda “Sistema Ozono”, transcurrido 10 segundos se activa la bomba sumergible mediante un relé, seguido, se activa manualmente el generador de ozono durante el tiempo establecido en la programación. Mientras esto ocurre, el sistema lee constantemente la temperatura y la humedad del ambiente, mostrando estos datos en pantalla junto con el mensaje “Ozono ON”.

Terminada esta fase, el sistema apaga de forma automática la bomba sumergible, a la vez se apaga el generador de manera manual con el switch colocado en la puerta del gabinete. En este punto es importante apagar el sistema completo para evitar contactos con el agua tratada. Para realizar otro ciclo de tratamiento se vuelve a encender el sistema, de esta forma aseguramos su buen funcionamiento.

El proceso de tratamiento se controla de forma precisa utilizando temporizadores con la función millis (), lo que permite mostrar los datos en la pantalla sin detener el programa. Este programa permite un manejo sencillo, intuitivo y eficiente del sistema de ozonificación. Además, está estructurado de manera flexible, lo que facilitaría futuras mejoras, como añadir sensores adicionales, conectividad remota o una interfaz más avanzada.

4.7 Pruebas de funcionamiento

Para las pruebas de funcionamiento del sistema, se inició verificando la funcionalidad de cada componente de manera individual.

4.7.1 Prueba de control

En este apartado se conectaron todos los componentes de control, para la verificación de lectura de datos del sensor y la visualización en la pantalla durante 5 minutos. Se determinó que no hay fallos en la lectura (ver **Fig. 17**).



Fig. 17 Visualización de datos en pantalla LCD.

4.7.2 Prueba de componentes inductivos

Se incrementó la conexión de la bomba sumergible al módulo relé, en los 5 minutos establecidos para la prueba, se pudo observar que, transcurrido aproximadamente los 2 minutos de estar encendida la bomba, la pantalla LCD mostraba símbolos aleatorios. Este síntoma es provocado por corrientes parásitas producido por la bomba sumergible y el generador de ozono. Para evitar, se aísla todos los cables y los componentes de control.

Para la prueba del generador de ozono, es importante que el sistema esté conectado a una puesta a tierra, ya que la medición de voltaje entre el neutro de la alimentación de 110V y el chasis del gabinete era de aproximadamente 48V, para la reducción de tensión, se consideró la puesta a tierra. Al encender el generador se produce un campo magnético y corrientes parásitas al igual que la bomba sumergible, provocando alteraciones en el control del sistema, donde se consideró el aislamiento total dentro del gabinete para reducir este efecto. También es importante verificar que las conexiones de todos los componentes tengan continuidad evitando falsos contactos. En la **Fig. 18** se observa la prueba de aislamiento y puesta a tierra del sistema.



Fig. 18 Prueba de aislamiento y puesta a tierra.

4.8 Pruebas experimentales del agua tratada

El objetivo de esta etapa experimental es evaluar la eficacia del sistema de ozonificación en la mejora de la calidad del agua proveniente de acequias, mediante la comparación de parámetros microbiológicos antes y después del tratamiento.

Las pruebas se realizaron con el propósito de determinar la capacidad del sistema para inactivar microorganismos presentes y mantener condiciones adecuadas para su uso en sistemas hidropónicos.

4.8.1 Prueba del sistema en 20 litros de agua de acequia con azul de metileno

Una vez verificado el correcto funcionamiento del sistema de ozonificación se procedió a realizar las pruebas con agua.

Para validar la eficiencia de transferencia del sistema con Venturi, se realizó la primera prueba con

20 litros de agua de acequia del sector de Imbaya con 10 gotas de azul de metileno (concentración aproximada de la gota según estándar del reactivo) como indicador de oxidación. El proceso de ozonificación se efectuó utilizando los parámetros previamente determinados en el cálculo del tiempo de desinfección, el cual corresponde a 7 minutos, este rango permite mantener un CT de alrededor de $6 \text{ mg} \times \text{h/L}$. Durante este intervalo, el generador de ozono y la bomba de agua trabajaron de manera simultánea, garantizando una adecuada difusión del gas en el agua.

La decoloración observada del azul de metileno durante las pruebas experimentales indica una alta disponibilidad de ozono para procesos de oxidación, incluso bajo condiciones de elevada demanda oxidativa características del agua de acequia.

Este comportamiento evidencia una adecuada transferencia de ozono al medio líquido, atribuida principalmente al uso de la válvula Venturi como sistema de inyección. En consecuencia, los resultados obtenidos validan la eficiencia del sistema de inyección implementado y su capacidad para promover reacciones de oxidación de forma efectiva. (ver **Fig. 19**).



Fig. 19 Imagen del tratamiento en 20 litros de agua con azul de metileno.

4.8.2 Selección de parámetros de análisis

Con base en los resultados obtenidos durante las pruebas preliminares y la revisión bibliográfica, se

seleccionó el análisis de coliformes totales como el parámetro microbiológico principal para evaluar la eficiencia del sistema de ozonificación. Los coliformes constituyen un indicador crítico de contaminación fecal y bacteriológica en aguas superficiales. Su comportamiento frente a procesos oxidativos permite evidenciar de manera directa la capacidad del ozono para inactivar microorganismos presentes en el agua de acequias, tal como se expone en el marco teórico, donde se destaca que estos parámetros son suficientes para verificar la efectividad de la desinfección y la aptitud del agua tratada para su uso en sistemas hidropónicos. Por ello el estudio de coliformes antes y después del tratamiento constituye una herramienta confiable para validar el desempeño del sistema.

4.8.3 Prueba en 20 litros de agua de acequia para análisis de coliformes

Tras la validación preliminar del sistema mediante la prueba con azul de metileno, se realizó una prueba utilizando 20 litros de agua de acequia sin colorante, cuyo objetivo fue obtener muestras necesarias para el análisis microbiológico de coliformes. A diferencia del ensayo anterior, se determinó necesario incrementar el tiempo de tratamiento a aproximadamente 12 minutos, debido a que, durante la prueba con azul de metileno, el tiempo previamente estimado no permitió alcanzar una claridad completa del agua, sugiriendo una mayor demanda oxidativa del sistema.

Durante esta prueba, el generador de ozono y la bomba sumergible trabajaron de manera simultánea, asegurando una adecuada inyección y recirculación del ozono mediante la válvula Venturi. Una vez finalizado el tiempo de exposición, se procedió a la recolección de muestras de 100mL, tanto del agua antes del tratamiento como del agua ya ozonificada, siguiendo las recomendaciones de muestreo para el análisis microbiológico. Estas muestras fueron enviadas al laboratorio con el fin de cuantificar la concentración de coliformes totales y evaluar la efectividad del proceso de ozonificación sobre la calidad microbiológica del agua de acequia. En la **Fig. 20** se puede observar el proceso de filtración de coliformes.



Fig. 20 Proceso de filtración para estudio de coliformes.

Los resultados obtenidos del análisis microbiológico del agua de acequia en el (**Anexo F**) muestran valores inferiores a <10 UFC/100 mL tanto en la muestra de agua sin tratamiento (entrada) y en la muestra tratada mediante ozonificación (salida), lo cual corresponde al límite de detección del método analítico empleado por el laboratorio. (ver en la **Tabla 18**).

Tabla 18. Análisis del agua

Parámetro analizado	Unidad	Muestra entrada	de Muestra salida	de Método
Rec. Coliformes totales	UFC/100ml	<10	<10	EPA 40-CFR

Si bien esta condición impide cuantificar de manera precisa la reducción microbiológica alcanzada mediante el proceso de ozonificación, los resultados permiten confirmar que el sistema implementado no introduce contaminación secundaria durante su operación y que mantiene la calidad microbiológica del agua bajo las condiciones evaluadas.

En la **Fig. 21** se muestran las membranas que contienen las partículas microbiológicas del análisis

del agua tratada y del agua sin tratar.

Adicionalmente, los resultados del análisis microbiológico inicial y final emitidos por el laboratorio se adjuntan en los anexos del presente documento, como respaldo documental de los ensayos realizados.



Fig. 21 Membrana con partículas microbiológicas.

4.8.4 Prueba de validación con agua residual (PTAR-Ibarra)

Tras realizar los primeros ensayos con muestras de agua de acequia, se observó que los resultados del análisis microbiológico no mostraban valores diferenciales significativas entre el agua sin tratar y el agua tratada con ozono. Esta condición se atribuye a la baja carga microbiológica inicial del agua, lo que limita la capacidad del método analítico para evidenciar reducciones cuantificables. Ante esta limitación, se procedió a realizar una nueva prueba de validación complementaria utilizando agua residual con mayor carga orgánica y microbiológica, proveniente de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de la ciudad de Ibarra, con el objetivo de evaluar el desempeño del sistema bajo condiciones más exigentes.

La caracterización inicial del agua residual fue proporcionada por el laboratorio de la PTAR, obteniéndose como valor de referencia el recuento de coliformes totales, el cual remite al **(Anexo G)**. Para la prueba experimental, se recolectaron 20 litros de agua residual, los cuales fueron filtrados

previamente con el fin de eliminar sólidos suspendidos que pudieran interferir con la transferencia del ozono al medio líquido.

En la primera etapa, se añadieron gotas de azul de metileno a los 20 litros de agua residual, con el propósito de utilizar como indicador visual del proceso de oxidación, tal como se observa en la **Fig. 22**. El sistema fue programado para un ciclo de 12 minutos. Durante el monitoreo, se evidenció que, aproximadamente a los 10 minutos de tratamiento el agua presenta una coloración transparente, lo permitió verificar visualmente la adecuada inyección de ozono y confirmar que el tiempo de tratamiento establecido resulta suficiente incluso en condiciones de alta demanda oxidativa.



Fig. 22 Agua residual con azul de metileno.

Una vez verificado el funcionamiento del sistema mediante la prueba con azul de metileno, se realizó la prueba en otros 20 litros de agua residual filtrada, esta vez sin adición del colorante azul de metileno. Finalizado el proceso de ozonificación, se extrajo una muestra de 100 ml para el análisis del recuento total de coliformes, con el fin de comparar los resultados obtenidos con los valores iniciales proporcionados por el laboratorio de la PTAR.

4.8.5 Resultados del análisis del recuento de coliformes totales del agua tratada

En la **Tabla 19** se presenta los valores correspondientes a la carga inicial de coliformes totales del

agua residual y el resultado obtenido después del tratamiento con ozono.

La comparación entre el valor inicial de 116×10^3 UFC/100 ml y el resultado final de 5 UFC/100 ml (**ver Anexo H**), evidencia una reducción significativa de la carga microbiológica. A partir de estos valores, se estimó una eficiencia de remoción del 99.995%, lo que demuestra la alta capacidad de desinfección del sistema bajo condiciones de elevada carga microbiológica.

Estos resultados permiten validar el funcionamiento del sistema de ozonificación como una alternativa efectiva para la reducción de microorganismos en el tratamiento de agua, destacando su potencial aplicación en sistemas hidropónicos donde se requiere garantizar condiciones sanitarias adecuadas del recurso hídrico.

Tabla 19 Análisis recuento de coliformes.

Parámetro	Valor inicial (Laboratorio PTAR)	Resultado agua tratada
Rec. Coliformes totales	116×10^3 UFC/100 ml	5 UFC/100 ml
Eficiencia de la remoción	-	99.995%

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES:

- El sistema de ozonificación diseñado y construido, basado en un generador de ozono de 3g/h, una válvula Venturi y un sistema de recirculación hidráulico, resultó técnicamente funcional para el tratamiento de agua de acequia destinada a sistemas hidropónicos, cumpliendo con los criterios de diseño, funcionalidad, seguridad y adaptabilidad establecidos en los objetivos del proyecto.
- La funcionalidad del sistema fue validada mediante pruebas complementarias con agua residual de la PTAR-Ibarra, en las cuales se evidenció una reducción significativa de la carga microbiológica, logrando una eficiencia de remoción de coliformes totales del 99.995%. El tratamiento permitió reducir el valor inicial de 116,000 UFC/100 ml a un resultado final de 5 UFC/100 ml, lo que demuestra la alta capacidad de desinfección del sistema bajo condiciones de elevada carga microbiológica.
- El diseño de sistema de ozonificación incorporó la inyección de ozono mediante una válvula Venturi como una decisión técnica orientada a mejorar la transferencia gas-liquido y favorecer una mayor eficiencia del proceso de desinfección, en concordancia con criterios documentados en la bibliografía técnica. Al no haberse realizado ensayos comparativos con otros métodos de inyección, como el burbujeo convencional, la configuración adoptada permitió una operación estable del sistema.
- El sistema diseñado se presenta como una alternativa técnicamente viable y accesible para el tratamiento de aguas destinadas a aplicaciones hidropónicas a pequeña escala, cuya implementación no requiere de equipos de gama industrial, lo que favorece su aplicación en instalaciones agrícolas o en proyectos académicos orientados al uso de tecnologías limpias.

5.2 RECOMENDACIONES:

- Realizar pruebas con mayores volúmenes de agua y diferentes tiempos de tratamiento, con el fin de evaluar el comportamiento del sistema y determinar el volumen máximo de agua a ser tratada.
- Desarrollar ensayos comparativos futuros entre distintos métodos de inyección de ozono, tales como válvula Venturi y burbujeo convencional, que permitan cuantificar de manera experimental las diferencias en eficiencia de transferencia gas-liquido, tiempo de tratamiento y energía.
- Es recomendable incorporar sensores adicionales como ORP (capacidad de oxidación), pH o turbidez que permitan monitorear en tiempo real la calidad del agua, facilitando el control del proceso y la toma de decisiones durante la operación del sistema.
- Optimizar la programación del control, incorporando rutinas de seguridad, alarmas y registros de datos, con el objetivo de mejorar la robustez operativa, la trazabilidad del proceso y la seguridad del sistema durante su funcionamiento continuo.
- Considerar este proyecto como base para el desarrollo de sistemas de tratamiento de agua más avanzados en futuros trabajos académicos, integrando tecnologías de control inteligente o fuentes de energía alternativas, de forma que se amplíe su alcance técnico sin perder el enfoque en soluciones accesibles para pequeñas instalaciones.

REFERENCIAS

- [1] M. D. AMBIENTE, «Proyecto Adaptación a los impactos del cambio climático en recursos hídricos en los Andes (AICCA),» Quito, 2020.
- [2] F. Ramírez, Tratamiento de Desinfección del Agua Potable, Madrid: Canaleduca.
- [3] M. d. M. P. Calvo, Tratamiento con ozono, Madrid: CosemarOzono.
- [4] C. Gottschalk, J. A. Libra, and A. Saupe, "Ozonation of Water and Waste Water: A Practical Guide to Understanding Ozone and its Applications," 2nd ed., Wiley-VCH, 2018.
- [5] A. B. Pandit and J. P. Kumar, "Emerging Technologies for Water Treatment: An Overview," *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 7, no. 6, pp. 103318, Dec. 2019.
- [6] D. V. Ghernaout, "Advanced Oxidation Processes for Wastewater Treatment," *Applied Water Science*, vol. 9, no. 3, pp. 1-19, 2019.
- [7] R. Andreozzi, V. Caprio, A. Insola, and R. Marotta, "Advanced Oxidation Processes (AOP) for Water Purification and Recovery," *Catalysis Today*, vol. 53, no. 1, pp. 51-59, 2020.
- [8] T. W. Schmidt, "Comparison of Ozone and Chlorine in Water Treatment," *Journal of Water Supply: Research and Technology-AQUA*, vol. 69, no. 1, pp. 15-28, 2020.
- [9] M. Himmelfarb, T. Scheurer, and H. Jekel, "Ozone Application in Wastewater Treatment: Benefits and Challenges," *Water Research*, vol. 159, pp. 417-431, Feb. 2020.
- [10] G. Bugbee, "Nutrient solutions for hydroponic systems," in *Hydroponics: A Practical*
- [11] R. W. Baker, *Membrane Technology and Applications*, 3rd ed., John Wiley & Sons, 2012.

- [12] G. Tchobanoglous, F. Burton, and H. D. Stensel, *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery*, 5th ed., McGraw-Hill, 2014.
- [13] P. Brown and J. Wilson, "Water Treatment Technologies," *J. Environ. Sci.*, vol. 34, no. 2, pp. 123-145, 2021.
- [14] G. W. Miller, *Environmental Chemistry of Water*. New York: Wiley, 2016.
- [15] U. von Gunten, "Ozonation of Drinking Water: Part I. Oxidation Kinetics and Product Formation," *Water Res.*, vol. 37, no. 7, pp. 1443-1467, 2018.
- [16] N. Hunt, "Ozone Generation and Applications," *Water Treat. J.*, vol. 33, no. 4, pp. 567–583, 2021.
- [17] U. von Gunten, "Ozonation of Drinking Water: Part I. Oxidation Kinetics and Product Formation," *Water Res.*, vol. 37, no. 7, pp. 1443–1467, 2018.
- [18] R. G. Rice and M. Gomez-Taylor, "Ozone for Water and Wastewater Treatment," *J. Environ. Eng.*, vol. 35, no. 3, pp. 215–234, 2018.
- [19] N. Hunt, "Ozone Generation and Applications," *Water Treat. J.*, vol. 33, no. 4, pp. 567-583, 2021.
- [20] R. G. Rice and M. Gomez-Taylor, "Ozone for Water and Wastewater Treatment," *J. Environ. Eng.*, vol. 35, no. 3, pp. 215-234, 2018.
- [21] R. Resh, *Hydroponic Food Production: A Definitive Guidebook for the Advanced Home Gardener and the Commercial Hydroponic Grower*, 7th ed., CRC Press, 2012.

- [22] H. M. Resh, *The Hydroponic Greenhouse: Growing Plants Without Soil*, St. Martin's Press, 1996.
- [23] G. Bugbee, "Nutrient solutions for hydroponic systems," *Hydroponics: A Practical Guide for the Soilless Grower*, 2nd ed., Academic Press, 2001, pp. 99–117.
- [24] D. Savvas and H. Passam, *Hydroponic Production of Vegetables and Ornamentals*, Embryo Publications, 2002.
- [25] A. R. Teixeira et al., "Ozone application in hydroponic systems for water disinfection: A review," *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 9, no. 4, 2021.
- [26] C. Kunz, "Advances in Hydroponic Water Treatment," *Plant Sci. Today*, vol. 56, no. 3, pp. 233-246, 2020.
- [27] C. Kunz, "Advances in Hydroponic Water Treatment," *Plant Sci. Today*, vol. 56, no. 3, pp. 233-246, 2020.
- [28] N. Hunt, "Ozone Generation and Applications," *Water Treat. J.*, vol. 33, no. 4, pp. 567-583, 2021.
- [29] J. Escobar and A. Galvis, "Ozonation for Hydroponic Water Treatment," *Hydroponics J.*, vol. 10, no. 1, pp. 23-39, 2019.
- [30] G. Guerrero and M. C. Guerrero, *Metodología de la investigación*, 2nd ed. 2020.
- [31] P. I. Vizcaíno Zúñiga, R. J. Cedeño Cedeño, and I. A. Maldonado Palacios, "Metodología de la investigación científica: guía práctica," *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, vol. 7, no. 4, pp. 9723–9762, Sep. 2023, doi: 10.37811/cl_rcm.v7i4.7658.

- [32] J. Veiga de Cabo, E. De la Fuente Díez, and M. Zimmermann Verdejo, “Modelos de estudios en investigación aplicada: conceptos y criterios para el diseño,” *Med Segur Trab (Madr)*, vol. 54, 2008.
- [33] J. Maxwell, *Diseño de investigación cualitativa*. 2013.
- [34] A. Ospina, D. Pedreros, and A. García, “Criterios para la implementación del estándar v-model,” Universidad de San Buenaventura, 2014.
- [35] J. Sosa Saavedra, M. Trejo Estrella, A. García García, J. Berceinas Sánchez, R. Velázquez González, and R. Hernández Tovar, “Implementación de la metodología V como eje de desarrollo de un tribómetro de perno en disco,” *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, vol. 11, no. Especial4, pp. 21–29, nov. 2023.
- [36] Asociación Española de Normalización, *UNE-EN 1278:2015. Productos químicos usados para el tratamiento del agua destinada al consumo humano – Ozono*, Madrid, España, 2015.
- [37] World Health Organization, *Guidelines for Drinking-water Quality*, 4th ed., Geneva, Switzerland: WHO, 2022.
- [38] R. W. Fox, A. T. McDonald y P. J. Pritchard, *Introducción a la Mecánica de Fluidos*, 8.^a ed. México: Wiley, 2015.
- [39] F. M. White, *Fluid Mechanics*, 7th ed. New York: McGraw-Hill, 2011.
- [40] G. Gordon, “Ozone: Science and Engineering,” *Ozone: Sci. Eng.*, vol. 20, no. 5, pp. 383–390, 1998.
- [41] N. De Souza et al., “Mass transfer performance of Venturi injectors for ozone dissolution,” *Water Research*, vol. 45, no. 2, pp. 552–560, 2011.
- [42] J. Hoigné y H. Bader, “Rate constants of ozone reactions with organic and inorganic compounds,” *Water Research*, vol. 17, no. 2, pp. 173–183, 1983.

ANEXOS

ANEXO A: Ficha técnica de la bomba de agua sumergible.

INSTRUCCIONES



EasBright
AQUARIUM WATER PUMP
INSTRUCTIONS

Dear users:
Thank you for choosing the company products. In order to give our best services to you, please read the user manual carefully before using.

application

This product is used for pumping. And it can be widely used for various purposes.
○ Suitable for fish tank filter pump, skimming equipment, power, aquarium landscaping, fountains, waterways, Waterfalls, etc.
○ Seafood holding tanks, aquarium circulating water supply and drainage;
○ Garden watering or cleaning equipment.
○ Sea water or acid and alkali liquid supply and emissions.

characteristic

○ This product is installed thermal protection, when the motor is overheating because of abnormal operation, the motor will automatically cut off the power.

○ The pump casing and all the parts which contact with the outside are using acid alkali and salt-tolerant material. It can be used in salt used in the acid, alkali and salt environment.
○ This pump can be used as the amphibious pump.
○ This product uses a unique design of the motor and pump body structure, it has characteristics such as lower power consumption, longer life.
○ This product equipped with multiple connecting ways. It can connect with tubes of a variety of specifications in kinds of occasions.

Usage

Before using, take the pump and fix to a suitable outlet, and then connect with the hose. Sucker has a fixed and a cushioning effect, please fix the suckers on the bottom plate when lying flat or adsorbing on the wall. If fixing the pump with the rope, it is no need to fix the sucker. It also can use the right sticks, nails to fix the pump through fixing the holes of bottom plate. After fixing firmly, you can connect with the appropriate power supply, and the pump start working.

Before operating this appliance, please read this instruction manual completely and keep it handy for future reference!

Caution

- Before using the pump, please make sure the rated voltage marked on the nameplate and the voltage of actual use is consistent.
- When installing, removing and cleaning the pump, you must unplug the power plug to ensure safety.
- If the pump has been a serious collision, please check the pump, if broken, please stop using immediately.
- Not intended to be moved when plugged in or in operation.
- The supply cord can be replaced if the cord is damaged the appliance has to be scrapped.
- Do not lift the pump by the power cord.
- Please make sure the pump working in clean water
- Do not pump heated liquids with a temperature higher than 35℃.

Maintenance

- If the pump will be not used for long-term, Please take the pump out of the water, and let the pump work in the clean water for a moment, and then clean the parts of pump and wipe clean.
- If the temperature is below 0℃, please take the water pump from the water immediately and discharge accumulation of water in the pump in case pump is broken because of freezing.

Simple troubleshooting method

Status	Reason	Solution
Submersible pump is not running	Power is not turned	The power is turned
	The plug is not interoperate freely	Plug firmly
	The motor cut off the power supply automatically because of improper use	Use in the normal conditions
Noises appear	Something in the pump	Disassemble the pump and clean
Pump is running but the effluent is insufficient	Impeller damage	Change the impeller
	Connecting tube obstruction Filters cover blocking	Remove obstruction
	The depth of the water is insufficient	Put the pump under 15cm of the water level
	Power supply voltage is low	Adjust to the appropriate voltage

Model & Specification of Products

MODEL	POWER (w)	H-MAX	Q-MAX (L/H)
003	3W	50cm	200
005	5W	70cm	350
007	7W	85cm	450
008	8W	1.2m	600
016	16W	1.6m	750
018	18W	1.8m	1000
018D	18W	1.8m	1000
025	25W	2.0m	1500
030	30W	2.2m	2000
045	45W	2.5m	2500
050	50W	2.8m	2800
060	60W	3m	3000
3200/075	75W	3.2m	3200
3500/080	80W	3.5m	3500
4500/095	95W	4.5m	4500
5000/150	150W	5m	5000

ANEXO B: Ficha técnica módulos relé.

Características:

Módulo de relé de 5 V de 4 canales

Esta es una placa de interfaz de relé de 4 canales de 5 V.

Ser capaz de controlar varios electrodomésticos y otros equipos con gran corriente.

Se puede controlar directamente mediante un microcontrolador (Arduino, 8051, AVR, PIC, DSP, ARM, ARM, MSP430, lógica TTL).

Placa de interfaz de relé de 4 canales de 5 V, y cada una necesita una corriente de controlador de 50-60 mA.
Equipado con relé de alta corriente, AC250V 10A; CC 30 V 10 A.

Solicitud:

Admite todo el control de MCU.

El ámbito industrial.

Control PLC.

Control inteligente del hogar.

ANEXO C: Ficha técnica ventiladores.

Max. **79** m³/h

DC axial fans

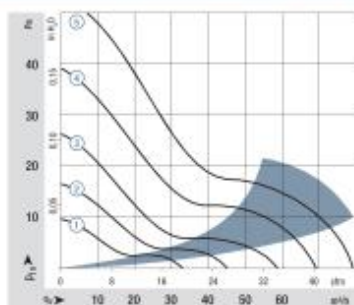
□ 80 x 25 mm



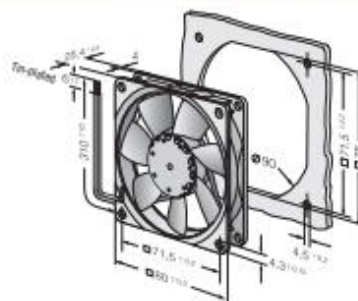
- | | |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> - Material: Housing: GRP⁽¹⁾ (PBT)
Impeller: GRP⁽¹⁾ (PA) - Direction of air flow: Exhaust over struts - Direction of rotation: Counterclockwise, looking towards rotor - Connection: Via single wires AWG 24, TR 64 - Highlights: Some models are suitable for use at high ambient temperatures up to 85 °C. - Weight: 95 g | <ul style="list-style-type: none"> - Possible special versions: (See chapter DC fans - specials) - Speed signal - Go / NoGo alarm - Alarm with speed limit - External temperature sensor - Internal temperature sensor - PWM control input - Analog control input - Moisture protection - Degree of protection: IP 54 / IP 68 |
|---|--|

11. Fiberglass-reinforced plastic

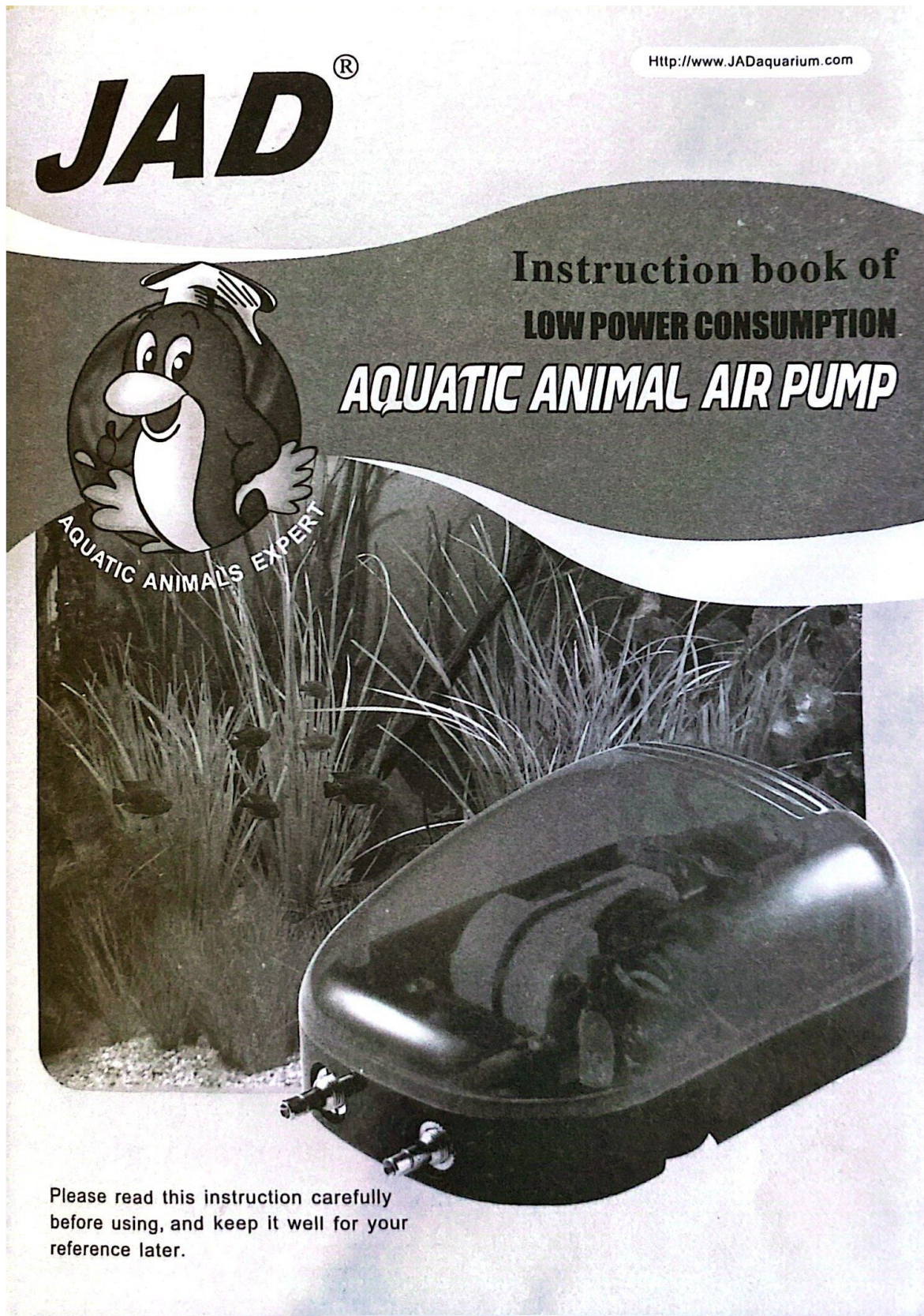
Series 8400 N													Service life L ₁₀ 40 °C oil-in-pipe standard	Service life L ₁₀ 70 °C oil-in-pipe standard	Life expectancy L ₁₀ 90 °C (40 °C see page 17)	Curve
Nominal data	Air flow	Air flow	Nominal voltage	Voltage range	Sound pressure level	Sound power level	Silent sleeve bearings Ball bearings	Power consumption	Nominal speed	Temperature range						
Type	m³/h	cfm	VDC	VDC	dB(A)	dB(A)	■ □	Watts	rpm¹	°C	Hours	Hours				
8412 NGL	33	19.4	12	8...15	12	3.5	■	0.5	1 500	-20...+85	80 000 / 27 500	135 000	①			
8412 NLE	33	19.4	12	8...15	17	3.7	■	0.3	1 500	-20...+85	80 000 / 27 500	135 000	①			
8412 NGMLE	45	26.5	12	8...15	19	3.9	■	0.9	2 050	-20...+80	80 000 / 32 500	135 000	②			
8412 NMLE	45	26.5	12	8...15	21	4.0	■	0.6	2 050	-20...+85	80 000 / 27 500	135 000	②			
8412 NGME	58	34.1	12	8...15	26	4.3	■	1.4	2 600	-20...+75	80 000 / 35 000	135 000	③			
8412 NME	58	34.1	12	8...15	27	4.4	■	1.0	2 600	-20...+75	80 000 / 35 000	135 000	③			
8412 NG	69	40.6	12	8...15	32	4.7	■	2.0	3 100	-20...+70	70 000 / 35 000	117 500	④			
8412 N	69	40.6	12	8...15	32	4.7	■	1.7	3 100	-20...+70	70 000 / 35 000	117 500	④			
8412 NH	79	46.5	12	8...13.2	37	5.0	■	2.1	3 600	-20...+70	70 000 / 35 000	117 500	⑤			
8412 NH-217	79	46.5	12	8...15	37	5.0	■	2.5	3 600	-20...+70	70 000 / 35 000	117 500	⑤			
8414 NGL	33	19.4	24	18...28	12	3.5	■	0.9	1 500	-20...+70	80 000 / 40 000	135 000	①			
8414 NL	33	19.4	24	18...28	17	3.7	■	0.8	1 500	-20...+70	80 000 / 40 000	135 000	①			
8414 NGML	45	26.5	24	18...28	19	3.9	■	1.2	2 050	-20...+70	80 000 / 40 000	135 000	②			
8414 NMML	45	26.5	24	18...28	21	4.0	■	1.1	2 050	-20...+70	80 000 / 40 000	135 000	②			
8414 NGM	58	34.1	24	18...28	26	4.3	■	1.4	2 600	-20...+70	80 000 / 40 000	135 000	③			
8414 NM	58	34.1	24	18...28	27	4.4	■	1.4	2 600	-20...+70	80 000 / 40 000	135 000	③			
8414 NG	69	40.6	24	18...28	32	4.7	■	2.2	3 100	-20...+70	70 000 / 35 000	117 500	④			
8414 N	69	40.6	24	18...28	32	4.7	■	1.8	3 100	-20...+70	70 000 / 35 000	117 500	④			
8414 NH	79	46.5	24	18...26	37	5.0	■	2.4	3 600	-20...+70	70 000 / 35 000	117 500	⑤			
8414 NH-221	79	46.5	24	18...28	37	5.0	■	2.2	3 600	-20...+70	70 000 / 35 000	117 500	⑤			
8418 N	69	40.6	48	36...56	32	4.7	■	2.0	3 100	-20...+70	70 000 / 35 000	117 500	④			



Air performance measured according to: ISO 5801.
 Installation category A, without contact protection.
 Note: Total sound power level L_{pA} ISO 10303/2
 measured on a hemisphere with a radius of 2 m.
 Sound pressure level L_p measured at 1 m distance
 from fan axis.
 The values given are applicable only under the specified
 measuring conditions and may differ depending on the
 installation conditions.
 In the event of deviation from the standard configura-
 tion, the parameters must be checked after installation!
 For detailed information see:
<http://www.siemens.com/global/en/products>



ANEXO D: Ficha técnica bomba de aire JAD S-2000.

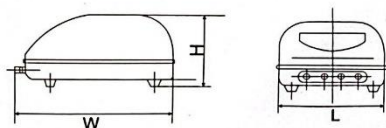
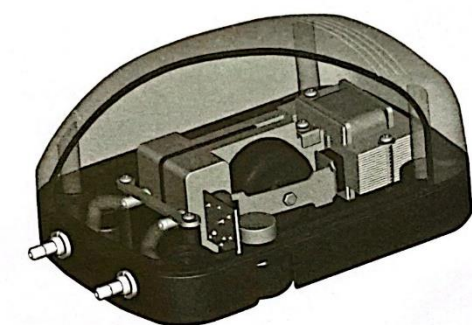


Thank you for purchasing JAD adjustable silent aquarium air-pump. to assure that this product can be safely and correctly used, please read this instruction book carefully before use, and keep it properly for future consultation.

FEATURE

1. with streamline design, it is beautiful and decent. made from ABS plastic, the shell of the body is firm, durable and endures to shock. it has long service lifetime.
2. it is driven by the top-quality motor. the input power can be adjusted with the phase-angle of controllable silicon. with the adjustable exhaust, this device is advanced, reasonable, high-efficiency and energy-saving.
3. All the movable parts are sealed inside the body. Adopting labyrinth-type air-ways and rubber anti-shock cushion, the operation is stable without any noise.
4. the article is produced according to standard and meets concerned national safety stipulations. It is safe and reliable.

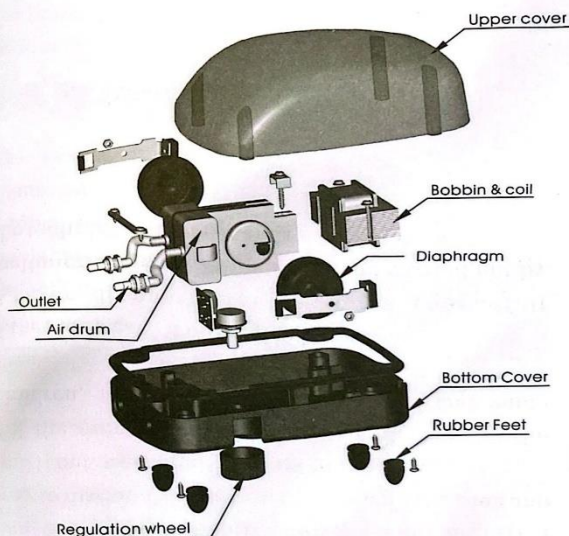
1



MODEL	W	L	H
S-500 S-500A	115	70	55
S-1000 S-1000A	135	80	55
S-2000 S-2000A	163	105	88

3

DESCRIPTION OF PARTS



2

MAIN TECHNICAL DATA

Technical parameters are shown on nameplate of product

APPLICABLE SCOPE

This serial article is a kind of low-pressure & non-oil pump, and the exhaust air is clean. It is suitable for adding oxygen into various aquariums, seafood pools, storage of marine lives seedlings as well as indoor and outdoor decoration of water-column lamps.

HOW TO USE

1. Make sure the voltage and frequency of the power is up to those marked on the nameplate.
2. the pump must be placed higher than max. water-level of the aquarium to prevent water from filling into machine through the exhaust pipe.

4

3.connect the air-pipe into the air-outlet of the pump, and then place air-bubble evenly in the aquarium. after the power is switched on. the pump will start to supply air and oxygen.

4.according to the oxygen quantity necessary for the aquatic animals, abandon one of the air outlet or rotate the potentiometer on same side of the pump and adjust the exhaust to an ideal condition.

5.the air-filter cotton and the bubble stone must be replaced or cleaned every 3 months.

6.when the pump is not is use, disconnect the power, and store the air-pipe and bubble stone in dry place for future use.

CAUTION

1.Never immerse the air-pump into the water.

2.if the pump falls into water by chance, make sure to disconnect the power before touch the pump to

avoid electric shock.

3.if any abnormal condition of the pump is found, disconnect the power immediately. Check out the cause and repair it before using it again. the correct way to disconnect the power is to hold the plug and pull it out, never pull the part of the wire.

4.if the pump can be reached or is used by the children, the parents must supervise and guide them.

5.the pump can't be used below 0℃.

6.never dismantle the pump by yourself if malfunction occurs. repair must be carried out by the technicians in the maintenance station.

ANEXO E: Programación en Arduino IDE.

```
1  #include <Wire.h>
2  #include <LiquidCrystal_I2C.h>
3  #include <DHT.h>
4
5  // -----
6  // CONFIGURACIÓN DE HARDWARE
7  // -----
8  #define DHTPIN 2      // Pin de datos del DHT11
9  #define DHTTYPE DHT11 // Tipo de sensor
10 DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);
11
12 #define RELE_BOMBA 8    // Relé para bomba sumergible
13
14 LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2); // Dirección I2C 0x27 (ajustar si es distinta)
15
16 // -----
17 // VARIABLES DE TIEMPO
18 // -----
19 unsigned long previousMillis = 0;
20 const unsigned long tiempoInicio = 10000;    // 10 segundos
21 const unsigned long tiempoTrabajo = 60000;   // 1 minutos
22 const unsigned long tiempoEspera = 60000;    // 1 minutos
23
24 enum Estado {ESPERA_INICIAL, TRABAJO, DESCANSO};
25 Estado estadoActual = ESPERA_INICIAL;
26
27 void setup() {
28
29     pinMode(RELE_BOMBA, OUTPUT);
30
31     digitalWrite(RELE_BOMBA, HIGH); // Relés apagados
32
33     lcd.init();
```

```

34     lcd.backlight();
35
36     dht.begin();
37
38     lcd.setCursor(0,0);
39     lcd.print("Sistema Ozono");
40     lcd.setCursor(0,1);
41     lcd.print("Iniciando...");
42
43     previousMillis = millis();
44 }
45
46 void loop() {
47     unsigned long currentMillis = millis();
48
49     switch (estadoActual) {
50         case ESPERA_INICIAL:
51             // Mostrar solo mensaje de inicio
52             if (currentMillis - previousMillis >= tiempoInicio) {
53                 previousMillis = currentMillis;
54                 estadoActual = TRABAJO;
55                 digitalWrite(RELE_BOMBA, LOW); // Activar bomba
56             }
57             break;
58
59         case TRABAJO:
60             mostrarDatos("ON "); // Mostrar humedad y temperatura con estado ON
61             if (currentMillis - previousMillis >= tiempoTrabajo) {
62                 previousMillis = currentMillis;
63                 estadoActual = DESCANSO;
64                 digitalWrite(RELE_BOMBA, HIGH);
65             }
66             break;

```

```

67
68     case DESCANSO:
69         mostrarDatos("OFF"); // Mostrar humedad y temperatura con estado OFF
70         if (currentMillis - previousMillis >= tiempoEspera) {
71             previousMillis = currentMillis;
72             estadoActual = TRABAJO;
73             digitalWrite(RELE_BOMBA, LOW);
74         }
75         break;
76     }
77 }
78
79 // -----
80 // FUNCION PARA MOSTRAR DATOS
81 // -----
82 void mostrarDatos(String estado) {
83     float h = dht.readHumidity();
84     float t = dht.readTemperature();
85
86     lcd.setCursor(0,0);
87     lcd.print("H:"); lcd.print(h,1); lcd.print("% ");
88     lcd.setCursor(0,1);
89     lcd.print("T:"); lcd.print(t,1);
90     lcd.write(byte(223)); // Símbolo de grado °
91     lcd.print("C ");
92     lcd.setCursor(12,0);
93     lcd.print(estado);
94 }

```

ANEXO F: Informe de análisis microbiológico de agua de acequia (muestras de entrada y salida).



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

Informe N°: 65 -2025

DATOS DEL CLIENTE

Análisis solicitado por:	Sr. Adrián Revelo
RUC/Ci:	1004807234
Dirección:	Ibarra
Ciudad/Provincia:	Ibarra/Imbabura
Teléfono:	0 996506681
email:	reveloadrian@yahoo.com

DATOS DE LA MUESTRA

Muestras de agua de sequía de Imbaya

Tipo de muestra:	Líquidas	Número de muestras:	2
Fecha de recepción:	04 de diciembre de 2025	Fecha de elaboración:	No aplica
Cantidad:	100 ml c/u	Lote:	No aplica
Tipo de conservación:	Ambiente	Fecha de caducidad:	No aplica
Tipo de envase:	PET estéril	Persona quien muestrea:	Propietario
Tipo de muestreo:	No aplica		

DATOS DE LABORATORIO

Fecha de análisis:	04 de diciembre de 2025
Fecha de entrega informe:	05 de diciembre de 2025
Código interno	No aplica

Resultado Analítico

Parámetro Analizado	Unidad	MUESTRA		Método
		Entrada	Salida	
Rec. Coliformes Totales	UFC/100 ml	< 10	< 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:

Verónica Espinoza

Dra. Verónica Espinoza Torres

Gerente General



ANEXO G: Tabla de análisis de agua residual PTAR-Ibarra.

ANALÍTICAS MICROBIOLÓGICAS					
Origen	Fecha	Dilución	Colonias	Resultado	Parámetro
ENTRADA	15/01/2026	10^{-6}	INC	INC	C. fecales.
ENTRADA	15/01/2026	10^{-6}	INC	INC	C. Totales.
ENTRADA	15/01/2026	10^{-6}	INC	INC	E. Coli.
ENTRADA	15/01/2026	10^{-7}	332	$332 \cdot 10^7$ UFC/100ml	C. Fecales.
ENTRADA	15/01/2026	10^{-7}	248	$248 \cdot 10^7$ UFC/100ml	C. Totales
ENTRADA	15/01/2026	10^{-7}	112	$112 \cdot 10^7$ UFC/100ml	E. Coli.
SALIDA	15/01/2026	10^{-3}	408	$408 \cdot 10^3$ UFC/100ml	C. Fecales
SALIDA	15/01/2026	10^{-3}	392	$392 \cdot 10^3$ UFC/100ml	C. Totales
SALIDA	15/01/2026	10^{-3}	192	$192 \cdot 10^3$ UFC/100ml	E. Coli.
SALIDA	15/01/2026	10^{-4}	98	$98 \cdot 10^3$ UFC/100ml	C. Fecales
SALIDA	15/01/2026	10^{-4}	116	$116 \cdot 10^3$ UFC/100ml	C. Totales
SALIDA	15/01/2026	10^{-4}	36	$36 \cdot 10^3$ UFC/100ml	E. Coli.

ANEXO H: Análisis de laboratorio del agua residual tratada con ozono.



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

Informe N°: 12 -2026

DATOS DEL CLIENTE

Análisis solicitado por:	Sr. Adrián Revelo
RUC/CI:	1004807234
Dirección:	Ibarra
Ciudad/Provincia:	Ibarra/Imbabura
Teléfono:	0 996506681
email:	reveloadrian@yahoo.com

DATOS DE LA MUESTRA

Muestra de agua de sequia	
Tipo de muestra:	Líquida
Fecha de recepción:	26 de enero de 2026
Cantidad:	100 ml c/u
Tipo de conservación:	Ambiente
Tipo de envase:	PET estéril
Tipo de muestreo:	No aplica
Número de muestras:	1
Fecha de elaboración:	No aplica
Lote:	No aplica
Fecha de caducidad:	No aplica
Persona quien muestrea:	Propietario

DATOS DE LABORATORIO

Fecha de análisis:	26 de enero de 2026
Fecha de entrega informe:	28 de enero de 2026
Código interno	No aplica

Parámetro Analizado	Unidad	Resultado	Método
Rec. Coliformes Totales	UFC/100 ml	5	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

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

ANEXO I: Ensamblaje completo del sistema de ozonificación.



ANEXO J: Prueba del equipo con azul de metileno.



ANEXO K: Diseño inicial del equipo de ozonificación.



MANUAL DE USO Y FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE OZONIFICACIÓN

Antes de iniciar el proceso de tratamiento del agua, es importante verificar en la programación los tiempos establecidos para los litros de agua a tratar, una vez verificada la programación, se procede a cerrar con llave el gabinete para iniciar el tratamiento.

Paso 1: Se debe conectar el sistema a 110V junto a la bomba de aire (110V). Es importante la puesta a tierra.

Paso 2: Encender el sistema con el interruptor del lateral izquierdo (color rojo), en esta parte la pantalla muestra la leyenda “Iniciando Sistema..” durante 10 segundos.

Paso 3: Transcurridos los 10 segundos se enciende la bomba sumergible automáticamente y en la pantalla se muestra “ON” y los datos del sensor (temperatura y humedad), en ese momento un operario debe encender de forma manual el generador de ozono presionando el switch (color verde) colocado en la tapa del gabinete.

Paso 4: Se debe esperar el tiempo programado de tratamiento, en este paso es importante no manipular el sistema hasta cumplir el ciclo.

Paso 5: Una vez transcurrido el tiempo de tratamiento, en la pantalla se muestra la leyenda “OFF”, y se procede a apagar de forma manual el generador de ozono (switch color verde). De manera automática se apaga la bomba y la pantalla LCD.

Paso 6: Se procede a apagar completamente el sistema (switch lateral color rojo) para manipular el agua tratada.

CONSIDERACIONES:

- Verificar las conexiones dentro del gabinete antes de usar. Todos los componentes deben estar aislados para su correcto funcionamiento.
- No modificar el código de programación, a menos que sea para el cambio de tiempos de tratamiento. Solicitar ayuda técnica.
- Es importante considerar la puesta a tierra para un buen funcionamiento del sistema.
- El sistema puede presentar fallas en la parte de control debido a los picos de voltaje producidos por la bomba sumergible y el generador de ozono. En este caso se reinicia el sistema apagándolo completamente.
- Realizar el proceso de tratamiento de agua siempre con el gabinete cerrado.
- No manipular los componentes internos del sistema cuando está encendido o conectado a la alimentación.