

Implementación de un sistema automatizado de lavado de manos con recirculación y desinfección con plasma frío.

Yineth Daniela Botina Puerres

Laura Melisa Pineda Paredes

Universidad CESMAG
Facultad de Ingeniería
Programa de Ingeniería Electrónica
San Juan de Pasto
2026

Implementación de un sistema automatizado de lavado de manos con recirculación y desinfección con plasma frío.

Yineth Daniela Botina Puerres

Laura Melisa Pineda Paredes

Informe final de trabajo de grado presentado al Comité Curricular del programa de Ingeniería Electrónica en la modalidad de investigación para obtener el título de ingeniero Electrónico.

Asesor

Edgar Alberto Unigarro Calpa, Ph.D

Universidad CESMAG
Facultad de Ingeniería
Programa de Ingeniería Electrónica
San Juan de Pasto

2026

Nota de Aceptación.

Aprobado por el Comité Curricular en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Universidad CESMAG para optar al título de Ingeniero Electrónico.

Edgar Alberto Unigarro Calpa

Asesor

Jurado

Jurado

San Juan de Pasto, abril 2026

Página de nota de exclusión de responsabilidad intelectual.

“El pensamiento que se expresa en esta obra es exclusivamente responsabilidad de sus autores y no compromete la ideología de la Universidad CESMAG”

Agradecimientos

Este trabajo de grado no habría sido posible sin el aporte de múltiples personas que, a lo largo de nuestra formación, dejaron una huella significativa en nuestro proceso.

En primer lugar, reconocemos el papel fundamental de nuestras familias, quienes, con su apoyo constante, paciencia y confianza nos brindaron la estabilidad necesaria para avanzar y alcanzar este objetivo académico.

De igual manera, valoramos profundamente la labor de todos los docentes que hicieron parte de nuestro pregrado. Su exigencia, orientación y transmisión de conocimiento fueron determinantes en nuestra formación profesional y en la construcción de nuestras capacidades como ingenieras. Destacamos especialmente al profesor Ph. D Edgar Alberto Unigarro Calpa, por su acompañamiento cercano, disposición permanente y orientación durante el desarrollo de este proyecto.

Por último, queremos resaltar el apoyo de nuestros compañeros y amigos, con quienes compartimos este proceso académico. Su compañía, motivación y colaboración hicieron más enriquecedora esta etapa.

Dedicatoria

Este trabajo de grado representa mucho más que un logro académico, es el reflejo de un camino lleno de esfuerzo, aprendizajes y momentos que marcaron profundamente mi vida. Por ello, quiero dedicarlo a las personas que estuvieron a mi lado en cada etapa de este proceso.

A mis padres, por ser el pilar fundamental de todo lo que soy hoy. Gracias por su amor incondicional, por cada sacrificio silencioso y por el apoyo constante que me brindaron incluso en los momentos más difíciles. Su confianza en mí ha sido mi mayor impulso para seguir adelante y no rendirme. Todo este logro es, en gran parte, el resultado de lo que ustedes han sembrado en mí.

A mi hermana, por su compañía y apoyo emocional a lo largo de este camino. Gracias por escucharme, por darme ánimo cuando lo necesitaba y por recordarme que no estaba sola en los momentos de mayor presión. Tu presencia ha sido un refugio y una fuente de fortaleza en este proceso.

A mi pareja, por acompañarme durante toda mi carrera, por su paciencia, comprensión y apoyo constante. Gracias por estar presente en cada etapa, por motivarme a seguir. Tu apoyo ha sido clave para mantenerme firme y alcanzar esta meta.

A mi compañera de tesis, con quien compartí no solo este proyecto, sino también un proceso lleno de retos, aprendizajes y crecimiento. Gracias por tu apoyo incondicional, por tu compromiso y por cada momento en el que supimos impulsarnos mutuamente para salir adelante. Este trabajo es el resultado de nuestro esfuerzo conjunto, pero también el reflejo de una amistad sincera que se fortaleció en el camino.

Este logro no es únicamente mío, sino también de ustedes, quienes han sido parte esencial de este proceso. Cada palabra de aliento, cada gesto de apoyo y cada momento compartido hicieron posible que hoy este sueño se convierta en realidad.

Laura Melisa Pineda Paredes

Dedicatoria

Este logro representa años de esfuerzo, desvelos, aprendizajes, caídas y nuevos comienzos. Es el resultado de una etapa llena de retos, crecimiento personal y sueños que poco a poco se fueron haciendo realidad. Por todo lo vivido, por cada momento que me formó y me sostuvo, quiero dedicar este trabajo a las personas que hicieron parte fundamental de este camino.

A mis padres, Luis Bolívar Botina y Lidia Esperanza, por acompañarme en cada etapa de este camino con amor incondicional y apoyo constante. Gracias por creer en mí, por estar presentes en cada decisión, en cada logro y también en cada momento difícil. Son mi mayor orgullo y mi motor de vida, todo lo que hoy soy es el reflejo de su esfuerzo, paciencia y amor.

A mi hermano, Johan Botina, por ser ese apoyo incondicional. Por acompañarme y por recordarme que, sin importar las circunstancias, siempre puedo contar contigo. Tu presencia ha sido un respaldo constante en este proceso.

A mi pareja, Luis Miguel Díaz, por ser un pilar fundamental en mi vida. Gracias por estar a mi lado en los momentos más difíciles, por sostenerme cuando sentía que no podía más y por creer en mí incluso cuando yo perdía la confianza. Gracias por ser refugio, motivación y calma en medio del caos. Este logro también es tuyo, porque estuviste en cada caída, en cada intento y en cada pequeño avance hacia este sueño.

A mi mascota “Molly”, mi compañera fiel desde el inicio de mi carrera. Gracias por acompañarme en tantas noches de estudio y traspasado, por estar a mi lado sin pedir nada a cambio, brindándome calma en medio del cansancio. Has sido compañía, tranquilidad y una presencia silenciosa pero constante en este recorrido, al igual que mi mascota “Laykans” pues aunque no convivimos diariamente, siempre ha sido una motivación especial.

A mi compañera de tesis, Laura Pineda, por convertirse en una amiga incondicional y una gran compañera de camino. Gracias por el apoyo mutuo, por la paciencia y por los esfuerzos compartidos para llegar hasta el final de este proceso. Juntas aprendimos, crecimos y superamos cada desafío.

A cada uno de ustedes, mi más profundo agradecimiento. Sin su apoyo, este logro no habría sido posible. Hoy cierro esta etapa con el corazón lleno de gratitud y emoción.

Yineth Daniela Botina Puerres

Contenido

Lista de Figuras	12
Lista de Tablas	14
Introducción	15
1. El Problema de Investigación	17
1.1 Objeto o tema de investigación.....	17
1.2 Línea de Investigación.	17
1.3 Sub-línea de Investigación.....	17
1.4 Planteamiento o Descripción del Problema.	17
1.5 Formulación del problema.	19
1.6 Objetivos.	19
1.6.1 Objetivo General.....	19
1.6.2 Objetivos Específicos.....	19
1.7 Justificación.	19
1.8 Delimitación.....	20
2. Tópicos del Marco Teórico	22
2.1 Antecedentes.	22
2.1.1 Water Reuse: Issues, Technologies, and Applications.	22
2.1.2 Angewandte Chemie International Edition.....	23
2.1.3 Characteristics of Grey Wastewater.	24
2.1.4 Plasma-Based Water Treatment: Efficient Transformation of Contaminants.	25
2.1.5 Sterilization of Water Using Dielectric Barrier Discharge at Atmospheric	26
Pressure.	26

2.1.6	Aqueous-Phase Chemistry and Bactericidal Effects from an Air Discharge Plasma in Contact with Water: Evidence for Long-Lived Plasma-Induced Species.	26
2.1.7	Reconfigurable Smart Water Quality Monitoring System in IoT Environment.	27
2.1.8	Design of a Prototype of Water Purification by Plasma Technology as the Foundation for an Industrial Wastewater Plant.....	28
2.1.9	Deployment of a Smart Handwashing Station in a School Setting During the COVID-19 Pandemic: Field Study.	29
2.1.10	Evaluating automatic hand hygiene monitoring systems: A scoping review	30
2.1.11	Design of Automatic Hand Sanitizer System Compatible with Various Containers.	31
2.1.12	Development of a Sustainable Automated Hand Washing System with an Installed Water Recycling Device.....	32
2.2	Supuestos Teóricos de la investigación.....	33
2.2.1	Desinfección microbiológica del agua.....	33
2.2.2	Parámetros fisicoquímicos asociados a la calidad del agua.....	33
2.2.3	Índice de Riesgo de la Calidad del Agua	34
2.2.4	Generación de Plasma Frío	36
2.2.5	Desinfección con Plasma	37
2.2.6	Reutilización de Agua.....	37
2.2.7	Aguas Grises	38
2.2.8	Sistema de Recirculación de agua.....	38
2.3	Variables de estudio.	39
2.3.1	Definición nominal de las variables.....	39
2.3.2	Definición operativa de las variables	39
2.4	Formulación de hipótesis	40

3.	Metodología.....	41
3.1	Enfoque.....	41
3.2	Paradigma.....	41
3.3	Método.....	41
3.4	Tipo de investigación.....	42
3.5	Diseño de investigación.....	42
3.6	Población.....	42
3.7	Muestra.....	43
3.8	Técnicas de recolección de la información.....	43
3.9	Validez de las técnicas de recolección de la información.....	43
3.10	Confiabilidad de las técnicas de recolección.....	44
4.	Resultados.....	45
4.1	Diseño de un sistema de lavado de manos con recirculación y desinfección con plasma frío. 45	
4.1.1	Diseño estructural del sistema de lavado de manos.....	45
4.1.2	Diseño Electrónico del sistema de lavado de manos.....	49
4.2	Implementación del sistema de lavado de manos con recirculación y desinfección con plasma frío.....	57
4.2.1	Implementación estructural del lavamanos.....	57
4.2.2	Implementación electrónica del sistema de lavado de manos.....	62
4.3	Presentación de resultados de las muestras experimentales del proceso de calibración. 67	
4.3.1	Pruebas de observación directa.....	72
4.3.2	Pruebas de medición.....	74
5.	Análisis y discusión de resultados.....	88
5.1	Análisis pruebas de laboratorio.....	88

5.2	Validez y Confiabilidad de los datos experimentales	92
5.3	Determinación Operativa de la Eficacia de Desinfección	92
5.4	Validación de Hipótesis y Respuesta al Problema	93
5.5	Análisis Comparativo IRCA.....	94
	Conclusiones	96
	Recomendaciones.....	97
	Trabajos futuros.....	98
	Referencias	99
	Anexos	103

Lista de Figuras

Figura 1. Implementación del sistema de monitoreo de calidad de agua.....	28
Figura 2 Prototipo de reactor propuesto para la purificación de agua	29
Figura 3 Estación de lavado de manos sobre soporte con una tableta conectada para mostrar imágenes.	30
Figura 4 Sistema de desinfección automática.	31
Figura 5 Diseño CAD de la máquina de lavado de manos.	33
Figura 6 Clasificación del nivel de riesgo en salud según el IRCA por muestra y el IRCA mensual y acciones que deben adelantarse	36
Figura 7 Diseño estructural del lavamanos en openSCAD.....	46
Figura 8 Diseño Hidráulico para la recirculación de agua.....	47
Figura 9 Cámara de ionización	48
Figura 10 Electrodo.....	49
Figura 11 Circuito de generación de plasma frio.	50
Figura 12 Capacitancia e impedancia	51
Figura 13 Diagrama de flujo del proceso de control y automatización del sistema de lavado de manos con recirculación de agua.....	56
Figura 14 Implementación de la estructura del lavamanos.....	58
Figura 15 Sistema de recirculación de agua.....	60
Figura 16 Cámara de ionización	61
Figura 17 Implementación de Generación de plasma frio	62
Figura 18 Circuito generador de plasma frio	63
Figura 19 Circuito automatización y control del sistema.....	64
Figura 20 Implementación de circuito de automatización y control del sistema.....	65
Figura 21 Recolección de muestras de agua de los niños del hogar infantil.....	69
Figura 22 Muestra de agua sucia.....	73
Figura 23 Muestra de agua después del plasma.	74
Figura 24 Tirilla de pH agua sin tratamiento	76
Figura 25 Tirilla de pH agua tratada con plasma frio	78
Figura 26 Calibración y análisis de regresión lineal del sensor de pH (Voltaje vs. pH)...	80

Figura 27 Calibración y análisis de regresión polinómica del sensor de turbidez (ADC vs. NTU).....	84
Figura 28 Resultados de IRCA para agua domiciliaria, agua residual antes del tratamiento y agua posterior al proceso de filtración y desinfección mediante plasma frío	94

Lista de Tablas

Tabla 1 Puntaje de riesgo según la resolución 2115 de 2007	35
Tabla 2 Resultados de muestras experimentales en pH	70
Tabla 3 Resultados de muestras experimentales en turbidez	71
Tabla 4 Resultados de las muestras Intermedias de pH con tirillas	77
Tabla 5 Lecturas con las soluciones patrones de pH.....	79
Tabla 6 Resultados de la muestra de pH del agua en diferentes tiempos con el sensor....	81
Tabla 7 Lecturas experimentales del sensor de turbidez para diferentes valores de ADC.83	83
Tabla 8 Resultados de la muestra de agua en diferentes tiempos de turbidez con el sensor	85
Tabla 9 Recuperación volumétrica del sistema.	86
Tabla 10 Comparación de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del agua domiciliaria, agua residual sin tratamiento y agua tratada mediante desinfección con plasma frío.	90
Tabla 11 Comparación de puntaje de riego asociado a cada característica de calidad de agua domiciliaria, agua residual sin tratamiento y agua tratada mediante desinfección con plasma frío.....	91

Introducción

La higiene de manos es una medida esencial en la prevención de la propagación de enfermedades infecciosas. Las prácticas efectivas de lavado de manos reducen significativamente la transmisión de patógenos responsables de enfermedades como la diarrea, infecciones respiratorias y otras afecciones contagiosas. Sin embargo, el método tradicional de lavado de manos consume una cantidad considerable de agua, lo que representa un desafío en regiones donde la escasez hídrica es prevalente. En Colombia, esta problemática se agrava por cuestiones de salud pública y limitaciones en los recursos hídricos, lo que subraya la necesidad de soluciones innovadoras que aborden tanto la higiene como el uso sostenible del agua.

El país enfrenta desafíos sanitarios significativos debido a prácticas inadecuadas de higiene de manos. La prevalencia de enfermedades transmitidas por una higiene deficiente contribuye a altas tasas de morbilidad y mortalidad, especialmente entre los niños. Según el Instituto Nacional de Salud [1], enfermedades como la diarrea y las infecciones respiratorias figuran entre las principales causas de enfermedad y muerte en Colombia. Paralelamente, la escasez de agua es una preocupación apremiante, exacerbada por fenómenos climáticos como El Niño y limitaciones infraestructurales que restringen el acceso al agua potable en diversas regiones [2]. La conjunción de estos problemas de salud y medioambientales exige el desarrollo de sistemas que promuevan una higiene de manos efectiva al tiempo que conservan los recursos hídricos.

La solución implicó la implementación de un sistema de lavado de manos que permitió la reutilización del agua e incorporó métodos avanzados de desinfección. Un componente central de este sistema es el uso de tecnología de plasma frío para la desinfección del agua. El plasma frío genera especies reactivas capaces de inactivar una amplia gama de patógenos, incluyendo bacterias y virus, sin necesidad de aditivos químicos [3]. Esta tecnología garantiza que el agua reutilizada sea desinfectada de manera segura, haciéndola apta para ciclos repetidos de lavado de manos. La integración de sistemas de filtración de agua complementa este proceso, eliminando partículas y posibles contaminantes.

La automatización y los sistemas de control son componentes integrales de la solución propuesta, aplicando principios de ingeniería electrónica para optimizar el uso del agua y la eficacia del sistema. Se emplean sensores para monitorear parámetros de calidad del agua, como turbidez, pH y niveles de desinfectante residual. Se utilizó un sistema de automatización para procesar estos datos y regular la operación del generador de plasma y las válvulas de control,

asegurando una desinfección efectiva y la conservación del agua. De igual manera, sensores de presencia activan el sistema solo cuando es necesario, reduciendo el flujo de agua innecesario. Mecanismos de retroalimentación y monitoreo en tiempo real permiten respuestas adaptativas a condiciones cambiantes, mejorando la confiabilidad y seguridad del sistema.

El impacto de este proyecto se extiende tanto a la salud pública como a la sostenibilidad ambiental. Al proporcionar un sistema de lavado de manos efectivo que minimiza el consumo de agua, se puede reducir la incidencia de enfermedades asociadas con una higiene de manos deficiente, particularmente en áreas con acceso limitado al agua potable. La adaptabilidad del sistema permite su implementación en diversos entornos, incluyendo hogares, escuelas, instalaciones de salud y espacios públicos. Desde el punto de vista ambiental, la reducción en el uso de agua contribuye a los esfuerzos de conservación de recursos, abordando las preocupaciones de escasez hídrica prevalentes en Colombia.

1. El Problema de Investigación

1.1 Objeto o tema de investigación.

Sistema automatizado de lavado de manos que integre tecnologías de recirculación de agua y desinfección mediante plasma frío.

1.2 Línea de Investigación.

Sistema de automatización y control. La línea de sistemas de automatización y control de la Universidad CESMAG desarrolla procesos investigativos orientados al modelamiento, simulación, diseño, desarrollo y evaluación de algoritmos de control, sistemas de control, sistemas inteligentes, control de procesos industriales, sistemas embebidos, acondicionamiento y procesamiento de señales, robótica, domótica e inteligencia artificial [4].

1.3 Sub-línea de Investigación.

Control de procesos. Estudia el diseño e implementación de controladores que permitan regular las variables de un sistema o proceso con el fin de lograr un funcionamiento deseado, buscando mejorar la productividad y la eficiencia de los procesos, como también la reducción de costos de implementación y el impacto ambiental del mismo. Entre las temáticas que aborda la línea se encuentran el control en procesos industriales, sistemas inteligentes y control visual [4].

1.4 Planteamiento o Descripción del Problema.

El consumo excesivo de agua durante el lavado de manos plantea un desafío crucial para la sostenibilidad ambiental, especialmente en regiones con escasez hídrica. En Colombia, aproximadamente el 8% de la población carece de acceso a fuentes mejoradas de agua potable, cifra que aumenta al 27% en las zonas rurales, según el Departamento Administrativo Nacional de Estadística [5]. Esta falta de acceso dificulta la adopción de prácticas higiénicas adecuadas y eleva el riesgo de enfermedades asociadas a la deficiente higiene. Además, el cambio climático y fenómenos como El Niño han agravado los problemas de sequía y escasez de agua en el país. El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales indica que cerca del 50% del territorio nacional presenta algún nivel de vulnerabilidad hídrica, y más de 300 municipios

enfrentan riesgos de desabastecimiento que han llevado a implementar racionamientos y restricciones en el uso del agua [2], [6].

En espacios de alta afluencia, como centros educativos, universidades y centros comerciales, el consumo de agua puede oscilar entre 2,000 y 5,000 litros diarios por cada 100 personas, lo que representa un gran desafío para la sostenibilidad hídrica en áreas con problemas de abastecimiento [7]. El consumo de agua durante el lavado de manos varía considerablemente según las prácticas de los usuarios y el tipo de grifo empleado; se estima que un lavado estándar, con el grifo abierto durante todo el proceso, requiere entre 1 y 1.5 litros de agua por persona [8].

En Colombia, muchas comunidades enfrentan dificultades para acceder a agua limpia y segura, lo cual limita la implementación de prácticas higiénicas adecuadas y aumenta el riesgo de propagación de enfermedades infecciosas [9]. Patologías como las enfermedades diarreicas, que representan aproximadamente el 9% de las muertes en niños menores de cinco años en el país [1], y las infecciones respiratorias agudas, contribuyen significativamente a la morbilidad infantil. Asimismo, afecciones como la hepatitis A y enfermedades cutáneas se transmiten mediante el contacto con superficies contaminadas. Estas condiciones no solo afectan la salud de la población, sino que también impactan la desnutrición infantil; la Encuesta Nacional de Situación Nutricional indica que la desnutrición crónica afecta al 10.8% de los niños menores de cinco años, una cifra influenciada por enfermedades que dificultan la absorción de nutrientes [10].

La integración de tecnologías de recirculación de agua en un sistema automatizado de lavado de manos requiere superar desafíos técnicos relacionados con el control preciso de los procesos de desinfección, garantizando su eficacia y facilidad de uso. El desarrollo de un sistema que combine eficazmente la recirculación del agua y la desinfección mediante plasma frío implica el uso de tecnologías avanzadas de control y automatización. Aunque el plasma frío ha demostrado eficacia en procesos de desinfección y esterilización, gracias a que genera especies reactivas capaces de eliminar microorganismos sin alterar significativamente las propiedades físicas del agua, su aplicación en sistemas de lavado de manos con recirculación aún no ha sido validada experimentalmente.

Otro desafío es asegurar la usabilidad y aceptación del sistema por parte de los usuarios, este debe ser intuitivo y preservar la experiencia tradicional de lavado de manos, generando confianza en su eficacia desinfectante.

Se desconoce aún la eficacia real de la recirculación con desinfección por plasma frío en sistemas de lavado de manos, ya que no se han realizado estudios experimentales completos en este contexto. Dichos estudios deberían evaluar la capacidad del método para reducir el consumo de agua y asegurar condiciones higiénicas adecuadas de manera consistente y fiable.

1.5 Formulación del problema.

¿Cuál es la eficacia del proceso de desinfección del agua mediante plasma frío en un sistema automatizado de lavado de manos con recirculación?

1.6 Objetivos.

1.6.1 Objetivo General.

Evaluar la eficacia del proceso de desinfección del agua mediante plasma frío en un sistema automatizado de lavado de manos con recirculación.

1.6.2 Objetivos Específicos.

- Diseñar un sistema automatizado de lavado de manos con recirculación de agua que integre un módulo de desinfección mediante plasma frío.
- Implementar un sistema automatizado de lavado de manos con recirculación de agua que integre un módulo de desinfección mediante plasma frío.
- Analizar la eficacia del proceso de desinfección del agua, comparando parámetros fisicoquímicos del agua antes y después del tratamiento.

1.7 Justificación.

La higiene de manos constituye un elemento esencial en la prevención de enfermedades infecciosas y en la promoción de la salud pública [11], por ello se plantea la implementación de un sistema innovador que permita la desinfección efectiva de las manos, minimizando y reutilizando el agua utilizada en el proceso. La recirculación y reutilización del agua empleada en el lavado de manos surge como una alternativa viable para mitigar el desperdicio hídrico, al ofrecer una solución que podría reducir significativamente el consumo de agua potable [12].

Ante este panorama, es imperativo desarrollar soluciones tecnológicas automáticas que aborden simultáneamente los desafíos de salud pública y sostenibilidad ambiental. La propuesta de un sistema de lavado de manos que reutiliza el agua y emplea tecnología de plasma frío se presenta como una solución para inactivar eficientemente bacterias y virus sin necesidad de utilizar productos químicos adicionales [13]. Este sistema permite un ahorro significativo de agua al reutilizarla para múltiples usuarios, reduce considerablemente el consumo total y ofrece una desinfección eficaz mediante la generación de especies reactivas con propiedades antimicrobianas. Además, al minimizar el uso de productos químicos y controlar la generación de compuestos potencialmente nocivos, se garantiza la seguridad del usuario y se promueve la sostenibilidad ambiental.

La implementación de este sistema tiene un impacto directo en la mejora de la salud pública, al facilitar prácticas de higiene eficientes y accesibles, contribuyendo a reducir la incidencia de enfermedades infecciosas y la tasa de mortalidad infantil asociada. Asimismo, la conservación de los recursos hídricos ayuda a preservar un recurso vital y a mitigar los efectos de la escasez hídrica en comunidades vulnerables. Este proyecto ofreció una solución integral que beneficia a la sociedad en la necesidad de abordar problemas críticos de salud pública y sostenibilidad ambiental en Colombia, como también una oportunidad para aplicar conocimientos en el diseño de sistemas de control y automatización, desarrollo de tecnologías de plasma frío e integración de sensores, asegurando la calidad del agua y la seguridad del sistema.

1.8 Delimitación.

El presente proyecto se enfocó el desarrollo de un prototipo a escala real de un sistema automatizado de lavado de manos con recirculación y desinfección mediante plasma frío, con un sistema de generación de el mismo con electrodos de vidrio, integrándose en el proceso de desinfección del agua recirculada.

Los principales componentes y consideraciones del prototipo son:

- Sistema de Recirculación de Agua: Se diseñó un circuito cerrado que permite la reutilización del agua utilizada en el lavado de manos. Incluyó bombas, tuberías y válvulas necesarias para asegurar un flujo adecuado y controlado del agua.
- Desinfección mediante Plasma Frío: El agua recirculada se llevó a el generador de plasma frío, donde se expuso a especies reactivas capaces de inactivar

microorganismos patógenos. Se calibran los parámetros operativos para maximizar la eficacia desinfectante sin comprometer la seguridad.

- **Sistemas de Control y Automatización:** Se desarrolló un sistema de control automático en lazo cerrado, basado en un microcontrolador, encargado de gestionar el funcionamiento del prototipo. El sistema regula variables como el flujo de agua, el tiempo de activación del generador de plasma y el nivel de agua en el tanque de recirculación, a partir de señales provenientes de sensores de presencia y calidad del agua. El control implementado es de tipo discreto basado en eventos (ON/OFF), donde la activación del sistema se produce mediante la detección de presencia del usuario, y la operación del generador de plasma se ejecuta durante un tiempo determinado previamente calibrado para garantizar la desinfección. Adicionalmente, se emplean mecanismos de retroalimentación mediante sensores para supervisar el estado del sistema y asegurar condiciones adecuadas de operación.

La delimitación del prototipo contempla su capacidad para realizar un solo ciclo de lavado de manos, lo que permite centrar el proyecto en la prueba de concepto y en la resolución de desafíos técnicos específicos, validando la funcionalidad y eficacia del proceso de desinfección en condiciones controladas. Además, esta delimitación es coherente con los recursos disponibles y tiempo establecido para el proyecto, asegurando su viabilidad y la obtención de resultados significativos que puedan servir de base para desarrollos posteriores y escalamiento del sistema.

2. Tópicos del Marco Teórico

2.1 Antecedentes.

2.1.1 Water Reuse: Issues, Technologies, and Applications.

En [12] se destaca la importancia de aprovechar aguas residuales tratadas para usos no potables, como la irrigación agrícola, usos industriales, recreativos y la recarga de acuíferos. El objetivo es extender las fuentes de agua disponibles frente a la situación de escasez de agua. Además, se analizan tecnologías avanzadas de tratamiento, como la eliminación de patógenos con desinfección por cloro, radiación ultravioleta (UV) y ozonización, contaminantes disueltos con ósmosis inversa (RO), nanofiltración (NF) e intercambio iónico y materia en suspensión con filtración por membrana, sedimentación y flotación y coagulación-floculación, garantizando una alta calidad del agua reutilizada. También uno de los enfoques interesantes que se mencionan en la reutilización de agua son los proyectos a pequeña escala, particularmente el uso de sistemas descentralizados que permiten tratar y reutilizar aguas residuales en ubicaciones específicas, como edificios o comunidades pequeñas, sin la necesidad de conectarse a una gran infraestructura centralizada. Algunas fórmulas fundamentales que se plantean en el libro para evaluar la capacidad de los sistemas de tratamiento en la reutilización de aguas y garantizar el cumplimiento de estándares de calidad son:

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

Donde:

V es el volumen total de agua tratada (m³).

t es el tiempo de retención hidráulico (días).

Q es el flujo de diseño del tratamiento de aguas residuales (m³/día).

$$E = \frac{C_{entrada} - C_{salida}}{C_{entrada}} \times 100 \quad (2)$$

Donde:

$C_{entrada}$ es la concentración de contaminante en el agua entrante.

C_{salida} es la concentración de contaminante en el agua tratada.

E es la tasa de eliminación de contaminantes.

$$D = C \times t \quad (3)$$

Donde:

C es concentración de desinfectante.

t es el tiempo de contacto.

D es la dosis de desinfección.

Esta fórmula se usa para calcular la efectividad del desinfectante en la eliminación de patógenos en el agua.

2.1.2 **Angewandte Chemie International Edition.**

En [14] se menciona que las membranas sintéticas utilizadas en la purificación del agua, con un enfoque en su desarrollo, aplicaciones actuales y futuras mejoras. La ósmosis inversa (RO) se presenta como la tecnología dominante para la desalinización, transformando el agua de mar en agua potable con menor consumo energético en comparación con décadas anteriores. Otras tecnologías de membranas como la microfiltración (MF) y la ultrafiltración (UF) son clave en el tratamiento de aguas residuales y como pretratamiento de procesos de RO. Las membranas sintéticas tienen aplicaciones amplias en diversas industrias, incluidas la química, biotecnología y farmacéutica, además de su creciente importancia en la separación de gases y tratamientos biomédicos como la hemodiálisis. El documento expone importantes mejoras en las propiedades

de las membranas, pero aún es necesario reducir los costos energéticos y mejorar las propiedades de separación. Algunas fórmulas y modelos usados para analizar el rendimiento de las membranas en términos de separación y control de la transferencia de masa son:

$$P_w = \frac{Q}{a \times \Delta P} \quad (4)$$

Donde:

- P_w es la permeabilidad al agua ($L/m^2 \cdot h \cdot bar$),
- Q es el flujo volumétrico (L/h),
- A es el área de la membrana (m^2),
- ΔP es la diferencia de presión (bar).

$$k = \frac{D}{\delta} \quad (5)$$

Donde:

- D es el coeficiente de difusión.
- δ es el espesor de la capa límite.
- k es el coeficiente de transferencia de masa.

2.1.3 Characteristics of Grey Wastewater.

En [15] se abarca el tema sobre el uso de aguas grises, que son aquellas aguas residuales generadas en hogares u otros edificios, excluyendo las aguas de inodoros. Estas aguas provienen de lavabos, duchas, bañeras, lavadoras y fregaderos de cocina, la calidad de esta agua varía según la fuente (baño, cocina, lavandería) y puede incluir detergentes, grasas, aceites y microorganismos patógenos. La reutilización de aguas grises ha despertado interés en países con escasez de agua o por razones ambientales y económicas ya que requiere tratamiento previo para evitar riesgos de salud, como la proliferación de microorganismos. Para el tratamiento de estas aguas es necesario caracterizarlas en términos de parámetros físicos (turbidez, temperatura, sólidos en suspensión), químicos (pH, demanda biológica y química de oxígeno) y biológicos (contenido microbiano). El riesgo de enfermedades debido a microorganismos es una preocupación principal si las aguas

grises se reutilizan sin tratamiento adecuado, aquí se mencionan directrices para la calidad del agua reutilizada en algunos países. Además, mencionan también algunos proyectos que han evaluado la reutilización exitosa de aguas grises en lugares como Alemania, donde se ha utilizado para la descarga de inodoros y riego con un sistema dual.

La reutilización y filtrado de agua a pequeña escala es una solución sostenible para reducir el consumo de agua en aplicaciones domésticas y públicas. Los sistemas portátiles de tratamiento de agua permiten reciclar y reutilizar el agua de manera eficiente, contribuyendo a la conservación de este recurso vital. Desde la ingeniería electrónica, estos sistemas integran sensores para monitorear la calidad del agua y controladores para gestionar procesos de filtración y desinfección.

2.1.4 Plasma-Based Water Treatment: Efficient Transformation of Contaminants.

En [16] se mencionan temas sobre el tratamiento de agua con plasma para la eliminación eficiente de sustancias perfluoroalquiladas (PFAS), como el ácido perfluorooctanoico (PFOA) y el perfluorooctano sulfonato (PFOS). Para realizar sus experimentos, se utilizaron tres tipos de reactores: descarga líquida, descarga en gas con burbujeo y chorro laminar con burbujeo (LJB). El reactor LJB mostró ser el más efectivo para eliminar PFAS debido a su configuración que permite una mejor mezcla y contacto con el plasma, los experimentos se realizaron variando parámetros operacionales como la frecuencia de descarga, el voltaje de descarga y la capacitancia, para optimizar la productividad del proceso.

En el presente se evalúa la capacidad de eliminación de PFOA utilizando la constante de velocidad de eliminación de primer orden (k_{obs}) normalizada por la densidad de potencia (PD). La capacidad de defluoración se calculó usando $F50/t50$, que representa la tasa de defluoración. Para su verificación de usos. Se realizó comparaciones de comportamientos entre métodos que incluyeron, tratamientos electroquímicos, persulfato activado, sonólisis y descarga en burbujas de oxígeno, con el proceso de plasma demostrando ser más eficaz en muchos casos. El uso de plasma muestra una gran versatilidad y capacidad en la eliminación de contaminantes persistentes del agua, con ajustes en los parámetros del reactor para optimizar la capacidad de eliminación y el tratamiento de diferentes concentraciones de contaminantes.

2.1.5 Sterilization of Water Using Dielectric Barrier Discharge at Atmospheric Pressure.

En [13] se aborda la esterilización de agua utilizando plasma de descarga de barrera dieléctrica (DBD) a presión atmosférica. Se investigaron los efectos del plasma en la eliminación de bacterias como *Bacillus subtilis* y *E. coli*, demostrando que el método es eficaz en tiempos más cortos y a temperaturas más bajas en comparación con métodos convencionales. Se utilizaron dos tipos de reactores: uno con descarga DBD para esterilización en seco y húmedo, y otro con un sistema tipo cinta transportadora para aplicaciones continuas. Los reactores incluyen electrodos de alta tensión y barreras dieléctricas que previenen la formación de arcos y favorecen una excitación no térmica del plasma, en el documento se mencionan parámetros eléctricos como el voltaje de pico (24.6 kVp-p), la frecuencia de operación (34.6 kHz) y la potencia de entrada (230 W) necesarios para generar la descarga de plasma. El documento también menciona la importancia de ajustar estos parámetros para optimizar la capacidad de la esterilización, y se usa la siguiente fórmula para determinar el efecto de esterilización:

$$\text{Efecto de esterilización} = \log_{10} \left(\frac{CFU_{inicial}}{CFU_{final}} \right) \quad (6)$$

Se realizaron experimentos comparando métodos seco y húmedo, demostrando que la adición de agua mejora la esterilización al generar radicales OH que son oxidantes efectivos y en el sistema de esterilización con cinta transportadora mostró potencial para aplicaciones prácticas, reduciendo significativamente la cantidad de bacterias en menos de 2 segundos.

2.1.6 Aqueous-Phase Chemistry and Bactericidal Effects from an Air Discharge Plasma in Contact with Water: Evidence for Long-Lived Plasma-Induced Species.

En [17] se centran en la química del agua tratada con plasma y los efectos bactericidas de la descarga de plasma en contacto con el agua. Aquí utilizan un reactor de descarga pulsada en contacto con la superficie del agua, con un electrodo de alta tensión de carbono vítreo y un electrodo de tierra de acero inoxidable, y la descarga de plasma para generar especies reactivas de oxígeno (ROS) y especies reactivas de nitrógeno (RNS) en la interfaz gas-líquido, las cuales tienen

efectos químicos y biocidas. Se menciona el uso de voltajes de pulso de hasta 27 kV y frecuencias de repetición de 50 Hz, así como la medición de formas de onda de voltaje y corriente, también menciona el uso de divisores de voltaje capacitivos y bobinas Rogowski para medir la evolución temporal del voltaje y la corriente en el sistema de descarga.

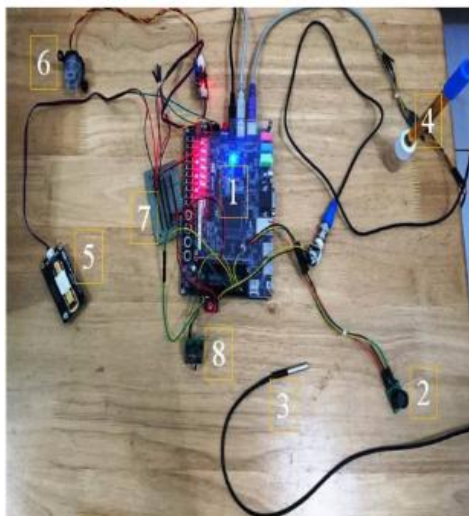
Se realizaron experimentos con variaciones en el pH (3.3, 6.9, 10.1) y atmósferas para evaluar la inactivación de bacterias *E. coli* y la degradación de fenol. El documento destaca la compleja química inducida por el plasma en agua y su potencial para aplicaciones biológicas y médicas, centrándose en las interacciones de ROS y RNS, aunque el documento se centra principalmente en la química del agua tratada con plasma y sus efectos biocidas, la presencia de ingeniería electrónica es un apoyo para el desarrollo y la operación del sistema de plasma.

El plasma frío es una tecnología emergente que utiliza gases ionizados a bajas temperaturas para generar especies reactivas capaces de eliminar microorganismos y contaminantes químicos del agua. Su aplicación en sistemas de purificación ofrece ventajas como la desinfección efectiva sin residuos químicos y la posibilidad de integración en sistemas compactos. Desde la perspectiva de ingeniería electrónica, se requiere el desarrollo de fuentes de alto voltaje y frecuencia controlada, así como el diseño de electrodos y reactores adecuados.

2.1.7 Reconfigurable Smart Water Quality Monitoring System in IoT Environment.

En [18] se centran en el desarrollo de un sistema inteligente para la monitorización de la calidad del agua usando Internet de las Cosas (IoT) y redes de sensores inalámbricos (WSN). El sistema utiliza una tarjeta FPGA programada, sensores para medir parámetros del agua como temperatura del agua ($\pm 0.5^\circ\text{C}$ de precisión), nivel del agua con un sensor ultrasónico, pH utilizando un circuito EZO y turbidez para determinar la claridad del agua y un módulo de comunicación Zigbee para la transmisión de datos en tiempo real, los cuales, todos estos elementos se pueden observar en la figura 1. La arquitectura permite la supervisión remota con bajo consumo de energía y costos reducidos. La plataforma Grafana visualizó los datos en tiempo real, lo que facilitó la supervisión continua y la gestión medioambiental de Agua Industrial con Plasma.

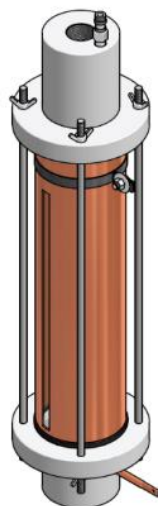
Figura 1 Implementación del sistema de monitoreo de calidad de agua.



2.1.8 Design of a Prototype of Water Purification by Plasma Technology as the Foundation for an Industrial Wastewater Plant

En [19] se presenta el diseño de un prototipo para la purificación de agua industrial utilizando tecnología de plasma observado en la figura 2, enfocado en el uso de descargas eléctricas para generar especies químicas activas y eliminar patógenos y contaminantes. El reactor de descarga de barrera dieléctrica el cual está elaborado con electrodos de cobre, una barrera dieléctrica de vidrio de borosilicato, una bomba y una boquilla para generar la mezcla líquido-gas y convertirla en plasma, este utiliza electrodos coaxiales y el plasma no térmico, lo cual permite el tratamiento sin un aumento significativo de la temperatura. En este diseño utilizaron fuentes de alimentación de 20 kV y frecuencias entre 20-70 kHz, ajustando la intensidad del campo eléctrico para maximizar la ionización del agua. Este sistema se propone como una alternativa más eficiente y compacta frente a los tratamientos tradicionales de tratamiento de aguas residuales industriales, con la posibilidad de sustituir los tratamientos terciarios y, en algunos casos, secundarios, además, los costos se compararon con plantas de tratamiento convencionales, mostrando un ahorro potencial del 20% en la inversión inicial.

Figura 2. Prototipo de reactor propuesto para la purificación de agua.



2.1.9 Deployment of a Smart Handwashing Station in a School Setting During the COVID-19 Pandemic: Field Study.

En [20] se desarrolló una estación inteligente para lavado de manos que utiliza luz ultravioleta (UV) y una cámara digital para proporcionar retroalimentación personalizada sobre la higiene de manos, su diseño se puede observar en la figura 3. El proyecto incluyó un sensor de presión, luz UV, una cámara digital y un software para capturar imágenes con marcas de tiempo, también se usó una crema fluorescente que permitió visualizar áreas no lavadas adecuadamente bajo la luz UV y los datos se recopilaron en una tableta conectada al dispositivo y se evaluaron aspectos de seguridad, como la emisión de radiación UV monitoreada y la temperatura del dispositivo que estaba medida con un termómetro infrarrojo para asegurar que no hubiera riesgos de sobrecalentamiento.

Primero, la crema fluorescente era aplicada antes del lavado, luego, la estación contaba con un sensor de presión que registraba la presencia del usuario en el dispositivo. Cada vez que alguien se paraba en el sensor, se tomaban fotos en intervalos de 5 segundos capturando imágenes de las manos de los usuarios permitiendo identificar áreas no lavadas adecuadamente bajo la luz UV. El sistema también registraba la cantidad de veces que se usaba la estación. El proyecto fue desplegado en una escuela en Australia durante diez días, registrando más de 1138 usos. Los resultados mostraron que el sistema ayudó a resaltar las áreas omitidas en el lavado,

proporcionando datos para mejorar la técnica de lavado en niños y adolescentes, también mostró que el uso de la estación inteligente mejoró la adherencia a las prácticas de lavado de manos en la escuela, debido a la estrategia de recordatorios en tiempo real y retroalimentación visual.

Figura 3. Estación de lavado de manos sobre soporte con una tableta conectada para mostrar imágenes.



2.1.10 Evaluating automatic hand hygiene monitoring systems: A scoping review

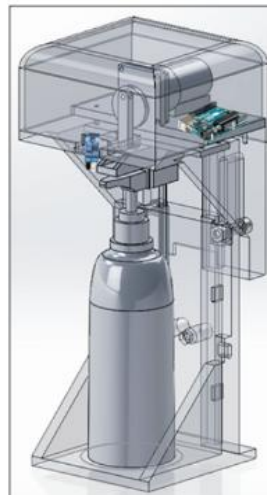
En [21], se siguió un enfoque sistemático, basado en los lineamientos PRISMA, para revisar la literatura sobre sistemas automáticos de monitoreo. Se identificaron y analizaron 27 estudios publicados entre 2010 y 2020. Clasificaron los sistemas automáticos de monitoreo en tres tipos: Tipo I (monitoriza eventos de higiene), Tipo II (agrega oportunidades de higiene) y Tipo III (combina eventos y oportunidades a nivel individual), este último incluye sensores de identificación por radiofrecuencia (RFID), infrarrojos (IR) o Zigbe, para detectar la presencia de trabajadores de salud cerca de zonas de pacientes, entradas o salidas, también contaba con brazaletes que tenían recordatorios visuales o auditivos para detectar si los usuarios se lavaban las manos dentro de un tiempo determinado antes o después de entrar en la zona del paciente. Algunos sistemas medían la presencia de vapores de alcohol para confirmar el uso del desinfectante y por último contaban con dispositivos electrónicos para registrar la activación de dispensadores de gel o jabón, midiendo el número de eventos de higiene (HHEs). Todo esto ha demostrado mejorar la adherencia a las prácticas de higiene hasta en un 100% con recordatorios inmediatos. Los estudios

revisados mostraron que los sistemas automáticos pueden mejorar significativamente las tasas de cumplimiento de la higiene de manos, especialmente en entornos hospitalarios.

2.1.11 Design of Automatic Hand Sanitizer System Compatible with Various Containers.

En [22] se aborda el diseño de un sistema de desinfección automático compatible con diversos contenedores de desinfectante, su diseño se observa en la figura 4. Se motiva por la necesidad de prevenir el contagio de virus, como el COVID-19, debido al contacto manual en las estaciones de desinfección. El sistema utiliza sensores infrarrojos y un motor controlado por una placa Arduino para accionar de manera automática el dispensador, eliminando el contacto físico. El sistema se compone de una estructura con un motor, una guía para el martillo que acciona la bomba del desinfectante, una fuente de alimentación y un controlador de motor tipo H-Bridge (L293D), este detecta la proximidad de las manos usando un sensor infrarrojo, que acciona el motor para dispensar una dosis constante de desinfectante. Los resultados obtenidos con el sistema diseñado son eficiente, compatible con diferentes tamaños de contenedores y reduce el contacto físico, lo que disminuye la posibilidad de transmisión de virus.

Figura 4. Sistema de desinfección automática.



2.1.12 Development of a Sustainable Automated Hand Washing System with an Installed Water Recycling Device.

En [23] se propone un sistema automatizado de lavado de manos que incluye un dispositivo de reciclaje de agua para su reutilización, como se muestra en la figura 5, que responde a la necesidad de optimizar el uso del agua en el lavado de manos, especialmente considerando la relevancia del lavado frecuente en la prevención de enfermedades como COVID-19, también busca reducir el consumo de agua y los costos operativos, así como disminuir la contaminación ambiental y conservar los recursos hídricos de manera sostenible. Este sistema consta de un tanque elevado que suministra agua por gravedad, un dispensador de jabón líquido, un secador de manos y un dispensador de desinfectante, los cuales son dispositivos que están automatizados mediante sensores, por lo que no es necesario contacto físico para activar el lavado, lo que reduce el riesgo de contagio de enfermedades, luego el agua utilizada en el lavado se recolecta en un tanque inferior y pasa por un sistema de filtración y es tratada con una mezcla de 5g de CaCO_3 y MgSO_4 por cada 1 kilogramo de agua usada, para purificarla y así ser reutilizada, bombeándola de regreso al tanque superior, logrando una purificación de entre el 82% y 83% .

El sistema fue probado durante cinco semanas en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Federal de Oye Ekiti, Nigeria. Durante este período, se observó un aumento en el número de usuarios debido a la productividad y facilidad de uso del sistema en el lavado de manos, lo que lo convierte en una opción rentable, ya que, logra un ahorro del 80% del agua, lo que lo hace eficiente y ecológico, cumpliendo con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU relacionados con la gestión de recursos y la sostenibilidad. El costo operativo disminuye conforme aumenta el número de usuarios, demostrando su viabilidad económica y medioambiental, haciendo que sea una solución escalable y replicable en diversas aplicaciones, como escuelas, hospitales, oficinas y espacios públicos.

Figura 5. Diseño CAD de la máquina de lavado de manos.



La integración de los subprocesos mencionados requiere soluciones de ingeniería electrónica que permitan el control y automatización del sistema. Esto incluye el diseño de circuitos electrónicos para la generación y control del plasma frío, la implementación de sensores para monitorear la calidad del agua y el desarrollo de interfaces de usuario intuitivas.

2.2 Supuestos Teóricos de la investigación

2.2.1 Desinfección microbiológica del agua

La desinfección del agua se refiere al proceso de inactivación de microorganismos patógenos que pueden representar un riesgo para la salud humana. En este contexto, la presencia de bacterias indicadoras como *Escherichia coli* constituye un criterio fundamental para evaluar la calidad microbiológica del agua.

Se asume que un proceso de desinfección es eficaz cuando logra reducir o eliminar la presencia de estos microorganismos, cumpliendo con estándares de calidad que establecen su ausencia como condición para considerar el agua segura [19].

2.2.2 Parámetros fisicoquímicos asociados a la calidad del agua

La calidad del agua no solo depende de su contenido microbiológico, sino también de características fisicoquímicas que pueden influir en la efectividad del proceso de desinfección.

En este estudio se consideran los siguientes parámetros:

pH: Influye en la estabilidad y reactividad de las especies generadas por el plasma frío. Variaciones en el pH de acidez o alcalinidad del agua durante el proceso pueden afectar la capacidad de desinfección del sistema. Según [24], se le define como el logaritmo de la concentración de iones hidrógeno, siendo 7 pH la neutralidad exacta a 25°C .

Según el Reglamento de Calidad de Agua Potable N° 32327 de la Presidencia de la República y el Ministerio de Salud, el pH se encuentra en el primer nivel de control de calidad y se le establece un valor recomendado mínimo de 6.5 y un máximo admisible de 8.5.

Turbidez: Indica la presencia de partículas suspendidas en el agua. Altos niveles de turbidez pueden proteger a los microorganismos de los agentes desinfectantes, reduciendo la eficacia del tratamiento. En [25] se menciona que la etapa de filtración representa la barrera final para la eliminación de partículas en suspensión, permitiendo alcanzar valores de turbidez por debajo de 1,0 UNT. En este contexto, se sugiere considerar la medición de la turbidez como un parámetro básico de alta frecuencia dentro del monitoreo de la calidad del agua ya que, en estudios realizados en plantas potabilizadoras, establecen una relación entre la turbidez y los coliformes totales. La turbidez como propiedad óptica, no es un riesgo directo para la salud, pero se ha asociado con la presencia de bacterias, el aumento la demanda de cloro, la formación de productos de desinfección y promueve el crecimiento biológico en la red de distribución.

El monitoreo de parámetros fisicoquímicos como el pH y la turbidez resulta fundamental para la evaluación de la calidad del agua, dado que permiten identificar variaciones asociadas a posibles procesos de contaminación y a la eficacia del tratamiento. En este sentido, dichos parámetros suelen medirse tanto antes como después del tratamiento, con el propósito de analizar su comportamiento y establecer su relación con la reducción microbiológica del agua.

2.2.3 Índice de Riesgo de la Calidad del Agua

El Índice de Riesgo de la Calidad del Agua para Consumo Humano (IRCA) es un indicador establecido en la Resolución 2115 de 2007 que permite evaluar el nivel de riesgo que el agua representa para la salud humana, con base en el cumplimiento de las características físicas, químicas y microbiológicas exigidas. Este índice se expresa en una escala de 0 a 100, donde 0 indica que el agua cumple con todos los valores aceptables y no representa riesgo, mientras que 100 corresponde al máximo nivel de riesgo por el incumplimiento total de los parámetros.

El IRCA se emplea para clasificar la calidad del agua y orientar las acciones de vigilancia sanitaria. Su cálculo se fundamenta en los valores máximos permisibles y en los puntajes de riesgo asignados a cada parámetro, según lo establecido en la Resolución 2115 de 2007, expedida por el Ministerio de la Protección Social y el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.

En la Tabla 1 se presentan los valores máximos aceptables, el puntaje de riesgo y la característica del agua correspondiente a cada uno de los parámetros físicos, químicos y microbiológicos, conforme a lo dispuesto en la normativa mencionada.

Tabla 1. Puntaje de riesgo según la resolución 2115 de 2007.

Puntaje de riesgo asociado a cada característica de la calidad de agua		
Característica del agua	Valor máximo aceptable	Puntaje de riesgo
Color aparente	15	6
Turbiedad	2	15
pH	6.5 – 9.0	1.5
Cloro residual libre	0.3 – 2.0	1.5
Alcalinidad total	200	1
Calcio	60	1
Fosfatos	0.5	1
Manganeso	0.1	1
Molibdeno	0.07	1
Magnesio	36	1
Zinc	3	1
Dureza total	300	1
Sulfatos	250	1
Hierro total	0.3	1.5
Cloruros	250	1
Nitratos	10	1
Nitritos	0.1	3
Aluminio (Al ⁺³)	0.2	3
Fluoruros	1.0	1
COT (Contenido orgánico total)	5.0	3
Coliformes totales	Negativo	15
Escherichia Coli	Negativo	25
Sumatoria de puntajes asignados		100

En la Figura 6, se da a conocer la clasificación del nivel de riesgo en salud, basada en el IRCA tanto por muestra como en su valor mensual, permite orientar las acciones que deben implementarse y apoyar la toma de decisiones por parte de las autoridades sanitarias y los

prestadores del servicio, con el fin de garantizar que el agua suministrada sea apta para el consumo humano [26].

Figura 6. Clasificación del nivel de riesgo en salud según el IRCA por muestra y el IRCA mensual y acciones que deben adelantarse.

Clasificación IRCA (%)	Nivel de Riesgo	IRCA por muestra (Notificaciones que adelantará la autoridad sanitaria de manera inmediata)	IRCA mensual (Acciones)
80.1 -100	INVIABLE SANITARIA MENTE	Informar a la persona prestadora, al COVE, Alcalde, Gobernador, SSPD, MPS, INS, MAVDT, Contraloría General y Procuraduría General.	Agua no apta para consumo humano, gestión directa de acuerdo a su competencia de la persona prestadora, alcaldes, gobernadores y entidades del orden nacional.
35.1 - 80	ALTO	Informar a la persona prestadora, COVE, Alcalde, Gobernador y a la SSPD.	Agua no apta para consumo humano, gestión directa de acuerdo a su competencia de la persona prestadora y de los alcaldes y gobernadores respectivos.
14.1 – 35	MEDIO	Informar a la persona prestadora, COVE, Alcalde y Gobernador.	Agua no apta para consumo humano, gestión directa de la persona prestadora.
5.1 - 14	BAJO	Informar a la persona prestadora y al COVE.	Agua no apta para consumo humano, susceptible de mejoramiento.
0 - 5	SIN RIESGO	Continuar el control y la vigilancia.	Agua apta para consumo humano. Continuar la vigilancia.

2.2.4 Generación de Plasma Frío

El plasma frío es un estado de la materia similar a la del gas, compuesto por partículas ionizadas a bajas temperaturas, se produce cuando la energía cinética de los electrones es más alta que la de las partículas más pesadas, resultando una distribución de temperaturas distintas. En este estado, la temperatura del gas es considerablemente más baja, cercana a la temperatura ambiente. La generación de plasma frío ocurre cuando se aplica un alto voltaje a un gas a presión atmosférica, produciendo una descarga eléctrica que ioniza las moléculas sin aumentar significativamente la temperatura, Este proceso crea una mezcla de especies altamente reactivas, incluyendo electrones, iones positivos y negativos, átomos y moléculas excitadas y radicales libres [27].

Los métodos de generación se dan por descarga de Barrera Dieléctrica (DBD) que utiliza dos electrodos separados por un material dieléctrico (como vidrio), que, al aplicar un voltaje alterno de alta frecuencia, se producen micro descargas que ionizan el gas [13], o por jets de plasma, que generan un flujo de plasma que puede dirigirse hacia una superficie específica [28].

El plasma frío es altamente reactivo y puede generarse a temperatura ambiente, lo que lo hace adecuado para aplicaciones biológicas y médicas.

2.2.5 Desinfección con Plasma

La desinfección con plasma frío se basa en la generación de especies reactivas de oxígeno y nitrógeno (RONS), que incluyen radicales libres como el radical hidroxilo ($\bullet\text{OH}$), ozono (O_3), peróxido de hidrógeno (H_2O_2), óxido nítrico (NO) y otros. Estas especies tienen un alto potencial oxidativo y son altamente efectivas para inactivar microorganismos, asegurando una desinfección eficiente sin elevar significativamente la temperatura del entorno tratado [29].

Las especies reactivas de oxígeno y nitrógeno (RONS) inactivan microorganismos mediante varios mecanismos. El primero por medio de daño a membranas celulares, realizando peróxido de los lípidos de las membranas celulares, aumentando su permeabilidad y provocando la muerte celular. Otra es la oxidación de proteínas esenciales que interfiere en funciones vitales del microorganismo, o las RONS que pueden causar rupturas de cadenas y modificaciones en bases nitrogenadas, impidiendo la replicación y transcripción [30].

Además, el plasma frío ofrece diferentes ventajas ya que es eficaz contra bacterias Gram-positivas y Gram-negativas, virus, hongos y esporas, ya que opera a bajas temperaturas, evita daños térmicos a materiales sensibles y no deja residuos tóxicos, reduciendo el impacto ambiental, es por eso que la desinfección con plasma es un método emergente que ofrece una alternativa a los desinfectantes químicos tradicionales.

2.2.6 Reutilización de Agua

La reutilización del agua implica tratar las aguas residuales para que puedan ser utilizadas nuevamente, reduciendo la demanda de agua dulce y minimizando la contaminación ambiental. Para ello, es fundamental asegurar un tratamiento adecuado, dependiendo del uso previsto, que elimine contaminantes físicos, químicos y biológicos. El agua puede ser reutilizada en ciclos para fines menos exigentes en calidad, como el riego o la limpieza, antes de ser desechada [31].

Los beneficios destacan la conservación de recursos, ya que reduce la extracción de agua de fuentes naturales y la sostenibilidad al disminuir el volumen de aguas residuales vertidas al medio ambiente. Sin embargo, hay desafíos a considerar, como los riesgos sanitarios, siendo esencial garantizar que el agua reutilizada no represente un peligro para la salud, y la aceptación

social, ya que la percepción pública puede ser un obstáculo [32]. La reutilización eficiente y segura del agua es clave para una gestión sostenible de los recursos hídricos, ya que se puede utilizar para el riego de jardines, la descarga de inodoros, que aprovecha el agua tratada para funciones que no requieren agua potable.

2.2.7 Aguas Grises

Las aguas grises son las aguas residuales domésticas que provienen de lavabos, duchas, bañeras y lavadoras que contienen restos de jabón, detergentes, grasas, células de piel, cabello y una carga microbiana moderada, excluyendo las aguas negras de inodoros.

El tratamiento de aguas grises incluye filtración para remover sólidos suspendidos y partículas grandes, tratamiento biológico mediante biofiltros o sistemas de humedales artificiales que degradan materia orgánica y desinfección para eliminar microorganismos patógenos, permitiendo un uso seguro. El aprovechamiento de aguas grises es una estrategia efectiva para optimizar el uso del agua en entornos domésticos y comerciales [32].

2.2.8 Sistema de Recirculación de agua

Un sistema de recirculación es un circuito cerrado que permite el uso repetido del agua mediante procesos de tratamiento integrados, realizando, recogida del agua, tratamiento mediante filtración y desinfección, almacenamiento en tanques y distribución de la misma a través de bombas y tuberías [33].

El diseño hidráulico debe garantizar un flujo continuo y un balance de presión adecuado, para evitar estancamientos que incluye un sistema control y automatización que gestione mediante sensores, actuadores y sistemas de control que el agua circule eficientemente [23].

Un sistema de recirculación bien diseñado contribuye a la sostenibilidad y es especialmente útil en áreas con escasez de agua.

2.3 Variables de estudio.

2.3.1 Definición nominal de las variables

La eficacia de desinfección del agua se define como la capacidad de un sistema de tratamiento para inactivar, reducir o eliminar la carga microbiológica presente en el agua, mediante, el uso de plasma frío como agente desinfectante.

Desde el punto de vista sanitario, la eficacia de desinfección está directamente relacionada con la disminución de microorganismos indicadores de contaminación, tales como *Escherichia coli*, cuya presencia se asocia con riesgos para la salud humana. En este sentido, un proceso de desinfección se considera eficaz cuando logra reducir significativamente la concentración de estos microorganismos hasta niveles aceptables o su completa ausencia, de acuerdo con criterios de calidad del agua.

Adicionalmente, la eficacia del proceso puede estar influenciada por condiciones fisicoquímicas del agua, como el pH y la turbidez, las cuales afectan la acción de los agentes desinfectantes. En el caso del plasma frío, la generación de especies reactivas de oxígeno y nitrógeno (RONS) constituye el mecanismo principal de inactivación microbiana, actuando sobre componentes celulares esenciales de los microorganismos.

Por lo tanto, la eficacia de desinfección no solo implica la reducción microbiológica, sino también la capacidad del sistema para operar bajo condiciones que favorezcan dicho proceso, garantizando la mejora de la calidad del agua tratada en términos sanitarios.

2.3.2 Definición operativa de las variables

$$Ed (\%) = \frac{IRCAa - IRCAd}{IRCAa} * 100 \% \quad (7)$$

Donde:

- IRCAa: Porcentaje índice de Riesgo de la Calidad del Agua antes del proceso de desinfección.
- IRCAd: Porcentaje índice de Riesgo de la Calidad del Agua después del proceso de desinfección.

- Ed: Eficacia de desinfección del agua (%).

2.4 Formulación de hipótesis

Hipótesis de Investigación (Hi): El proceso de desinfección de agua mediante plasma frío en un sistema automatizado de lavado de manos con recirculación alcanza una eficacia (Ed) superior al 50%.

Hipótesis Nula (H₀): El proceso de desinfección de agua mediante plasma frío en un sistema automatizado de lavado de manos con recirculación no alcanza una eficacia (Ed) superior al 50 %.

Hipótesis Alternativa (H_a): El proceso de desinfección de agua mediante plasma frío en un sistema automatizado de lavado de manos con recirculación está en un rango de eficacia (Ed) del 20% al 40 %.

3. Metodología.

3.1 Enfoque

El proyecto se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, ya que se centró en la recolección y análisis de datos numéricos para evaluar la eficacia del sistema propuesto. Este enfoque permite medir la calidad del agua recirculada, A través de mediciones objetivas y estadísticas, se buscó validar las hipótesis formuladas y determinar el desempeño del sistema en términos cuantitativos.

3.2 Paradigma

El paradigma que sustento esta investigación es el neopositivismo, caracterizado por la búsqueda de conocimiento a través de métodos científicos empíricos y objetivos. Este paradigma se basa en la idea de que la realidad es observable y medible y que es posible descubrir leyes generales mediante la experimentación y el análisis riguroso de datos. En este proyecto, se aplicarán principios científicos para evaluar el impacto del sistema de lavado de manos, controlando parámetros y obteniendo resultados que puedan ser replicables y generalizables.

3.3 Método

El método empleado fue el método experimental, ya que implica la manipulación deliberada de variable independiente para observar su efecto sobre variable dependiente. En este caso:

- Variable Independiente: Proceso de desinfección del agua mediante plasma frío.
- Variables Dependiente: Eficacia en la eliminación de microorganismos patógenos en el agua y cantidad de agua reutilizada.

Se diseño un experimento controlado en el que se analizó el desempeño del sistema propuesto, esto permitió establecer relaciones causales y evaluar el impacto real de la innovación tecnológica introducida.

3.4 Tipo de investigación.

El proyecto es de tipo descriptivo, ya que la finalidad fue determinar la eficacia del proceso de desinfección del agua mediante plasma frío en un sistema automatizado de recirculación donde se describió las características y funcionamiento del sistema, así como los resultados obtenidos.

3.5 Diseño de investigación.

El diseño de investigación se definió como un pre experimento, debido a que se implementó y evaluó el proceso de desinfección mediante plasma frío en un sistema automatizado de lavado de manos con recirculación.

La evaluación de la eficacia de desinfección del agua se realizó mediante un esquema de medición antes y después. Para ello, se tomó una muestra de agua residual generada durante el lavado de manos y, posteriormente, una muestra del agua tratada tras el proceso de filtración y desinfección con plasma frío. Esta comparación permitió determinar la variación en la carga microbiológica y en los parámetros fisicoquímicos del agua atribuibles al sistema.

Es importante señalar que los resultados obtenidos corresponden a una evaluación preliminar del comportamiento del sistema, sin pretensión de generalización estadística.

El diseño pre experimental del trabajo es el siguiente:

RG1 O1 X1 O2

Donde:

- **RG1:** Agua del sistema.
- **X1:** Sistema de desinfección mediante plasma frío.
- **O1:** Medición de la contaminación del agua antes del tratamiento.
- **O2:** Medición de la contaminación del agua después del tratamiento.

3.6 Población

La población está constituida por el agua utilizada en el sistema automatizado de lavado de manos con recirculación.

3.7 Muestra.

La muestra estará constituida por un conjunto de muestras de parámetros del agua tomadas del sistema automatizado de lavado de manos con recirculación, recolectadas antes y después de la aplicación del sistema de desinfección mediante plasma frío

3.8 Técnicas de recolección de la información.

En el presente estudio se evaluó la eficacia del proceso de desinfección de agua en un sistema automatizado de lavado de manos con recirculación. Para ello, fue necesario recopilar datos utilizando el método de observación directa, con el objetivo de comparar la eficacia del sistema propuesto frente a los métodos tradicionales de desinfección, garantizando condiciones equivalentes entre los sujetos evaluados.

Con el fin de determinar la eficacia del proceso de desinfección del agua mediante plasma frío y la cantidad de agua reutilizada, se realizaron mediciones de parámetros fisicoquímicos como el pH y la turbidez. Asimismo, para confirmar la eficacia microbiológica del proceso de desinfección, se llevaron a cabo pruebas en un laboratorio certificado.

La realización de mediciones periódicas permitió documentar cuantitativamente la eficacia del proceso de desinfección de agua mediante plasma frío en un sistema automatizado con recirculación. Estas mediciones se efectuaron mediante el uso de equipos específicos, como sensores de pH, turbidez y nivel de agua, destinados al monitoreo continuo de la calidad y cantidad del agua. Adicionalmente, las pruebas de laboratorio posibilitaron cuantificar la presencia de microorganismos antes y después del tratamiento, asegurando que el sistema opere de manera efectiva y que el agua se encuentre adecuadamente desinfectada.

3.9 Validez de las técnicas de recolección de la información.

La medición cuantitativa de la información por medio de sensores de pH y turbidez es una técnica que se utilizó en un diseño e implementación de la recolección de datos de las muestras del sistema de monitoreo de calidad del agua basado en IOT en tiempo real donde se cuantifico los parámetros de calidad del agua con un margen de error inferior al 5% lo que lo hace válido y

confiable [34], además, el llevar esta agua tratada a un laboratorio especializado, asegura que los resultados son confiables y profesionales sobre la eficacia del sistema en la eliminación de microorganismos patógenos.

3.10 Confiabilidad de las técnicas de recolección.

La medición cuantitativa del pH y turbidez, es una técnica que proporciona datos numéricos que pueden ser recolectados de manera precisa y repetible, lo que permite evaluar de manera precisa el método de desinfección del agua, es por eso, que la confiabilidad de esta técnica se basa en su naturaleza objetiva y en la posibilidad de reproducir los resultados.

4. Resultados

4.1 Diseño de un sistema de lavado de manos con recirculación y desinfección con plasma frío.

Para alcanzar el primer objetivo específico, correspondiente al diseño de un sistema de lavado de manos con recirculación y desinfección mediante plasma frío, el desarrollo del proyecto se dividió en dos componentes principales: el diseño estructural del sistema de lavado de manos y el diseño electrónico del sistema de control y automatización. Esta división permitió abordar de manera organizada tanto los aspectos físicos e hidráulicos del prototipo, como la integración de los elementos electrónicos encargados del monitoreo, control y funcionamiento del sistema en su conjunto.

4.1.1 Diseño estructural del sistema de lavado de manos.

Para la realización del diseño estructural del sistema de lavado de manos, el proceso se dividió en tres fases principales: el diseño físico de la estructura del lavamanos, el diseño hidráulico para la recirculación del agua y el diseño del módulo de desinfección mediante plasma frío. Cada una de estas etapas se desarrolló de manera secuencial, con el propósito de integrar adecuadamente los aspectos mecánicos, hidráulicos y electrónicos del prototipo. A continuación, se presentan los resultados obtenidos en cada fase de diseño.

4.1.1.1 Diseño físico de la estructura del lavamanos

El presente subcapítulo describe el proceso de diseño de la estructura física del prototipo del lavamanos, la cual es el soporte principal para la instalación y operación del sistema. El diseño se orientó a garantizar la estabilidad y funcionalidad del equipo, considerando tanto los criterios de diseño, la selección de materiales, así como el modelado en software que permitió validar las dimensiones para la construcción estructural.

El diseño de la estructura se desarrolló bajo los siguientes criterios:

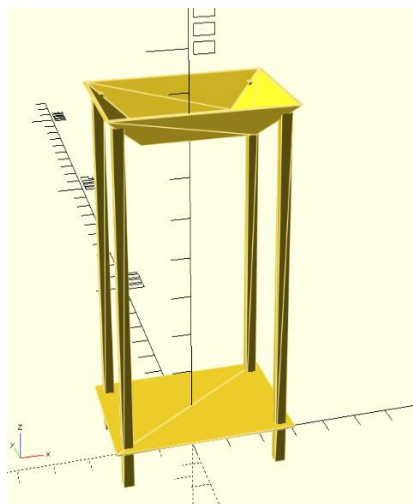
- Ergonomía: altura de 90 cm para permitir un uso cómodo por parte de adultos, largo y ancho de 50 cm por 35 cm respectivamente para un adecuado espacio de lavado de manos.

- Estabilidad: estructura rígida y resistente capaz de soportar el peso del lavamanos, el agua y el uso constante.
- Durabilidad: selección de materiales resistentes a la humedad y al desgaste.
- Facilidad de fabricación: diseño sencillo que permitan un ensamblaje de elementos de forma cómoda y con herramientas convencionales.

Los materiales seleccionados para el sistema fueron acero inoxidable en el lavamanos debido a su contacto directo con agua y jabón, y hierro para la estructura externa debido a su resistencia y bajo costo. El acabado superficial se consideró con recubrimientos protectores para evitar el deterioro por la humedad y garantizar mayor durabilidad.

Por último, durante desarrollo del diseño se observó referencias de estaciones de lavado portátiles para la elaboración del boceto, y se definió una estructura rectangular con cuatro patas principales, un estante inferior de soporte que permita el almacenamiento del sistema de recirculación y una encimera donde se instala el lavamanos.

Figura 7. Diseño estructural del lavamanos en openSCAD.

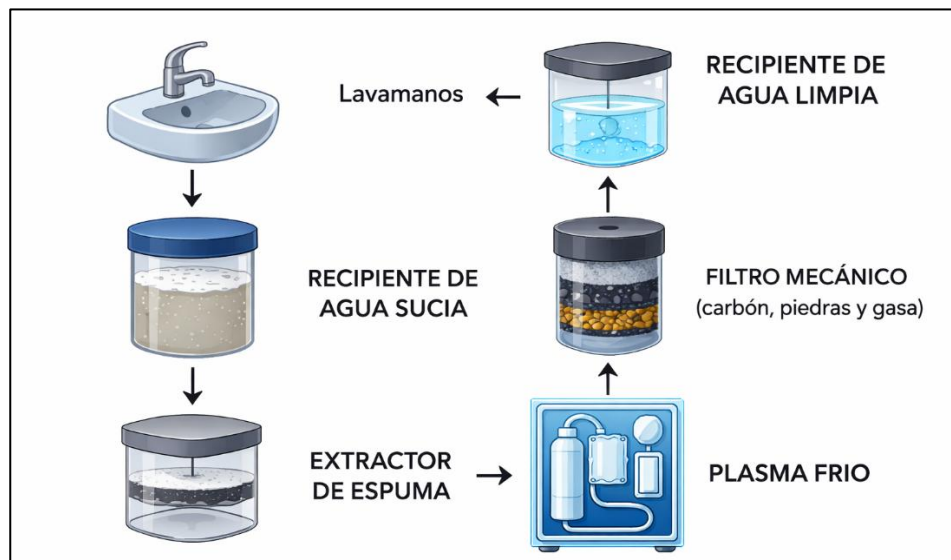


El resultado final observado en la figura 7, corresponde a una estructura estable y ergonómica, el diseño cumple con los criterios establecidos, viable de fabricar y asegura una adecuada integración con el sistema de desinfección de agua. De esta forma, el prototipo cumple con los criterios técnicos planteados y ofrece una solución práctica y confiable para su implementación.

4.1.1.2 Diseño hidráulico para la recirculación de agua.

El diseño hidráulico para la recirculación de agua en el sistema propuesto se fundamenta en un esquema cerrado como lo indica la figura 8 que permite el aprovechamiento del agua, proveniente del lavado de manos.

Figura 8. Diseño Hidráulico para la recirculación de agua.



El proceso inicia con la conducción del agua hacia un depósito primario, que actúa como tanque de almacenamiento de aguas residuales o sucias. Desde este punto, el flujo pasa al módulo de extracción de espuma, donde se generan burbujas que permiten la separación de la espuma por diferencia de densidad: la espuma asciende hacia la parte superior atravesando una malla de acero inoxidable y siendo desechada, mientras el agua permanece en la parte inferior. Esta etapa cumple una función de pretratamiento, ya que reduce la carga de materia orgánica y partículas suspendidas que podrían interferir con la desinfección por plasma frío, en la cual también se inyectan burbujas. Al eliminar previamente la espuma, se evita su formación excesiva en esta etapa.

Posteriormente, el agua ingresa a la fase de desinfección por plasma frío, que constituye el núcleo del sistema. En esta etapa, el agua es sometida a la acción de especies reactivas generadas por descargas eléctricas no térmicas, las cuales permiten la inactivación de microorganismos patógenos como bacterias, hongos y virus.

Finalmente, el agua pasa a través de un filtro biofísico, encargado de eliminar las partículas residuales visibles y estabilizar las propiedades fisicoquímicas del fluido. Una vez verificados los parámetros de calidad, el agua se dirige al tanque de almacenamiento de agua limpia, desde donde puede ser reutilizada para el lavado de manos u otros fines no potables dentro del sistema.

Este diseño hidráulico con lógica de recirculación asegura una alta eficacia en el tratamiento, optimiza el uso del recurso hídrico y garantiza la disponibilidad de agua con condiciones óptimas para su reutilización segura.

4.1.1.3 Diseño del módulo de desinfección mediante plasma frío.

Para el diseño del módulo de desinfección mediante plasma frío, se implementó un sistema experimental orientado a la generación de aire ionizado capaz de inactivar microorganismos presentes en el agua. Como se muestra en la Figura 9, el proceso se desarrolló a partir de un motor que impulsó aire a través de una manguera, dirigiéndolo hacia una cámara de ionización construida con una botella plástica. En el interior de esta cámara se instaló un electrodo elaborado a partir de un tubo de ensayo de vidrio, dentro del cual se colocó una esponja metálica de alambre. La superficie externa del tubo fue recubierta con papel aluminio, permitiendo así la conformación de los polos necesarios para la generación de la descarga eléctrica. Esta configuración, ilustrada en la Figura 10, se implementó mediante el uso de dos electrodos dispuestos en paralelo, lo que favoreció una distribución más uniforme del plasma y una mayor eficacia en el proceso de ionización del aire.

Figura 9. Cámara de ionización.

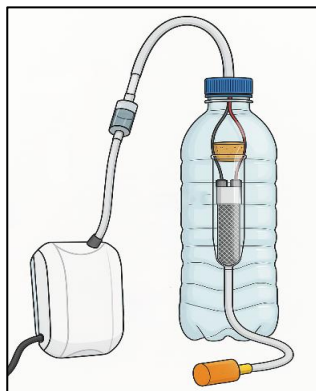
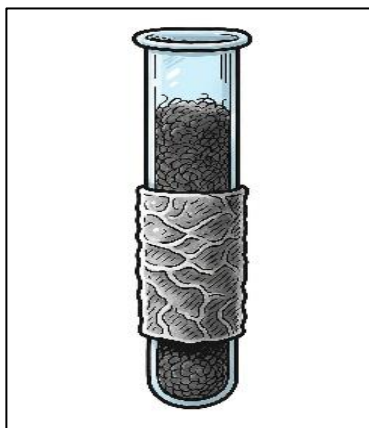


Figura 10. Electrodo.



Cuando el sistema se energizó, el aire que ingresó a las cámaras de ionización se sometió a la acción del campo eléctrico alterno, provocando la formación de un plasma frío compuesto por especies reactivas de oxígeno y nitrógeno. Estas especies se mezclaron con el flujo de aire, generando un gas ionizado que posteriormente fue inyectado al agua tratada mediante presión. De esta forma, el aire ionizado entró en contacto directo con el líquido, favoreciendo la desinfección por oxidación y la eliminación de bacterias, hongos y otros microorganismos sin necesidad de emplear productos químicos.

4.1.2 Diseño Electrónico del sistema de lavado de manos.

Para el diseño electrónico del sistema de lavado de manos, el desarrollo se dividió en dos secciones principales: el diseño del circuito generador de plasma frío y el diseño del sistema de control y automatización del lavado de manos. Esta división permitió abordar de manera específica la creación del módulo responsable de la desinfección del agua mediante plasma no térmico, así como el sistema encargado de la gestión automática de los procesos de filtrado, tratamiento y recirculación, garantizando una operación eficiente y segura del prototipo.

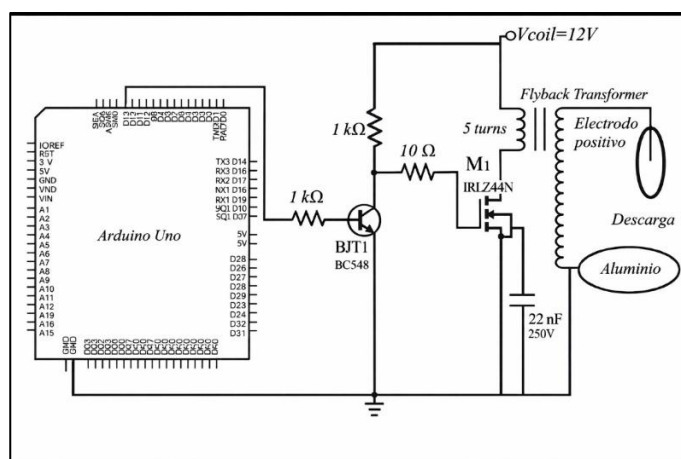
4.1.2.1 Diseño del circuito generador de plasma frío.

El diseño del sistema de desinfección de agua mediante plasma frío representó un avance significativo al combinar dos elementos clave: la generación de plasma no térmico y el acople adecuado de impedancias. El plasma frío, al tratarse de un estado altamente energético de la materia, permite la desinfección del agua sin recurrir a sustancias químicas, produciendo especies

reactivas capaces de inactivar microorganismos patógenos de forma eficiente y sostenible. A su vez, el acople de impedancias garantiza que la energía suministrada sea transferida al reactor de descarga de manera óptima, mejorando la estabilidad del proceso y la uniformidad del tratamiento.

Para el proceso de generación del plasma se requiere un sistema electrónico capaz de elevar el voltaje, un conjunto de electrodos dieléctricos ubicados en una configuración segura que evite el contacto directo con el agua, y una fuente de alimentación de 12 V y 5 A. Este sistema incrementa la tensión hasta los niveles necesarios para producir la descarga dieléctrica, garantizando así un funcionamiento estable y continuo del proceso de generación de plasma.

Figura 11. Circuito de generación de plasma frío.



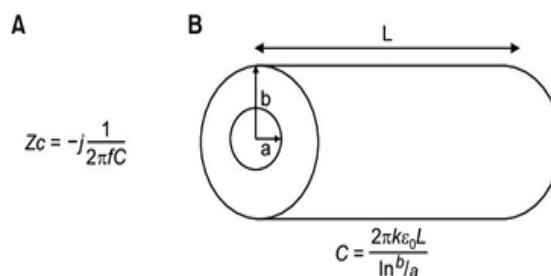
La figura 11 muestra el circuito de generación de plasma frío, compuesto por un controlador Arduino encargado de generar la señal inicial de control. Esta señal es amplificada mediante un transistor BJT y posteriormente empleada para accionar un MOSFET, que permite el paso de corriente hacia el transformador flyback. El flyback eleva la tensión hasta aproximadamente 6000 V, nivel requerido para la formación del plasma. El alto voltaje se aplica a un electrodo con esponja de acero, produciendo una descarga de plasma en una placa de aluminio conectada a tierra. El diseño permitió integrar de manera eficiente el módulo de plasma frío en el sistema de recirculación de agua, asegurando tanto la generación confiable de especies reactivas como la compatibilidad eléctrica y mecánica con el prototipo de lavado de manos. Esta integración posibilitó un proceso continuo de desinfección, mejorando la calidad del agua y optimizando el aprovechamiento del recurso.

En cuanto al segundo proceso fundamental, el acoplamiento de impedancias resulta esencial en los sistemas de desinfección con plasma frío, ya que asegura una transferencia eficiente de energía desde la fuente de alimentación hacia el plasma. Para lograr un plasma estable y de alto rendimiento, es necesario ajustar la fuente de alimentación de manera que su impedancia coincida con la del plasma. La impedancia del plasma varía en función de factores como la presión, la composición del gas y la geometría del dispositivo. Por ello, su ajuste puede realizarse mediante técnicas como la modulación de la frecuencia de operación, la amplitud de la señal o la forma de onda de entrada. Al lograr esta coincidencia de impedancias, se optimiza la transferencia de potencia, generando un plasma más eficiente y adecuado para aplicaciones de desinfección.

La impedancia del plasma corresponde a la oposición que presenta el plasma al paso de corriente eléctrica, compuesta por su resistencia y reactancia. En sistemas de plasma frío, esta impedancia suele ser elevada debido a la baja conductividad, lo que incrementa la resistencia eléctrica. El acoplamiento de impedancias no solo mejora la transferencia de potencia hacia el plasma, sino que también contribuye a regular su temperatura, evitando sobrecalentamientos que puedan deteriorar los materiales o componentes del sistema. Este control se logra mediante el uso de electrodos diseñados específicamente y el ajuste de la frecuencia de la fuente de alimentación. De forma paralela, el acoplamiento capacitivo es ampliamente utilizado en electrónica, ya que permite el paso de señales de corriente alterna mientras bloquea la corriente continua, garantizando el aislamiento entre etapas del circuito.

Para el cálculo de la capacitancia y la impedancia del electrodo se hace el siguiente proceso con las fórmulas e imagen de la figura 12.

Figura 12. Capacitancia e impedancia.



Para:

$$C = \frac{2\pi k \epsilon_0 L}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)} \quad (8)$$

Donde:

C: es la capacitancia en faradios (F).

k: es la permitividad del vacío, aproximadamente 8.854×10^{-12} F/m.

ϵ_0 : es la permitividad relativa del material dieléctrico entre los electrodos (vidrio).

L: es la longitud del electrodo en metros (m).

a: es el radio del electrodo interno en metros (m).

b: es el radio del electrodo externo en metros (m).

Para ϵ_0 una permitividad de 6 representa un valor que equilibra de manera adecuada la capacidad del vidrio para almacenar energía eléctrica con propiedades esenciales como su transparencia, resistencia mecánica y estabilidad térmica. Por su parte, la permitividad del vacío se define a partir de principios fundamentales de la física, entre ellos la ley de Coulomb y las ecuaciones de Maxwell.

Luego se hace las medidas necesarias en el electrodo figura 9 para completar los datos y poder remplazarlos en la formula.

Se obtiene los siguientes datos:

$$k = 8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$$

$$\epsilon_0 = 6$$

$$L = 0.07m$$

$$a = 0.006m$$

$$b = 0.007m$$

Se sustituyen los valores en la ecuación (8)

$$C = \frac{2\pi \cdot 8.854 \times 10^{-12} \cdot 6 \cdot 0.07}{\ln\left(\frac{0.007}{0.006}\right)}$$

$$C = 1.51623 \times 10^{-10} \text{ Faradios}(f)$$

Considerando que el módulo de desinfección fue diseñado con dos unidades eléctricamente equivalentes, la capacitancia total del sistema corresponde a la contribución conjunta de ambos módulos. La capacitancia real del sistema se obtiene a partir de

$$C_{eq} = 2 \times C = 2 \times 1.51623 \times 10^{-10} f$$

$$C_{eq} = 3.03246 \times 10^{-10} f$$

Para:

$$Z_c = -j \frac{1}{2\pi f C_{eq}} \quad (9)$$

Donde:

Z_c: es la impedancia en ohmios (Ω).

j: es la unidad imaginaria $(-1)^{0.5}$

f: es la frecuencia de la señal en hercios (Hz).

C_{eq}: es la capacitancia total en faradios (F).

Dado que

$$f = 11 \text{ kHz}$$

$$j = (-1)^{0.5}$$

$$C_{eq} = 3.03246 \times 10^{-10} f$$

Se sustituyen los valores en la ecuación (9)

$$Z_c = -j \frac{1}{2\pi \cdot 11 \times 10^3 \cdot 3.03246 \times 10^{-10}}$$

$$Z_c = -j 47712.52116$$

Por lo tanto, la impedancia Z_c es $-j 47712.52116$

Cuando el condensador se ha cargado y la separación entre los electrodos es inferior a 2 mm, ocurre una descarga de energía debido a la ruptura del material dieléctrico. En ese instante, la energía acumulada en el condensador se libera en forma de luz y calor. El acoplamiento capacitivo se emplea para transferir señales de corriente alterna entre dos circuitos sin permitir el paso de corriente continua. Esto es posible porque el condensador impide la circulación de corriente continua, pero sí permite el flujo de señales de corriente alterna, las cuales cambian con el tiempo.

Para la generación estable de plasma frío por descarga capacitiva, la impedancia efectiva del sistema electrodo-plasma debe situarse típicamente en el rango de decenas de kilo ohmios. En este trabajo, la impedancia calculada de aproximadamente 47.7 k Ω a 11 kHz, se encuentra dentro del rango óptimo para la transferencia eficiente de energía sin transición a régimen de arco.

En cuanto al código Arduino para la descarga de plasma, se realizó mediante la configuración inicial del pin 13 como salida en la función `setup()`. Durante la ejecución del programa, la función `loop()` controló la activación del MOSFET, que habilitó o interrumpió la corriente hacia la bobina de encendido dependiendo del estado de la señal. Cuando la señal se encontraba en nivel alto, el MOSFET permitió el paso de corriente, mientras que al estar en nivel bajo la interrumpía. La frecuencia y el ciclo de trabajo de la señal se ajustaron experimentalmente, observándose que frecuencias más elevadas favorecieron la estabilidad del plasma y una desinfección más uniforme.

```
void setup() {
  pinMode(13, OUTPUT);
}
void loop(){
  digitalWrite(13, HIGH);
  delayMicroseconds(55);
  digitalWrite(13, LOW);
  delayMicroseconds(36);
}
```

El MOSFET utilizado presenta una lógica activa en nivel bajo, por lo tanto, el ciclo de trabajo efectivo corresponde al tiempo durante el cual la señal PWM permanece en estado bajo. En este estado, el MOSFET se encuentra en conducción y se produce la generación de plasma.

Para una frecuencia de operación de 11 kHz, el período total de la señal es de 91 μ s. El tiempo activo (nivel bajo) es de 36 μ s, mientras que el tiempo inactivo (nivel alto) es de 55 μ s.

En consecuencia, el ciclo de trabajo efectivo se calcula como:

$$D = \frac{T_{bajo}}{T_{total}} * 100\% \quad (10)$$

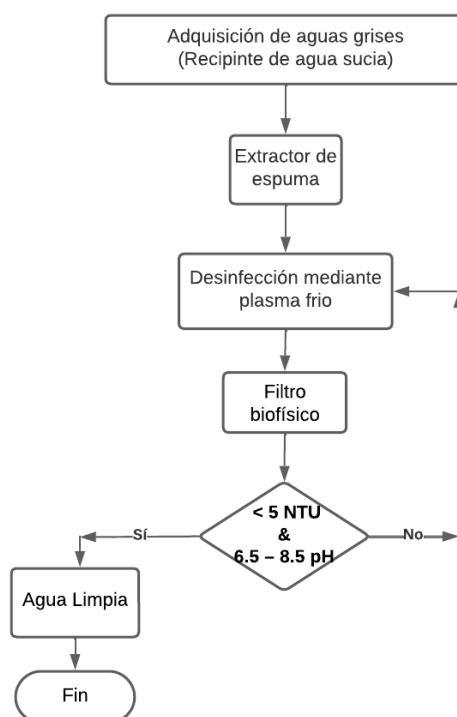
$$D = \frac{36}{91} * 100 \% = 39\%$$

Con estos valores, el sistema opera con un ciclo de trabajo efectivo del 39 %, lo cual permite la generación estable de plasma frío y una adecuada disipación térmica del dispositivo de potencia.

4.1.2.2 Diseño del sistema de control y automatización del lavamanos

Se presenta el diagrama de flujo correspondiente al proceso de control y automatización del sistema de recirculación y desinfección mediante plasma frío de agua.

Figura 13. Diagrama de flujo del proceso de control y automatización del sistema de lavado de manos con recirculación de agua.



El funcionamiento del sistema mostrado en la Figura 13 inicia con la recolección de las aguas grises generadas durante el lavado de manos, las cuales ingresaron al sistema para su tratamiento. En una primera etapa, el agua es almacenada en el recipiente de aguas sucias y posteriormente conducida al módulo extractor de espumas, cuyo objetivo es la remoción de residuos de jabón. Este proceso se realizó mediante un difusor y un motor de aire, los cuales generan burbujas que favorecieron la separación y eliminación de la espuma presente en el agua, una vez finalizado este tratamiento inicial, el agua es dirigida al módulo de desinfección mediante plasma frío. En esta etapa se generaron especies reactivas de oxígeno y nitrógeno, responsables de la inactivación de microorganismos patógenos tales como *Escherichia coli*, coliformes totales, bacterias mesófilas y hongos presentes en el agua.

Posteriormente, el agua pasa a través de un sistema de filtración mecánica, cuyo propósito es mejorar sus características físicas visibles, a continuación, el sistema realiza de manera automática la medición de los parámetros fisicoquímicos, específicamente la turbidez y el pH. En caso de que los valores obtenidos se encontraran fuera de los rangos establecidos, es decir, una turbidez superior a 5 NTU o un pH fuera del intervalo 6.5 a 8.5, el sistema activa automáticamente

la recirculación del agua hacia el módulo de desinfección mediante plasma frío, repitiendo el ciclo de tratamiento hasta alcanzar los valores permitidos.

Finalmente, cuando los parámetros evaluados cumplieron con los rangos normativos definidos, el sistema clasifica el agua como limpia y apta para su reutilización, completando así el ciclo automatizado de tratamiento y recirculación. Este enfoque permite optimizar el uso del recurso hídrico, garantiza la calidad del agua tratada y reduce el desperdicio, mediante una gestión inteligente basada en la medición y el control continuo de variables fisicoquímicas.

4.2 Implementación del sistema de lavado de manos con recirculación y desinfección con plasma frío.

Para alcanzar el segundo objetivo específico, correspondiente a la implementación del sistema de lavado de manos con recirculación y desinfección mediante plasma frío, se procedió a integrar los componentes estructurales, hidráulicos y electrónicos previamente diseñados, garantizando su correcto funcionamiento en conjunto. Esta etapa permitió materializar el prototipo, verificando la compatibilidad entre los módulos de control, el sistema de recirculación del agua y el dispositivo de desinfección, con el fin de asegurar una operación eficiente, segura y automatizada del sistema.

4.2.1 Implementación estructural del lavamanos.

Para la implementación estructural del lavamanos, se dio continuidad a las fases planteadas en el diseño, iniciando con la construcción física de la estructura que soportó los componentes hidráulicos y electrónicos del sistema. En esta etapa se materializó el diseño previamente elaborado, seleccionando los materiales, herramientas y elementos necesarios para ensamblar el prototipo. El proceso incluyó la instalación del lavamanos, el montaje del soporte metálico y la disposición de los recipientes destinados a la recirculación del agua, garantizando una base estable y funcional para la integración del sistema completo.

4.2.1.1 Implementación física de la estructura del lavamanos

En este subcapítulo se describe el proceso de construcción e instalación física del lavamanos, basado en el diseño estructural previamente desarrollado. La implementación se llevó a cabo considerando los planos y dimensiones obtenidas en la etapa de modelado, garantizando

que el prototipo final mantuviera las condiciones de ergonomía, estabilidad y funcionalidad definidas en los criterios de diseño.

Figura 14. Implementación de la estructura del lavamanos.



Como se observa en la figura 14, La estructura del sistema se fabricó con perfiles de hierro cuadrado soldados, formando una base rectangular con cuatro patas de soporte. En la parte superior se instaló una encimera metálica con un lavamanos de acero inoxidable, mientras que en la parte inferior se incorporó un estante para alojar los componentes del sistema de recirculación y desinfección. El ensamblaje mediante soldadura y pernos aseguró la rigidez estructural, y la aplicación de pintura anticorrosiva protegió el material frente a la humedad. Como resultado, se obtuvo una estructura robusta, estable y funcional, integrada al sistema de tratamiento de agua y adecuada para un prototipo confiable y de fácil mantenimiento.

4.2.1.2 Implementación del proceso de recirculación de agua.

En la implementación del sistema de recirculación de agua se emplearon recipientes fabricados en polipropileno, debido a que este material es apto para el contacto directo con agua, resistente al calor, no tóxico y altamente resistente a productos químicos y detergentes. Estas características lo convierten en un material ampliamente utilizado en aplicaciones alimentarias y

sanitarias, garantizando estabilidad química y seguridad durante el proceso de tratamiento y reutilización del agua.

La conexión entre los diferentes recipientes del sistema se realizó mediante mangueras flexibles de silicona, seleccionadas por su facilidad de instalación, este tipo de manguera, no es tóxica, resistente a la humedad y adecuada para aplicaciones que requieren un flujo continuo y seguro. Las mangueras se conectaron a los recipientes y a sus respectivas válvulas sumergibles, permitiendo un control eficiente del flujo de agua entre las diferentes etapas del proceso.

Cada módulo del sistema fue diseñado con adaptaciones específicas según su función. El extractor de espumas incorpora una malla de acero inoxidable y difusores de aire, encargada de facilitar la separación de la espuma y el agua. El recipiente destinado a la desinfección mediante plasma frío cuenta con difusores, los cuales permiten una distribución uniforme del aire ionizado en el agua, optimizando el proceso de desinfección. Por su parte, el sistema de filtración biofísica fue construido de manera secuencial, iniciando con la absorción del agua a través de un filtro cerámico y continuando con un proceso de filtración por gravedad mediante capas de arena, piedra y carbón activado.

Finalmente, el agua tratada es conducida al recipiente de almacenamiento de agua limpia, donde permanece disponible para su reutilización en el sistema de lavado de manos. Este diseño integral permitió garantizar un tratamiento eficiente del agua, optimizando el uso del recurso hídrico y asegurando la calidad del agua recirculada.

Figura 15. Sistema de recirculación de agua.



En la Figura 15 se muestra el resultado final de la implementación del lavamanos, con la totalidad de su sistema hidráulico integrado y operando de manera óptima. En esta etapa, el prototipo es completamente funcional, lo que permitió la realización de las pruebas experimentales y la posterior toma de muestras de agua necesarias para el análisis y evaluación de calidad de agua.

4.2.1.3 Implementación del módulo de desinfección mediante plasma frío.

Para la implementación del sistema de desinfección mediante plasma frío se integraron componentes electrónicos y mecanismos previamente diseñados, con el propósito de garantizar una desinfección eficiente del agua recirculada en el prototipo de lavado de manos.

El sistema estuvo conformado por un Arduino Uno, el circuito generador de plasma, una fuente de alimentación de 12 V y 2A, una bobina de encendido tipo flyback y dos cámaras de ionización, como se observa en la figura 16. Cada cámara fue construida a partir de una botella de plástico adaptada como un dieléctrico. En su interior se dispuso un electrodo elaborado con un tubo de ensayo de vidrio que contenía, en la parte interna, una esponja metálica tipo lana de acero conectada a la salida del flyback, mientras que en la superficie externa se incorporó una lámina de

aluminio con conexión a tierra y dimensiones previamente calculadas para el ajuste de impedancias del sistema.

Figura 16. Cámara de ionización.



En el interior de dichas cámaras se alojaron los electrodos diseñados y fabricados específicamente para este proyecto, permitiendo la generación controlada de plasma no térmico. Para el suministro del gas, se empleó un motor de aire que inyectó un flujo constante hacia la cámara del reactor. En esta zona, la descarga eléctrica produjo plasma frío y generó especies reactivas de oxígeno y nitrógeno, responsables de la inactivación microbiológica. El aire ionizado resultante fue posteriormente conducido hacia el recipiente que contenía el agua, donde se efectuó el proceso de desinfección. La activación y el control del sistema se realizaron mediante el Arduino Uno, el cual generó una señal modulada a través del pin digital 13 para accionar el MOSFET IRLZ44N y excitar el transformador flyback. Esta configuración permitió obtener una descarga eléctrica estable y controlada, favoreciendo la formación de plasma no térmico bajo condiciones seguras de operación.

Figura 17. Implementación de Generación de plasma frío.



Como se muestra en la Figura 17, durante las pruebas de funcionamiento se evidenció la presencia de descargas luminosas de plasma frío en el interior de las cámaras de ionización, lo que confirma la adecuada ionización del aire y el correcto funcionamiento del sistema.

4.2.2 Implementación electrónica del sistema de lavado de manos.

Para la implementación electrónica del sistema de lavado de manos, se continuó con el proceso establecido en la etapa de diseño, desarrollando de manera práctica los dos componentes principales: el circuito generador de plasma frío y el sistema de control y automatización. Esta fase permitió materializar la parte funcional del prototipo, encargada tanto de la generación de especies reactivas para la desinfección del agua como del control automático de los procesos de filtrado y recirculación. Durante la implementación se ensamblaron los circuitos, se realizaron las conexiones eléctricas y se verificó el correcto funcionamiento de cada módulo, asegurando la integración entre los sistemas electrónicos, hidráulicos y estructurales del lavamanos.

4.2.2.1 Implementación del circuito para la generación de plasma frío.

Una vez verificado el correcto funcionamiento del circuito a nivel de simulación, se procedió a la fabricación de la placa de circuito impreso en baquelita, empleando la máquina CNC de la universidad CESMAG. Este proceso permitió obtener una alta precisión en el trazado de las

pistas y una adecuada disposición de los componentes electrónicos, reduciendo posibles interferencias y fallos de conexión.

Posteriormente, como se observa en la Figura 18, se realizó el montaje de los componentes electrónicos correspondientes, entre los cuales se incluyen un transistor BJT BC548, un MOSFET IRLZ44N, resistencias de control, un condensador de 22 nF / 250 V y dos borneras destinadas a las conexiones externas. Estas conexiones permiten la alimentación desde una fuente de 12 V, la interfaz con el microcontrolador Arduino Uno y la conexión al transformador flyback, encargado de elevar el voltaje necesario para la generación de la descarga eléctrica.

Figura 18. Circuito generador de plasma frío.



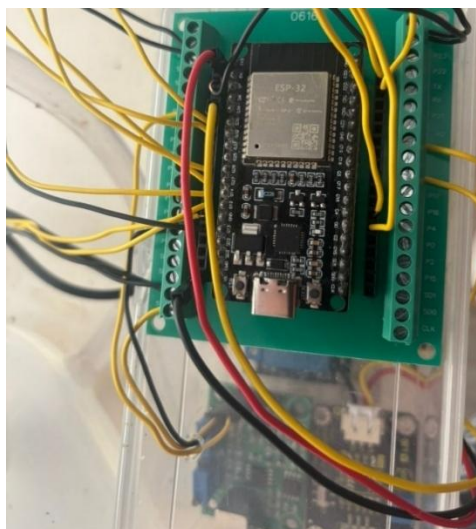
El circuito fue controlado mediante una señal digital proveniente del pin 13 del Arduino Uno, la cual se encarga de modular el encendido y apagado del MOSFET. Esta conmutación genera pulsos de alta frecuencia que excitan el transformador flyback, produciendo un campo eléctrico intenso capaz de ionizar el aire en el electrodo. Como resultado de este proceso se genera plasma frío, el cual es empleado en el sistema para la desinfección del agua recirculada del lavamanos.

4.2.2.2 Implementación del sistema de control y automatización del sistema del lavamanos.

Para el desarrollo del circuito encargado del control de las motobombas, así como del monitoreo de los sensores de nivel de agua, turbidez y pH, se realizó el montaje en una placa expansora de pines para el microcontrolador ESP32, como se muestra en la figura 19. Durante esta etapa se consideró cuidadosamente la correcta alimentación de todos los componentes electrónicos, así como la adquisición y procesamiento confiable de las señales provenientes de los

sensores. Esto permitió garantizar un monitoreo preciso de las variables fisicoquímicas y un control adecuado de los actuadores del sistema, asegurando el correcto funcionamiento del proceso de automatización.

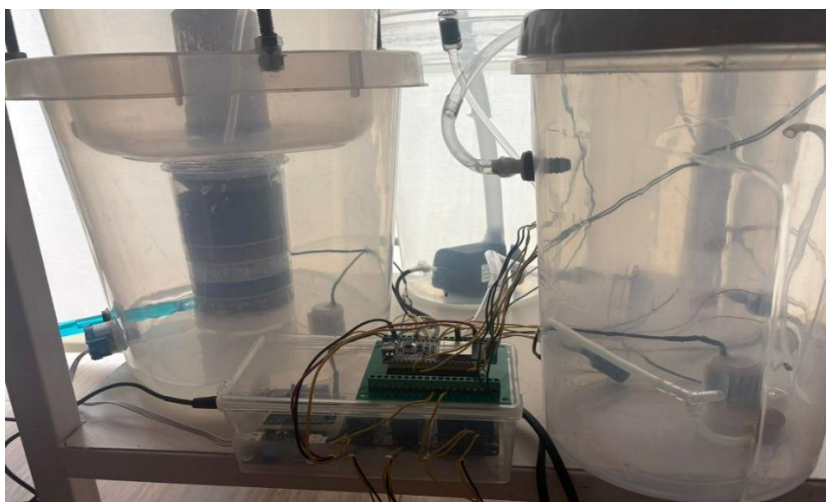
Figura 19. Circuito automatización y control del sistema.



Una vez finalizado el montaje de los sensores y actuadores requeridos, se incorporaron válvulas, las cuales facilitan la interconexión de los dispositivos externos ubicados en los distintos recipientes del sistema. Esta configuración permitió una instalación ordenada, segura y de fácil mantenimiento. Entre los dispositivos implementados se incluyen sensores ultrasónicos para la medición del nivel de agua, empleados para determinar los instantes de activación y desactivación de las motobombas, garantizando así el correcto desplazamiento del agua entre las diferentes etapas del proceso.

Adicionalmente, se integraron sensores de turbidez y pH, cuya información es utilizada para evaluar la calidad del agua tratada. Con base en estos parámetros, el sistema determina si el agua cumple con los rangos establecidos para su reutilización o si debe ser recirculada nuevamente hacia la etapa de desinfección, asegurando el cumplimiento de los criterios de calidad definidos.

Figura 20. Implementación de circuito de automatización y control del sistema.



La implementación final del sistema, presentada en la Figura 20, corresponde a la integración y organización de la placa expansora, los sensores anteriormente mencionados y los relés encargados del control de las bombas de agua, todos dispuestos dentro de una caja protectora. Asimismo, se realizó una adecuada gestión del cableado, lo que permitió mejorar el orden y la seguridad del montaje. Esta configuración facilita una operación automatizada, precisa y confiable del sistema hidráulico, garantizando el correcto funcionamiento del prototipo y el cumplimiento de los objetivos planteados en el proyecto.

El código desarrollado e implementado para garantizar el funcionamiento adecuado del sistema automatizado de lavado de manos se presenta en el Anexo 1, el cual permite el control de los procesos de tratamiento, desinfección, monitoreo y recirculación del agua, así como la activación coordinada de los sensores y actuadores involucrados en el prototipo.

El código implementa el control automático de un sistema de lavado de manos con recirculación y tratamiento de aguas grises, utilizando un microcontrolador (ESP32). Su objetivo principal es, controlar el proceso de desinfección, evaluación y reutilización del agua, optimizando el consumo del recurso hídrico.

El sistema inicia en estado de espera, monitoreando el nivel del tanque de aguas sucias mediante sensores ultrasónicos. Cuando el nivel alcanza el mínimo establecido, se activa la bomba de aguas grises, permitiendo el llenado del tanque de extracción de espuma. Una vez alcanzado el nivel máximo, se detiene el llenado y se activa un motor de aire, encargado de generar burbujas para la eliminación de espuma y residuos de jabón durante 1 hora.

Posteriormente, el agua es conducida al módulo de desinfección por plasma frío, donde se genera un pulso de activación y se espera la confirmación del sistema de plasma. En esta etapa se promueve la inactivación de microorganismos patógenos presentes en el agua durante 3 horas.

Una vez finalizado el proceso de desinfección, el agua es conducida al módulo de filtración biofísica, posteriormente, el fluido es transferido al sistema de monitoreo de calidad, en el cual se efectúan lecturas automáticas de pH y turbidez mediante los sensores electrónicos integrados al prototipo.

Estas mediciones no sustituyen los análisis de laboratorio, los cuales son necesarios para determinar la calidad higiénica del agua desde el punto de vista microbiológico, sin embargo, diversos estudios han demostrado que ciertos parámetros fisicoquímicos pueden emplearse como indicadores indirectos del estado microbiológico del agua, particularmente la turbidez. Se ha evidenciado una correlación positiva entre la turbidez y la presencia de coliformes fecales y totales, con coeficientes de correlación de hasta 0.80 NTU, lo que indica una relación significativa entre el aumento de partículas en suspensión y el incremento de la carga bacteriana [25].

Por su parte, el pH cumple un papel fundamental en la estabilidad química del agua y en la eficacia de los procesos de desinfección. Valores de pH fuera del rango neutro pueden indicar la presencia de compuestos ácidos o básicos derivados de materia orgánica, residuos de jabón o subproductos del tratamiento. Además, el pH influye directamente en la actividad microbiológica y en la efectividad de agentes desinfectantes, ya que condiciones extremas pueden inhibir o favorecer el crecimiento de ciertos microorganismos [24].

En este sentido, aunque el pH no presenta una correlación directa tan fuerte con la carga microbiológica como la turbidez, sí actúa como una variable crítica de control del proceso, permitiendo identificar alteraciones en la calidad del agua y validar que las condiciones del tratamiento se mantengan dentro de rangos adecuados para la inactivación microbiana.

Estas mediciones cumplen una función de control operativo en tiempo real, permitiendo detectar variaciones en la calidad del agua y activar decisiones automáticas, como la recirculación o la continuación del proceso de tratamiento.

Adicionalmente, el código controla el suministro de agua limpia durante el lavado de manos, mediante un pedal, garantizando que el agua solo sea dispensada cuando el sistema se encuentra en condiciones seguras y con nivel adecuado.

Finalmente, el código permite una gestión inteligente del agua, integrando tratamiento, desinfección, monitoreo continuo de variables fisicoquímicas y recirculación automática, contribuyendo a la reducción del desperdicio y al uso eficiente del recurso hídrico.

4.3 Presentación de resultados de las muestras experimentales del proceso de calibración.

En esta sección se presentan los resultados obtenidos durante la etapa de experimentación orientada al ajuste del sistema de desinfección mediante plasma frío. El objetivo de esta fase fue establecer condiciones operativas adecuadas del sistema, utilizando mediciones en línea de pH y turbidez, antes de realizar la validación mediante análisis de laboratorio.

Previo al envío de muestras al laboratorio, se desarrolló una fase experimental preliminar en la que se realizaron múltiples pruebas utilizando los sensores integrados al prototipo. Estas pruebas permitieron evaluar el comportamiento del sistema en condiciones reales de operación y ajustar parámetros críticos como la frecuencia de generación del plasma y el tiempo de exposición.

Durante las primeras pruebas se evidenciaron limitaciones en la generación de plasma, particularmente en configuraciones iniciales donde el sistema no lograba activarse de manera estable en ciertos rangos de frecuencia. Por ende, se realizaron modificaciones en el diseño del sistema, incluyendo la implementación de una configuración mejorada con dos puntos de generación de plasma (doble tubo), lo que permitió una mayor estabilidad en la descarga.

Adicionalmente, se utilizaron tiras reactivas de pH como método de referencia, con el fin de verificar las lecturas obtenidas por el sensor electrónico. Esto permitió validar de manera preliminar la coherencia de las mediciones y aumentar la confiabilidad del sistema de monitoreo.

A partir de estas pruebas, se identificaron tendencias en la estabilización del pH y en la reducción de partículas en suspensión, lo cual permitió seleccionar condiciones de operación adecuadas.

Es importante resaltar que esta fase no tuvo como objetivo determinar la calidad higiénica del agua, sino establecer condiciones óptimas de funcionamiento del sistema. Una vez definidos estos parámetros operativos, se procedió a la toma de muestras para su análisis en laboratorio, donde se evaluó de manera definitiva la eficacia del proceso de desinfección.

De esta manera, las mediciones realizadas con sensores y tiras reactivas constituyen una etapa previa de ajuste y calibración del sistema, mientras que la validación de los resultados se fundamenta en los análisis fisicoquímicos y microbiológicos realizados en laboratorio.

Para las muestras experimental se utilizó agua proveniente del lavamanos instalado en un hogar infantil, el cual fue empleado de manera habitual por niños con edades comprendidas entre los 3 y 5 años, como se muestra en la figura 21. Para la recolección de las muestras, se realizó una jornada de lavado de manos en la que participaron 12 niños del Hogar Comunitario “Mis Chiquitines”. en esta actividad, cada niño utilizó aproximadamente entre 1,0 a 1,5 litros de agua por lavado de manos, lo que permitió recolectar un volumen total cercano a 13 litros de agua residual.

Inmediatamente después de la recolección, se separó 2 litro de agua que fue utilizado en pruebas preliminares de ajuste y calibración del sistema de desinfección por plasma frío, en las cuales se evaluaron diferentes condiciones de operación, observadas en las tablas posteriores.

Pruebas como la intensidad de plasma en kHz aplicado y el tiempo de exposición del plasma sobre el agua, permitieron identificar parámetros adecuados de funcionamiento del sistema antes de su evaluación en laboratorio.

Los aproximadamente 11 litros restantes fueron almacenados durante tres días, mientras se concluían las pruebas preliminares de ajuste del sistema. Transcurrido este periodo, 5 litros de agua grises, fueron destinados a análisis fisicoquímicos y microbiológicos en laboratorio, con el fin de evaluar su estado.

El volumen restante fue distribuido para la fase experimental: aproximadamente 4.5 litros, fue utilizado en el estudio experimental del proceso de desinfección, el cual se desarrolló durante un día de operación continua. Durante esta fase, el agua fue sometida al tratamiento de desinfección, en primer lugar, la remoción de jabón, seguida de la aplicación de plasma frío, posteriormente un proceso de filtración y, finalmente, el monitoreo mediante sensores de pH y turbidez. Los 1.5 litros sobrantes del volumen inicial permanecieron almacenados en el recipiente de agua cruda (sucia) como reserva técnica del proceso.

Finalizado el proceso, las muestras tratadas fueron recolectadas y almacenadas conforme a las recomendaciones del laboratorio, para posteriormente ser transportadas y sometidas a análisis, permitiendo así evaluar la eficacia del sistema de desinfección.

Esta metodología permitió analizar tanto el comportamiento del agua sin tratamiento como su evolución tras el proceso de desinfección, bajo condiciones que representan escenarios reales de operación, considerando la presencia de residuos de jabón, materia orgánica y carga microbiológica asociada al uso cotidiano del sistema.

Figura 21. Recolección de muestras de agua de los niños del hogar infantil.



Es importante destacar que el proceso de desinfección mediante plasma frío está orientado principalmente a la inactivación de microorganismos, a través de la generación de especies reactivas, las cuales afectan la estructura celular de bacterias y otros patógenos. Sin embargo, este proceso no está diseñado para la remoción de sólidos suspendidos, por lo que no produce una reducción significativa de la turbidez ni un aclaramiento visible del agua.

En este sentido, la disminución de la turbidez observada en el sistema se logra mediante las etapas de filtración mecánica, que permiten la retención de partículas. Estos mecanismos físicos complementan el proceso de desinfección, mejorando las características fisicoquímicas del agua.

Para la realización de estas pruebas experimentales, se seleccionaron cinco frecuencias de operación del sistema de plasma frío. Del volumen total de 2 litros destinado a esta etapa, se emplearon 400 mL para cada frecuencia evaluada.

En cada caso, se realizó un muestreo del agua tratada a intervalos de 4 minutos, con el fin de analizar la evolución de los parámetros durante el tiempo de exposición al plasma.

De esta manera, el sistema implementa un enfoque combinado, en el cual el plasma frío actúa como agente de desinfección microbiológica, evidenciando variaciones en el pH del agua tratada. Los resultados obtenidos, presentados en la Tabla 2, indican que la generación efectiva de plasma frío depende directamente de la frecuencia de operación del sistema. A frecuencias bajas (9 kHz) y altas (20 kHz), no se logra la activación del plasma, lo que impide cualquier efecto sobre el agua tratada. En contraste, en el rango intermedio (11 kHz–18 kHz) se observa una operación estable, siendo 11 kHz la frecuencia que presenta mayor consistencia en la respuesta del sistema.

Tabla 2. Resultados de muestras experimentales en pH.

Muestra	Frecuencia (kHz)	Tiempo (min)	pH
1	9	4	No activa la generación del plasma.
	9	8	
	9	12	
	9	16	
2	11	4	6.2
	11	8	6.5
	11	12	6.9
	11	16	7.3
3	15	4	6.1
	15	8	6.2
	15	12	6.4
	15	16	6.8
4	18	4	6.0
	18	8	6.2
	18	12	6.4
	18	16	6.5
5	20	4	No activa la generación del plasma.
	20	8	
	20	12	
	20	15	

Para el análisis de la turbidez, se evaluaron las cinco muestras correspondientes a cada frecuencia de operación. Cada muestra, con un volumen de 400 mL, fue sometida al mismo proceso de filtración mecánica, manteniendo condiciones constantes de tiempo de 15 minutos.

Es importante señalar que, aunque todas las muestras fueron filtradas bajo las mismas condiciones, cada una había sido previamente expuesta al plasma frío a diferentes frecuencias, lo que permitió analizar si esta variable tenía alguna influencia sobre la turbidez del agua. Como se observa en la Tabla 3, el menor valor de turbidez se obtuvo de la muestra 2 (0.8 NTU), por lo que

se considera la condición más favorable dentro de las evaluadas. Esto indica una mayor eficacia en la remoción de partículas en suspensión, posicionándola como la mejor opción en términos de claridad del agua.

Tabla 3. Resultados de muestras experimentales en turbidez.

Muestra	Turbidez (NTU)
1	2.5
2	0.9
3	1.3
4	1.6
5	2.2

A partir de los resultados preliminares, se seleccionó la condición correspondiente a la muestra 2, al presentar el menor valor de turbidez. Un análisis más detallado de estos resultados se desarrollará en el capítulo siguiente.

Con base en estos ensayos, se definieron los parámetros de operación del sistema, los cuales fueron aplicados al volumen mayor de muestra destinado a los análisis de laboratorio.

En cuanto al tiempo de tratamiento, se asumió una relación proporcional con el volumen. Para 400 mL se determinó un tiempo óptimo de exposición al plasma de 16 minutos; por lo tanto, para un volumen de 4500mL (4.5 litros), el tiempo equivalente es aproximadamente de 180 minutos (3 horas).

De manera similar, el proceso de filtración mecánica presentó un tiempo de 15 minutos para 400 mL, lo que, bajo las mismas condiciones de operación, corresponde a aproximadamente 169 minutos (2 horas y 49 minutos) para 4.5 litros.

Adicionalmente, se tomó un volumen representativo de agua de las muestras antes y después del tratamiento, el cual fue dispuesto en recipientes independientes con fines de registro fotográfico y verificación mediante tiras indicadoras de pH.

Por otra parte, las mediciones de pH y turbidez reportadas en este estudio se realizaron directamente en el sistema, utilizando los sensores implementados, con el fin de obtener datos en condiciones reales de operación. Con base en este procedimiento, se obtuvieron los siguientes resultados.

4.3.1 Pruebas de observación directa.

En este subcapítulo se presentan las observaciones cualitativas realizadas durante el proceso experimental final. La primera muestra correspondió al agua residual sin tratar, obtenida directamente del lavamanos antes de su ingreso al sistema de tratamiento. La segunda muestra fue tomada una vez el agua había pasado por el sistema de desinfección mediante plasma frío y el proceso de filtración correspondiente.

Las evaluaciones efectuadas permitieron identificar cambios perceptibles en las características físicas del agua antes y después del tratamiento, tomando como referencia parámetros cualitativos tales como la coloración, la presencia de partículas en suspensión, el olor y el nivel aparente de turbidez. Es importante señalar que los análisis desarrollados en este apartado se realizaron exclusivamente mediante observación óptica directa, sin el uso de instrumentos de medición especializados, con el objetivo de obtener una apreciación visual preliminar del impacto del sistema de plasma frío y del filtro mecánico sobre las aguas grises tratadas.

Como se observa en la figura 22, la muestra corresponde a el agua sin tratar, proveniente del lavado de manos, presentó una coloración oscura evidente y una turbidez marcada, lo que dificultó la visibilidad a través del recipiente. Asimismo, se observaron partículas en suspensión y una apariencia opaca, asociadas principalmente a la presencia de residuos de jabón y suciedad arrastrada durante el proceso de lavado. Adicionalmente, el agua exhibió una textura ligeramente viscosa y un olor leve, característico a agua estancada, lo cual evidenció la acumulación de compuestos orgánicos y residuos de detergentes. Estas características confirmaron, de manera cualitativa, el elevado grado de contaminación inicial del agua previo a su ingreso al proceso de tratamiento.

Figura 22. Muestra de agua sucia.



A diferencia de lo observado, en la figura 23, corresponde a una muestra de agua tratada mediante plasma frío y posteriormente filtrada a través del sistema biofísico, la muestra analizada presenta una apariencia completamente transparente, sin el tono oscuro previamente identificado. Asimismo, se detecta un olor propio del ozono, lo cual es indicativo de procesos oxidativos activos. Adicionalmente, el líquido exhibe una mayor fluidez, lo que sugiere una mejora en sus características físicas tras el tratamiento aplicado.

Figura 23. Muestra de agua después del plasma.



Los resultados de estas observaciones directas permiten evidenciar de manera preliminar que la selección de la frecuencia y el tiempo de operación correspondientes a la muestra 2 aplicada en la muestra que posteriormente fue enviada a laboratorio, sugieren una variación positiva en las condiciones visuales asociadas a la posible reducción de contaminantes orgánicos e inorgánicos.

No obstante, para dar mayor soporte a estas observaciones, se presenta los resultados de las pruebas de medición. Esto permite establecer una conexión más clara entre los resultados visuales y los parámetros del sistema, sirviendo como base para los análisis cuantitativos posteriores.

4.3.2 Pruebas de medición

En este subcapítulo se presentan las pruebas de medición realizadas durante el proceso experimental, las cuales tienen como objetivo cuantificar de manera precisa las propiedades físicas y químicas del agua en las distintas etapas del tratamiento. A diferencia de las observaciones directas, estas pruebas emplearon instrumentos y sensores específicos que permiten obtener datos numéricos confiables, contribuyendo a un análisis más objetivo del desempeño del sistema.

Adicionalmente, las mediciones realizadas mediante los sensores de pH y turbidez, así como el uso de tirillas indicadoras, tuvieron como propósito corroborar los resultados obtenidos en los experimentos preliminares, permitiendo verificar la consistencia de los datos y asegurar que las condiciones de operación seleccionadas fueran adecuadas. Esto permitió tener un mayor nivel de confianza en el proceso antes de proceder con los análisis de laboratorio.

Es importante aclarar que la determinación final de la eficacia del proceso de desinfección no se basa únicamente en estas mediciones, sino en los resultados obtenidos en laboratorio, particularmente a través del Índice de Riesgo de la Calidad del Agua (IRCA), el cual evalúa de manera integral los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos. No obstante, el seguimiento de variables como el pH y la turbidez proporciona un criterio preliminar que permite inferir el comportamiento del sistema y validar que el tratamiento se encuentra operando dentro de condiciones adecuadas.

Entre las pruebas realizadas se incluyen:

- Medición de pH: se efectuó utilizando tirillas de pH y un sensor electrónico de rango 0–14, con el fin de determinar la acidez o alcalinidad del agua antes y después del tratamiento. Estas

mediciones permiten evaluar la influencia del sistema de plasma frío en la posible neutralización de compuestos presentes en las aguas grises.

- Medición de turbidez: se realizó empleando un sensor de turbidez SEN0189, el cual permite cuantificar la cantidad de partículas en suspensión en el agua. Esta prueba proporciona información sobre la efectividad del filtro mecánico, dado que el plasma frío no incide directamente en la remoción de sólidos.

Estas pruebas constituyen la base para un análisis cuantitativo del tratamiento de aguas grises, complementando las observaciones visuales y permitiendo verificar la eficacia del sistema en términos de parámetros críticos como pH, turbidez y volumen de agua.

4.3.2.1 Pruebas de pH

Se realizaron mediciones de pH utilizando tirillas indicadoras y un sensor electrónico de pH 0-14, con el fin de evaluar la variación en la acidez o alcalinidad del agua a lo largo del proceso de tratamiento.

Para este análisis se tomó una única muestra al inicio del sistema, correspondiente al agua residual sin tratar, con el propósito de establecer las condiciones iniciales del agua. Esta muestra fue evaluada mediante dos métodos, con el fin de comparar la precisión de las mediciones:

- Muestra 1: Medición con tirillas de pH.
- Muestra 2: Medición con sensor de pH.

Posteriormente, durante el paso del agua por el sistema de plasma frío y filtración mecánica, se realizaron diferentes mediciones a lo largo del tiempo, con el objetivo de evaluar la evolución del pH durante el proceso de tratamiento y analizar el comportamiento del sistema bajo distintas condiciones operativas:

- Muestras intermedias: Medición con tirillas de pH.
- Muestras intermedias: Medición con sensor de pH.

Finalmente, se tomó una única muestra al final del tratamiento, correspondiente al agua ya procesada, con el fin de comparar las condiciones iniciales y finales del sistema y evaluar el efecto global del proceso de desinfección:

- Muestra final: Medición con tirillas de pH.
- Muestra final: Medición con sensor de pH.

4.3.2.1.1 Tirillas de pH

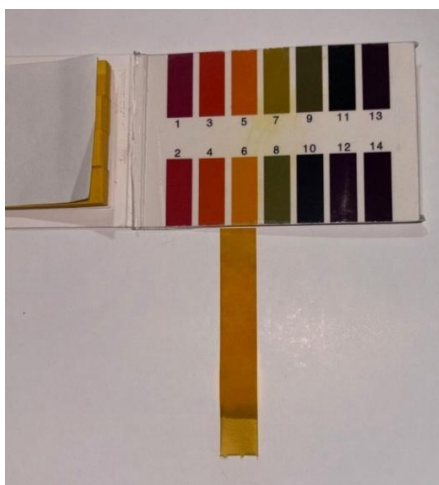
Las tirillas indicadoras de pH son herramientas de medición cualitativa y semicuantitativa ampliamente utilizadas para estimar el grado de acidez o alcalinidad de soluciones acuosa. Están elaboradas a partir de papel absorbente impregnado con indicadores químicos sensibles a la concentración de iones hidrógeno (H^+), los cuales experimentan cambios de color según el valor de pH del medio analizado.

Estas tirillas permiten determinar valores de pH dentro de un rango específico, comúnmente entre pH 0 y 14, mediante la comparación visual del color obtenido con una escala cromática de referencia proporcionada por el fabricante. Es importante destacar que este tipo de tirillas presenta una resolución discreta, generalmente con intervalos de una unidad de pH, por lo que no permiten mediciones con valores decimales. En consecuencia, la lectura se realiza identificando el color que más se asemeje dentro de la escala y asignando el valor entero correspondiente.

Como se observa en la Figura 24, la tirilla indicadora correspondiente a la muestra de agua residual proveniente del lavado de manos, evidenciando un valor de pH aproximado de 6, caracterizando un medio ligeramente ácido. Dado que el sistema se encuentra limitado a un solo ciclo de operación, esta medición corresponde al pH inicial del agua sin tratamiento.

Este comportamiento puede atribuirse a la presencia de materia orgánica, residuos de detergentes y a la actividad microbiana presente antes de la aplicación del proceso de tratamiento.

Figura 24. Tirilla de pH agua sin tratamiento.



Durante el paso del agua por el sistema de plasma frío, se realizaron diferentes mediciones a lo largo del tiempo con el propósito de evaluar la evolución del pH durante el proceso de tratamiento del sistema. Estas mediciones permitieron observar cómo varía el pH en función del tiempo de exposición y de los parámetros de operación del sistema previamente definidos.

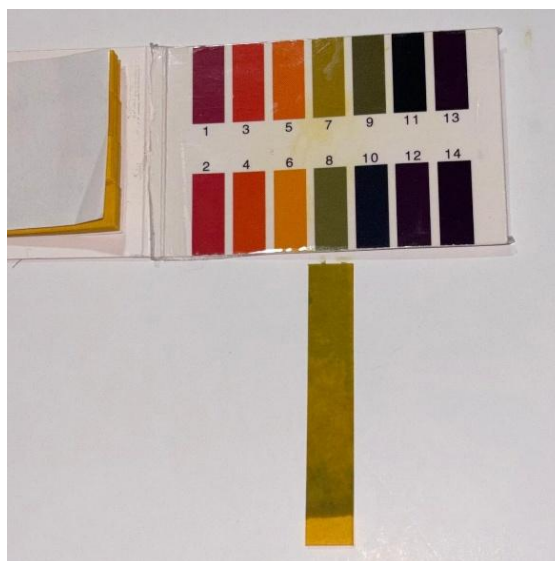
Es importante señalar que las mediciones fueron realizadas mediante tirillas indicadoras de pH, las cuales presentan una escala discreta sin valores decimales; por lo tanto, cada registro corresponde a una aproximación al valor entero más cercano, determinada a partir del color que más se asemeja dentro de la escala cromática de referencia. Los resultados obtenidos se presentan de manera detallada en la Tabla 4, donde se comparan las variaciones registradas diferentes momentos del proceso.

Tabla 4. Resultados de las muestras Intermedias de pH con tirillas.

<i>Tiempo (min)</i>	<i>pH</i>
30	6.0
60	6.0
90	6.0
120	7.0
150	7.0
180	7.0

En la Figura 25 se observa que, tras la exposición al plasma frío bajo las condiciones de frecuencia y tiempo previamente establecidas, el pH del agua se incrementa hasta alcanzar un valor aproximado de 7, situándose cercano a la neutralidad. Este comportamiento indica una variación en las condiciones químicas del medio, atribuible a la acción de especies reactivas generadas por el plasma, las cuales favorecen la oxidación de compuestos orgánicos de carácter ácido presentes en el agua residual, así como la disminución de la carga microbiológica.

Figura 25. Tirilla de pH agua tratada con plasma frio



4.3.2.1.2 Sensor de pH 0 – 14

El sensor de pH 0-14 empleado, es un instrumento de medición que proporciona valores numéricos precisos sobre la acidez o alcalinidad de soluciones acuosas. Su funcionamiento se basa en un electrodo de vidrio sensible a los iones hidrógeno (H^+) y un electrodo de referencia, que generan un potencial eléctrico proporcional a la concentración de estos iones. Este potencial es transformado en un valor de pH confiable y reproducible mediante el sistema del sensor.

La utilización de una función lineal para este proceso se fundamenta en la Ecuación de Nernst, la cual establece que el potencial de un electrodo varía de manera directamente proporcional al logaritmo de la actividad iónica. Como el pH es el logaritmo negativo de dicha actividad, la relación entre el voltaje y el pH es lineal [35].

Para obtener la ecuación de calibración utilizada en el código presentado en el Anexo 2, se emplearon dos soluciones patrón con valores de pH conocidos de 4.01 y 6.86. Con el objetivo de reducir la variabilidad y garantizar la repetibilidad estadística, se realizó un protocolo de medición con 4 lecturas para cada solución. Los datos obtenidos se presentan en la Tabla 5:

Tabla 5. Lecturas con las soluciones patrones de pH.

Solución	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3	Lectura 4	Promedio	Desviación
pH	(v)	(v)	(v)	(v)	(v)	Estándar
4.01	1.73	1.73	1.72	1.74	1.73	± 0.008
6.86	1.37	1.37	1.38	1.36	1.37	± 0.008

A partir de estos promedios, se establecieron los puntos de referencia:

$$pH_1 = 4.01 \rightarrow V_1 = 1.73v$$

$$pH_2 = 6.86 \rightarrow V_2 = 1.37v$$

Se determino la relación lineal entre el pH y el voltaje, mediante la ecuación (11):

$$pH = m \cdot V + B \quad (11)$$

Primero se calcula la pendiente (m):

$$m = \frac{pH_2 - pH_1}{V_2 - V_1} \quad (12)$$

$$m = \frac{6.86 - 4.01}{1.37 - 1.73} = \frac{2.85}{-0.36} = -7.92$$

Ahora se calcula la constante b utilizando uno de los (pH_1 y V_1)

$$b = pH - m \cdot V \quad (13)$$

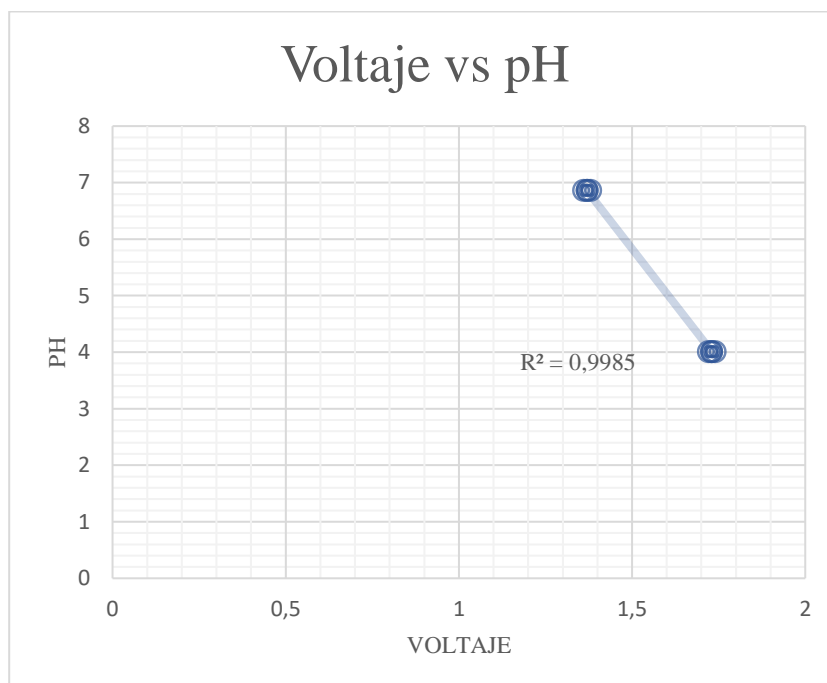
$$b = 4.01 - (-7.92 \cdot 1.73)$$

$$b = 17.71$$

Finalmente, la ecuación de calibración del sensor de pH utilizada en el código Arduino, Anexo 2, queda definida como:

$$pH = -7.92 \cdot V + 17.71 \quad (14)$$

Figura 26. Calibración y análisis de regresión lineal del sensor de pH (Voltaje vs. pH).



Como se observa en la Figura 26, al aplicar el análisis de regresión lineal sobre el conjunto de datos de la Tabla 5, se obtuvo un coeficiente de determinación $R^2 = 0,9985$. Este valor cercano a la unidad confirma que el modelo lineal explica el 99,85% de la variabilidad de los datos, validando la precisión del sensor en el rango de trabajo. Asimismo, la baja desviación estándar registrada demuestra una alta repetibilidad del sistema frente a mediciones sucesivas.

Una vez calibrado el sensor de pH, y a partir de la ecuación de calibración obtenida, se procede a la adquisición de datos correspondientes a siete muestras analizadas durante el desarrollo del experimento. Como se observa en la Tabla 6, la primera muestra corresponde al agua residual sin tratamiento, la cual, debido a la limitación del sistema a un único ciclo de operación, fue la única muestra inicial tomada y utilizada como referencia para el proceso de purificación. La medición inicial del agua residual, realizada mediante el sensor de pH previamente calibrado, arrojó un valor cercano a 6,1, caracterizando un medio ligeramente ácido. Este comportamiento se asocia a la presencia de materia orgánica, residuos de detergentes y actividad microbiana presentes antes de la aplicación del tratamiento con plasma frío.

Posteriormente, se recolectaron cinco muestras intermedias a intervalos de 30 minutos, con el fin de evaluar la evolución del pH a lo largo del tratamiento, y se observó que, a diferencia de las tirillas indicadoras, el sensor de pH proporciona mediciones cuantitativas con mayor precisión,

permitiendo la lectura de valores decimales, lo que incrementa significativamente la exactitud en el seguimiento del comportamiento del sistema.

Finalmente, una muestra al término del tiempo total calculado, correspondiente al agua ya desinfectada bajo las condiciones de frecuencia y tiempo previamente establecidas, el pH del agua presenta un incremento progresivo hasta alcanzar un valor cercano a 7.2, situándose en un rango próximo a la neutralidad. Este comportamiento evidencia una modificación en las condiciones químicas del medio, atribuible a la acción de especies reactivas generadas por el plasma, las cuales favorecen la oxidación de compuestos orgánicos de carácter ácido y la reducción de la carga microbiológica presente en el agua residual.

Tabla 6. Resultados de la muestra de pH del agua en diferentes tiempos con el sensor.

<i>Tiempo (min)</i>	<i>pH</i>
0	6.1
30	6.4
60	6.5
90	6.7
120	6.8
150	6.9
180	7.2

4.3.2.2 Pruebas de turbidez

Se realizaron mediciones de turbidez utilizando el sensor analógico de turbidez Keyestudio modelo SEN0189 instalado en el sistema, con el fin de evaluar la variación en la claridad del agua a lo largo del proceso de tratamiento. Este parámetro se expresa en Unidades Nefelométricas de Turbidez (NTU), estándar ampliamente utilizado para cuantificar la presencia de partículas suspendidas en el agua.

Para este análisis se tomó una única muestra inicial correspondiente al agua residual sin tratar, debido a que el sistema fue diseñado para operar en un solo ciclo experimental; por lo tanto, el agua sucia evaluada es la misma durante todo el proceso, estableciéndose como referencia base del sistema:

- Muestra 1: Medición de turbidez del agua residual antes del tratamiento (NTU).

Posteriormente, durante el paso del agua por el sistema de plasma frío y filtración mecánica, se realizaron mediciones intermedias en intervalos de tiempo definidos, con el objetivo de evaluar la evolución de la turbidez y reducir la incertidumbre asociada a la variabilidad del proceso:

- Muestras intermedias: Mediciones de turbidez en distintos tiempos de operación durante la desinfección mediante plasma frío (NTU).

Finalmente, se tomó una muestra una vez finalizada el proceso completo de tratamiento, específicamente después de que el agua atravesó el sistema de filtración mecánica, representando así la condición final del agua tras su desinfección:

- Muestra final: Medición de turbidez posterior al proceso de desinfección (NTU).

4.3.2.2.1 Sensor de turbidez

El sensor de turbidez empleado es un instrumento de medición que permite estimar la cantidad de partículas suspendidas en un fluido, expresada en unidades nefelométricas de turbidez (NTU). Su funcionamiento se basa en el principio de dispersión óptica de la luz, mediante un diodo emisor infrarrojo y un fototransistor receptor. Cuando la luz atraviesa el agua, las partículas en suspensión generan dispersión, reduciendo la intensidad luminosa que llega al receptor. Esta variación es transformada en una señal eléctrica proporcional al nivel de turbidez.

A diferencia de sensores como el de pH, cuya respuesta puede modelarse de forma lineal a partir de fundamentos electroquímicos, la respuesta del sensor de turbidez presenta un comportamiento inherentemente no lineal, debido a la naturaleza de la dispersión de la luz y la variabilidad en las características de las partículas suspendidas. Por esta razón, se empleó un modelo de regresión polinómica para describir con mayor precisión la relación entre la señal del sensor y la turbidez.

Para obtener la ecuación de calibración utilizada en el sistema, se realizó un procedimiento experimental con diferentes muestras que cubren un rango amplio de turbidez. Con el objetivo de garantizar la representatividad de los datos, se tomaron mediciones del convertidor analógico-digital (ADC) del microcontrolador, asociándolas con valores estimados de turbidez en NTU. Los datos obtenidos se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7. Lecturas experimentales del sensor de turbidez para diferentes valores de ADC.

Muestras (ADC)	Lectura 1 (NTU)	Lectura 2 (NTU)	Lectura 3 (NTU)	Lectura 4 (NTU)	Promedio (NTU)
2000	0	0.2	0	0.1	0.075
1800	56	55	53	56	55
1500	205	208	215	212	210
1000	705	690	695	710	700
500	3140	3147	3153	3160	3150
0	9989	10001	9995	10015	10000

A partir de estos promedios, se establecieron los puntos de referencia:

$$ADC_1 = 2000 \rightarrow NTU_1 = 0.075$$

$$ADC_2 = 1800 \rightarrow NTU_2 = 55$$

$$ADC_3 = 1500 \rightarrow NTU_3 = 210$$

$$ADC_4 = 1000 \rightarrow NTU_4 = 700$$

$$ADC_5 = 500 \rightarrow NTU_5 = 3150$$

$$ADC_6 = 0 \rightarrow NTU_6 = 10000$$

A partir de los datos experimentales obtenidos, se determinó la relación entre la señal del sensor (ADC) y la turbidez (NTU) mediante un modelo polinómico de segundo grado, como se muestra en la ecuación (15):

$$NTU = a(ADC)^2 + b(ADC) + c \quad (15)$$

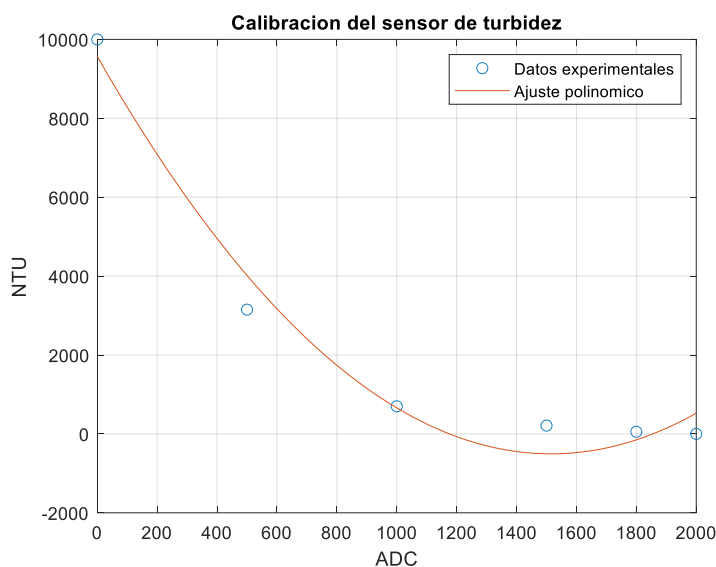
Debido al comportamiento no lineal del sensor de turbidez, no es adecuado emplear una aproximación lineal basada en dos puntos. Por esta razón, se utilizó el método de mínimos cuadrados para ajustar un modelo polinómico que represente de manera más precisa la relación entre las variables.

El cálculo de los coeficientes a , b y c se realizó mediante el uso del software MATLAB, empleando la función *polyfit*, la cual permite obtener un ajuste polinómico a partir de múltiples datos experimentales. El código implementado para dicho cálculo se presenta en el Anexo 4.

Finalmente, la ecuación de calibración del sensor de turbidez, empleada en el código de Arduino, Anexo 3, para la estimación de la turbidez en las muestras de agua, se define como:

$$NTU = 0.004388(ADC)^2 + -13.297949(ADC) + 9569.755523 \quad (16)$$

Figura 27. Calibración y análisis de regresión polinómica del sensor de turbidez (ADC vs. NTU).



Como se observa en la Figura 27, al aplicar el ajuste por regresión polinómica de segundo grado sobre los datos experimentales de la Tabla 7, se obtiene una curva que describe adecuadamente la relación no lineal entre la señal del sensor (ADC) y la turbidez (NTU). El comportamiento de la curva evidencia una disminución progresiva de la turbidez a medida que aumentan los valores de ADC, lo cual es consistente con el principio de funcionamiento del sensor basado en la dispersión de la luz.

El modelo polinómico obtenido presenta un alto grado de ajuste respecto a los datos experimentales, con un coeficiente de determinación $R^2 = 0.9775$. Este valor, cercano a la unidad, indica que el modelo explica el 97.75% de la variabilidad de los datos, lo que valida su uso como ecuación de calibración dentro del sistema de monitoreo. Asimismo, se observa que la mayor variación de los datos se concentra en los rangos bajos de ADC, donde el sensor presenta mayor sensibilidad ante cambios en la concentración de partículas suspendidas.

A partir de la ecuación de calibración obtenida, se procede a la estimación de los valores de turbidez, presentados en la Tabla 8, de las diferentes muestras de agua analizadas durante el desarrollo experimental. La primera muestra con tiempo de cero, corresponde al agua residual sin tratamiento, caracterizada por valores elevados de turbidez, asociados a la presencia de sólidos suspendidos y materia orgánica.

Posteriormente, se evalúa la evolución de la turbidez en muestras intermedias, tomadas cada 30 minutos, observándose variaciones en los valores de NTU sin evidenciar una disminución significativa. Este comportamiento indica que el tratamiento con plasma no genera un impacto notable en la reducción de la turbidez, lo cual es coherente con su principio de funcionamiento, ya que está orientado principalmente a la inactivación de microorganismos y no a la remoción de partículas suspendidas. En consecuencia, los valores de NTU no presentan cambios sustanciales durante esta etapa del proceso.

Finalmente, en la última muestra, correspondiente a un tiempo total de 349 minutos, se evidencia una reducción significativa de la turbidez, alcanzando valores cercanos a condiciones de agua clarificada. Es importante señalar que esta muestra fue tomada posteriormente a las 3 horas de exposición del agua al tratamiento con plasma, y tras su paso por el filtro mecánico. La baja concentración de NTU obtenida se atribuye principalmente al proceso de filtración, el cual contribuyó a la remoción de partículas suspendidas, favoreciendo la obtención de un valor de turbidez dentro del estándar de calidad de agua.

Tabla 8. Resultados de la muestra de agua en diferentes tiempos de turbidez con el sensor.

<i>Tiempo (min)</i>	<i>NTU</i>
0	50
30	47
60	46
90	44
120	43
150	43
180	43
349	0.8

4.3.2.3 Cuantificación del Agua.

Para evaluar el desempeño hidráulico del prototipo y cuantificar el aprovechamiento del recurso hídrico, se realizó un seguimiento del volumen de agua en las distintas etapas del proceso. Durante la jornada experimental de lavado de manos, se recolectó un total de 13 litros de agua residual, distribuidos de la siguiente manera:

Análisis y calibración: Se destinaron 7 litros, de los cuales 2 litros fueron utilizados para pruebas iniciales de los sensores y 5 litros para la caracterización en laboratorio.

Volumen operativo: Se dispusieron 4.5 litros para su ingreso al sistema de tratamiento (plasma frío y filtración).

Residuo de manejo: Los 1.5 litros restantes correspondieron al volumen retenido en el recipiente de recolección inicial.

La medición del volumen se realizó mediante un sensor ultrasónico HC-SR04, cuyo código se presenta en el Anexo 5, complementado con validación mediante instrumentos métricos convencionales. Para la estimación del volumen, se aplicaron relaciones geométricas correspondientes a la forma de los recipientes: geometría prismática para el tanque de agua residual y geometría cilíndrica para el tanque de agua tratada.

Los resultados del balance de flujo se presentan en la Tabla 9.

Tabla 9. Recuperación volumétrica del sistema.

Etapas del Proceso	Volumen (L)	Observaciones
Entrada al Sistema	4.5	Agua residual cruda post-lavado.
Salida (Agua Tratada)	3.8	Volumen efectivo disponible para nuevo uso.
Pérdidas Operativas	0.7	Retención en filtros, adherencia y evaporación.
Porcentaje de Recuperación	84.44%	Respecto al volumen total ingresado al sistema en un ciclo.

A partir del balance volumétrico, se observa que, de los 4.5 litros ingresados al sistema de tratamiento, se recuperaron 3.8 litros de agua tratada, lo que corresponde a una eficacia de recuperación del 84.44%. La diferencia de 0.7 litros se atribuye principalmente a la retención de líquido en el medio filtrante y a pérdidas por adherencia en las superficies internas del sistema.

El uso del sensor ultrasónico facilitó el monitoreo de los niveles en los tanques de almacenamiento de forma automatizada, permitiendo verificar la estabilidad del caudal durante las fases de operación y recirculación del sistema.

5. Análisis y discusión de resultados

5.1 Análisis pruebas de laboratorio

En el presente capítulo se exponen los resultados fisicoquímicos y microbiológicos obtenidos en el laboratorio especializado de la Universidad de Nariño, acreditado por el IDEAM conforme a la Resolución No. 0523 del 04 de junio de 2024. Los ensayos incluyeron la determinación de parámetros como pH, turbidez, color aparente, alcalinidad total, dureza, cloro residual, hierro, nitritos y nitratos, Asimismo, se integró el análisis microbiológico para identificar la presencia de microorganismos Mesófilos y la bacteria *Escherichia coli*, considerados indicadores críticos de contaminación biológica y determinantes para evaluar la seguridad sanitaria del recurso hídrico tratado.

Para evaluar la eficacia del sistema de tratamiento, el procedimiento experimental se estructuró a partir de una secuencia definida. Inicialmente, se tomó como referencia agua domiciliaria, suministrada por la red de Empopasto, la cual cumple con la normativa de potabilidad vigente. Posteriormente, esta agua fue utilizada en el proceso de lavado de manos, generando agua residual (agua gris) con un mayor nivel de contaminación.

Una vez generada, el agua residual fue recolectada y dividida para su análisis: una fracción se reservó como la muestra del agua sin tratamiento, y la otra muestra fue sometida al sistema de filtración y desinfección mediante plasma frío. Finalmente, ambas muestras fueron enviadas al laboratorio, junto con la de referencia inicial, para su respectivo análisis fisicoquímico y microbiológico, permitiendo así una comparación directa entre el estado inicial, el agua contaminada y el agua tratada.

La muestra de agua residual sin tratamiento correspondió a un volumen de 5 litros, definido previamente en capítulos anteriores como referencia del estado de contaminación. Por otra parte, la muestra de agua tratada presentó un volumen aproximado de 3.8 litros al finalizar el proceso.

La Tabla 10 presenta la comparación de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos evaluados en tres condiciones del agua: agua domiciliaria (referencia), agua residual antes del tratamiento y agua después del tratamiento con el sistema de filtración y desinfección mediante plasma frío, junto con los valores máximos aceptables establecidos en la normativa colombiana.

En términos generales, se evidencia un deterioro significativo de la calidad del agua tras su uso en el lavado de manos, reflejado principalmente en el incremento de la turbiedad (de 0.59 a

54.4 NTU), el color aparente (de <5 a 165.9 UPC) y la carga microbiológica (coliformes totales de <1 a 54,000 UFC/100 cm³ y *Escherichia coli* de <1 a 315 UFC/100 cm³). Estos cambios confirman la alta contaminación del agua residual, clasificándola como no apta para uso sanitario.

Posteriormente, al aplicar el sistema de tratamiento, se observa una reducción sustancial de los parámetros críticos. La turbiedad disminuye a 0.80 NTU y el color aparente a 5.7 UPC, cumpliendo con los límites establecidos. De igual forma, los metales como hierro, aluminio y manganeso presentan concentraciones finales por debajo de los valores máximos permisibles, evidenciando una remoción efectiva. El pH, que inicialmente se encontraba ligeramente ácido (6.30), se estabiliza en 7.68, ubicándose dentro del rango normativo.

En el componente microbiológico, la eficacia del sistema es aún más notable, ya que se logra la reducción de coliformes totales y *Escherichia coli* a valores <1 UFC/100 cm³, cumpliendo con el criterio de ausencia exigido por la normativa. No obstante, se identifica un ligero incremento en los Mesófilos (120 UFC/100 cm³), superando el límite normativo de 100, lo cual puede atribuirse a la flora bacteriana común presente tras los periodos de almacenamiento. Sin embargo, este parámetro no afectó el cálculo del IRCA de la muestra tratada, el cual se mantuvo en 0% gracias a la ausencia total de patógenos de mayor riesgo como *E. coli*, lo que, demuestra la capacidad del sistema para eliminar la contaminación fecal específica presente en el agua residual.

Al comparar el agua tratada con el agua domiciliaria de referencia, se observa que ambos presentan características similares en la mayoría de los parámetros, e incluso en algunos casos el agua tratada alcanza valores iguales o cercanos a los del agua potable suministrada por la red. Sin embargo, se identifican ligeras variaciones en parámetros como cloro residual y mesófilos, que, aunque dentro o cercanos a los límites aceptables, pueden atribuirse a las diferencias propias entre un sistema convencional de potabilización y el tratamiento implementado.

Finalmente, el análisis del Índice de Riesgo de la Calidad del Agua (IRCA) confirma estos resultados: el agua domiciliaria presenta un IRCA del 2 % (sin riesgo), el agua residual un IRCA del 100 % (inviabile sanitariamente) y el agua tratada un IRCA del 0 % (sin riesgo). Esto significa que logra transformar un agua altamente contaminada en un recurso que cumple con los estándares de calidad para consumo humano.

Para un análisis más detallado, los resultados originales y el puntaje asignado a cada parámetro en las diferentes muestras de agua pueden consultarse en los Anexos 6, 7 y 8. Dichos puntajes fueron establecidos por el laboratorio especializado conforme a la normativa vigente, y

constituyen la base para el cálculo del Índice de Riesgo de la Calidad del Agua (IRCA). Esto permite verificar con precisión la valoración individual de cada variable evaluada en cada una de las muestras analizadas.

Tabla 10. Comparación de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del agua domiciliaria, agua residual sin tratamiento y agua tratada mediante desinfección con plasma frío.

Resultados de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos					
Parámetro	Prueba de agua domiciliaria	Prueba de agua anterior al tratamiento	Prueba de agua después del tratamiento	Valor máximo aceptable	Unidad de medida
PH (Medición en Laboratorio)	6.40	6.30	7.68	6.5 – 9.0	pH
Color Aparente	< 5.00	165.9	5.7	15	UPC
Turbiedad	0.59	54.4	0.80	2	NTU
Conductividad a 25°C		136.8	–	–	us/cm
Acidez	6.73	17.82	4.01	–	mg CaCO ₃ /L
Alcalinidad total	< 20.00	27.36	35.02	200	mg CaCO ₃ /L
Dureza total	34.7	41.6	49.7	300	mg CaCO ₃ /L
Dureza Calcio	24.75	21.29	33.43	–	mg CaCO ₃ /L
Dureza Magnesio	9.9	20.3	16.2	–	mg CaCO ₃ /L
Cloruros	13.22	7.40	15.94	250	mg Cl/L
Hierro total	0.05	0.17	< 0.05	0.3	mg Fe+3/L
Fosfatos	< 0.05	< 0.05	0.09	0.5	mg P-PO ₄ /L
Nitritos	< 0.01	0.075	<0.01	0.1	mg N-NO ₂ /L
Nitratos	1.16	0.172	1.19	10	mg N-NO ₃ /L
Amonio	0.2	0.2	0.2	–	mg N-NH ₄ /L
Sulfatos	< 2.00	8.7	4.7	250	mg SO ₄ /L
Cloro residual	1.11	–	0.03	0.3–2.0	mg Cl ₂ /L
Magnesio	2.41	4.93	3.94	36	mg Mg/L
Calcio	9.90	8.51	13.37	60	mg Ca/L
Aluminio	0.011	0.307	0.014	0.2	mg Al/L
Zinc	< 0.018	0.3	< 0.018	3	mg Zn/L
Manganeso	0.045	0.287	< 0.052	0.1	mg Mn/L
Coliformes totales	< 1	54000	< 1	Negativo	UFC / 100 cm ³
Echerichia coli	< 1	315	< 1	Negativo	UFC / 100 cm ³
Mesofilos	9	–	120	100	UFC / 100 cm ³
IRCA	2	100	0		%

La Tabla 11 evidencia diferencias marcadas en el puntaje de riesgo entre las tres condiciones evaluadas. Aunque el agua domiciliaria presenta valores cercanos a cero y un IRCA del 2 %, lo que la clasifica como sin riesgo, algunos parámetros como el pH aún muestran ligeras variaciones, indicando que su calidad, aunque aceptable, no es completamente ideal.

En contraste, el agua residual sin tratamiento alcanza un IRCA del 100 %, con altos puntajes en turbidez, color y, especialmente, en indicadores microbiológicos como coliformes totales y *E. coli*, lo que confirma un alto nivel de contaminación y su inviabilidad para uso sanitario.

Si bien el tratamiento con plasma frío reduce todos los puntajes de riesgo a 0 y logra un IRCA del 0 %, este resultado debe interpretarse con cautela. La eliminación total de los indicadores evaluados no necesariamente implica la ausencia absoluta de riesgo en todos los aspectos de la calidad del agua, sino que, bajo las condiciones y parámetros medidos, el sistema cumple con los criterios normativos. Por tanto, aunque el tratamiento demuestra alta eficacia, es importante considerar posibles limitaciones del análisis y la necesidad de evaluaciones complementarias.

Tabla 11. Comparación de puntaje de riesgo asociado a cada característica de calidad de agua domiciliaria, agua residual sin tratamiento y agua tratada mediante desinfección con plasma frío.

Resultados de puntaje de riesgo asociado a cada característica de la calidad de agua						
Parámetro	IRCA de agua domiciliaria	IRCA de agua anterior al tratamiento	IRCA de agua después del tratamiento	Valor máximo aceptable del parámetro	Puntaje de riesgo	Unidad de medida
PH (Medición en Laboratorio)	1.5	1.5	0	6.5 – 9.0	1.5	pH
Color Aparente	0	6	0	15	6	UPC
Turbiedad	0	15	0	2	15	NTU
Conductividad a 25°C	–	–	–	–	–	us/cm
Acidez	–	–	–	–	–	mg CaCO ₃ /L
Alcalinidad total	0	1	0	200	1	mg CaCO ₃ /L
Dureza total	0	1	0	300	1	mg CaCO ₃ /L
Dureza Calcio	–	–	–	–	–	mg CaCO ₃ /L
Dureza Magnesio	–	–	–	–	–	mg CaCO ₃ /L
Cloruros	0	1	0	250	1	mg Cl/L
Hierro total	0	1.5	0	0.3	1.5	mg Fe ⁺³ /L
Fosfatos	0	1	0	0.5	1	mg P-PO ₄ /L
Nitritos	0	3	0	0.1	3	mg N-NO ₂ /L
Nitratos	0	1	0	10	1	mg N-NO ₃ /L
Amonio	–	–	–	–	–	mg N-NH ₄ /L
Sulfatos	0	1	0	250	1	mg SO ₄ /L
Cloro residual	0	1.5	0	0.3–2.0	1.5	mg Cl ₂ /L
Magnesio	0	1	0	36	1	mg Mg/L
Calcio	0	1	0	60	1	mg Ca/L
Aluminio	0	3	0	0.2	3	mg Al/L
Zinc	0	1	0	3	1	mg Zn/L
Manganeso	0	1	0	0.1	1	mg Mn/L
Coliformes totales	0	15	0	Negativo	15	UFC / 100 cm ³
Echerichia coli	0	25	0	Negativo	25	UFC / 100 cm ³
Mesofilos	–	–	–	100	–	UFC / 100 cm ³
IRCA	2	100	0			%

5.2 Validez y Confiabilidad de los datos experimentales

Con el fin de garantizar la validez y confiabilidad de los resultados obtenidos, el proceso experimental se desarrolló en dos etapas complementarias. En una primera etapa, se realizaron pruebas preliminares utilizando los sensores de pH y turbidez integrados al sistema, junto con el uso de tirillas indicadoras como referencia cualitativa. Estas pruebas permitieron ajustar los parámetros de operación del sistema y verificar la coherencia de las mediciones en condiciones reales.

En una segunda etapa, y una vez definidos los parámetros óptimos de funcionamiento, se procedió al envío de muestras a un laboratorio acreditado, con el fin de validar los resultados obtenidos y evaluar la calidad del agua bajo criterios normativos. Este enfoque permitió asegurar que los datos experimentales no solo fueran consistentes a nivel interno, sino también confiables desde el punto de vista técnico y sanitario

5.3 Determinación Operativa de la Eficacia de Desinfección

La evaluación de la eficacia del sistema de tratamiento se realizó con base en la definición de la variable planteada en el Capítulo 2, donde la eficacia de desinfección se entiende como la capacidad del sistema para inactivar o eliminar la carga microbiológica presente en el agua, especialmente microorganismos indicadores como *Escherichia coli*, cuya presencia está asociada a riesgos sanitarios.

En este contexto, la eficacia del proceso se relaciona directamente con la reducción del riesgo sanitario del agua, así como con las condiciones fisicoquímicas que favorecen la acción del plasma frío, tales como pH y turbidez, las cuales influyen en la generación de especies reactivas (RONS) responsables de la inactivación microbiana.

Desde el punto de vista operativo, la eficacia de desinfección (Ed) se determinó mediante la ecuación (7), a partir de la variación del Índice de Riesgo de la Calidad del Agua (IRCA) antes y después del tratamiento

$$Ed (\%) = \frac{IRCAa - IRCAd}{IRCAa} * 100 \% \quad (7)$$

donde IRCAa corresponde al índice del agua residual sin tratamiento y IRCA_d al índice del agua posterior al proceso de filtración y desinfección mediante plasma frío.

A partir de los resultados experimentales, el agua residual presentó un IRCA del 100 %, clasificándose como inviable sanitariamente, mientras que el agua tratada alcanzó un IRCA del 0 %, correspondiente a agua sin riesgo sanitario. Sustituyendo estos valores en la ecuación, se obtiene:

$$\text{Ed (\%)} = \frac{100 - 0}{100} * 100$$

$$\text{Ed (\%)} = 100\%$$

Este resultado indica que el sistema logra una eliminación total del riesgo sanitario, lo que representa una eficacia máxima del proceso de desinfección. Este comportamiento se encuentra respaldado por los resultados microbiológicos, donde los coliformes totales y *Escherichia coli* se redujeron a valores <1 UFC/100 cm³, cumpliendo con el criterio de ausencia establecido en la normativa vigente.

Adicionalmente, la mejora en parámetros fisicoquímicos como la turbidez y el pH favoreció las condiciones del proceso, contribuyendo indirectamente a la eficacia del tratamiento, al optimizar la acción de las especies reactivas generadas por el plasma frío.

5.4 Validación de Hipótesis y Respuesta al Problema

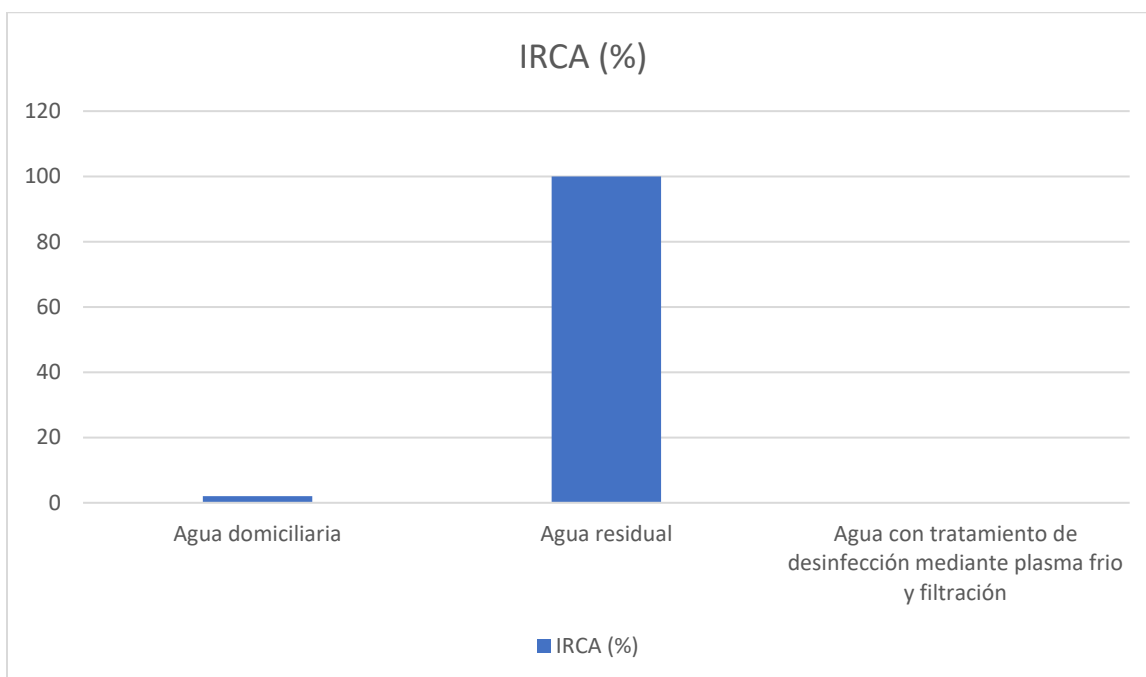
En relación con la formulación de hipótesis, los resultados obtenidos permiten aceptar la hipótesis de investigación (H_i), la cual establece que el sistema alcanza una eficacia de desinfección superior al 50 %. Dado que se obtuvo un valor de Ed del 100 %, se evidencia que el sistema no solo cumple, sino que supera ampliamente el umbral propuesto. En consecuencia, se rechaza la hipótesis nula (H₀) y la hipótesis alternativa (H_a), confirmando la alta eficacia del sistema en la desinfección del agua residual.

Estos resultados demuestran que el sistema de tratamiento mediante plasma frío es altamente eficaz en la eliminación de la contaminación microbiológica y en la reducción del riesgo sanitario, validando su aplicación en sistemas de recirculación de agua para lavado de manos.

5.5 Análisis Comparativo IRCA

Se presenta la gráfica correspondiente a los resultados del Índice de Riesgo de la Calidad del Agua (IRCA) para cada una de las muestras evaluadas: agua domiciliaria, agua residual antes del tratamiento y agua posterior al proceso de filtración y desinfección.

Figura 28. Resultados de IRCA para agua domiciliaria, agua residual antes del tratamiento y agua posterior al proceso de filtración y desinfección mediante plasma frío.



Como se observa en la Figura 28, este análisis permite comparar de manera directa el estado sanitario del agua en las diferentes etapas del sistema.

El agua domiciliaria de referencia presenta un IRCA del 2 %, clasificándose como sin riesgo sanitario y estableciendo el punto de partida del sistema. Posteriormente, tras su uso en el proceso de lavado de manos, el agua residual alcanza un IRCA del 100 %, lo que evidencia un deterioro crítico de su calidad y su clasificación como inviable sanitariamente, debido principalmente al incremento de la carga microbiológica y de parámetros como turbiedad y color.

Luego del tratamiento mediante filtración y desinfección con plasma frío, el agua alcanza un IRCA del 0 %, lo que indica una condición sin riesgo sanitario. Esta reducción del 100 % en el índice representa la eliminación del riesgo asociado al agua residual, lo cual se traduce en una eficacia de desinfección del 100 %, de acuerdo con la definición operativa de la variable.

No obstante, desde un enfoque crítico, es importante señalar que, aunque el IRCA final es incluso inferior al del agua domiciliaria de referencia, esto no implica necesariamente que el agua tratada sea “mejor” en todos los aspectos. Más bien, indica que, bajo las condiciones evaluadas, cumple con los criterios normativos de potabilidad.

Por ejemplo, durante el proceso de tratamiento con plasma se evidenció la reducción del cloro residual (de 1,11 a 0,03 mg/L). En el cálculo del IRCA, concentraciones de cloro fuera del rango establecido —ya sean altas o bajas— incrementan el nivel de riesgo. En este caso, el agua tratada alcanzó un 0 % de IRCA, en parte porque, al ser evaluada inmediatamente después del tratamiento, el cloro residual disminuyó debido a reacciones químicas inducidas por el plasma o a procesos de evaporación, eliminando ese factor de riesgo en el cálculo puntual.

Asimismo, el resultado obtenido corresponde a un número limitado de muestras, por lo que la generalización de esta eficacia debe realizarse con cautela.

En este sentido, el análisis basado en IRCA no solo permite cuantificar la eficacia del sistema, sino también evidenciar la transformación completa del estado sanitario del agua, pasando de una condición no apta a una apta para consumo humano, lo que valida el desempeño del sistema dentro del contexto experimental desarrollado.

Conclusiones

Los sistemas de recirculación de agua en procesos sanitarios requieren un control riguroso de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, especialmente cuando el recurso es reutilizado en múltiples ciclos. En este contexto, la integración de tecnologías como el monitoreo mediante sensores y la desinfección por plasma frío representa una alternativa viable para mantener condiciones sanitarias adecuadas dentro de esquemas de reutilización hídrica.

Los resultados experimentales permitieron validar el funcionamiento del sistema automatizado de lavado de manos en condiciones controladas. Se evidenció una reducción significativa de la carga microbiológica, con eliminación de coliformes totales y *Escherichia coli* hasta valores inferiores a 1 UFC/100 cm³, y una disminución del Índice de Riesgo de la Calidad del Agua (IRCA) desde 100 % (inviabile sanitariamente) hasta 0 % (sin riesgo), de acuerdo con la Resolución 2115 de 2007. Estos resultados confirman la alta eficacia del plasma frío como método de desinfección no químico en sistemas de recirculación.

A partir de la definición operativa de la variable, la eficacia de desinfección (Ed) fue del 100 %, valor obtenido mediante la reducción total del IRCA. Este resultado indica que, bajo las condiciones experimentales evaluadas, el sistema logró eliminar completamente el riesgo sanitario del agua tratada. No obstante, es importante precisar que este valor corresponde a un escenario específico de prueba, por lo que se requiere la realización de ensayos adicionales que permitan validar la reproducibilidad del sistema en diferentes condiciones y con un mayor número de muestras.

Desde el punto de vista fisicoquímico, parámetros como turbidez, color y pH presentaron mejoras significativas, ubicándose dentro de los límites permisibles, lo cual favorece el proceso de desinfección y contribuye a la estabilidad del sistema. Esto evidencia que la eficacia del tratamiento no solo se limita a la remoción microbiológica, sino que también está asociada a condiciones que optimizan el desempeño del plasma frío.

Finalmente, la integración de automatización, monitoreo electrónico y desinfección mediante plasma frío constituye una solución tecnológica funcional, capaz de mejorar la calidad del agua residual hasta niveles comparables con agua potable en términos sanitarios. Sin embargo, debido a que el estudio se desarrolló con un número limitado de muestras debido a el único ciclo de utilización, los resultados deben interpretarse como una validación inicial del sistema.

Recomendaciones

Se recomienda, como aspecto fundamental, ampliar el número de pruebas experimentales con el fin de aumentar la validez estadística de los resultados obtenidos. Es necesario realizar ensayos bajo diferentes condiciones de operación, incluyendo variaciones en la calidad del agua de entrada, múltiples ciclos de recirculación y réplicas experimentales, que permitan garantizar la reproducibilidad y confiabilidad del desempeño del sistema de tratamiento.

Adicionalmente, se sugiere evaluar el comportamiento del sistema en condiciones de operación continua y a largo plazo, lo cual permitiría identificar posibles acumulaciones de compuestos disueltos, variaciones en los parámetros fisicoquímicos y cambios en la eficacia del proceso de desinfección mediante plasma frío.

Asimismo, se propone la integración de sensores adicionales que permitan el monitoreo en tiempo real de variables como conductividad y potencial de oxidación-reducción (ORP), con el fin de fortalecer el control del sistema y mejorar la detección de posibles desviaciones en la calidad del agua.

Desde el punto de vista sanitario, sería pertinente considerar la incorporación de un mecanismo de desinfección secundaria o un sistema de almacenamiento controlado que proporcione protección residual, especialmente en escenarios de uso prolongado o altas tasas de recirculación.

Finalmente, se recomienda desarrollar un análisis económico detallado que contemple los costos de implementación, operación, mantenimiento y consumo energético, con el propósito de evaluar la viabilidad de escalamiento del sistema y su posible aplicación en contextos como instituciones educativas, centros de salud, espacios públicos y comunidades rurales con acceso limitado al recurso hídrico.

Trabajos futuros

Dentro de los trabajos futuros de plantean:

Ampliar la evaluación del sistema analizando su desempeño frente a indicadores microbiológicos de mayor complejidad, incluyendo virus, esporas bacterianas y formación de biofilms. Esto permitiría fortalecer la validación científica del tratamiento con plasma frío y delimitar su alcance sanitario.

Asimismo, se recomienda desarrollar un análisis energético integral que determine la eficacia eléctrica del generador de plasma y su contribución a la sostenibilidad global del sistema. Paralelamente, la integración de tecnologías de Internet de las Cosas (IoT) y plataformas de monitoreo remoto permitiría supervisar en tiempo real los parámetros de calidad del agua y el comportamiento operacional, mejorando la trazabilidad y la capacidad de respuesta del sistema.

Finalmente, se plantea explorar la adaptación del prototipo a mayor escala o a otros usos sanitarios, como duchas o estaciones de higiene comunitaria, con el fin de ampliar su impacto social y contribuir a la gestión eficiente del recurso hídrico en contextos con creciente escasez.

Referencias

- [1] “boletín epidemiológico.” Accessed: oct. 17, 2024. [online]. Available: <https://www.ins.gov.co/buscador-eventos/paginas/vista-boletin-epidemilogico.aspx>
- [2] “boletines técnicos ideam | instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales.” Accessed: oct. 17, 2024. [online]. Available: <https://www.ideam.gov.co/sala-de-prensa/boletines>
- [3] m. Laroussi, “cold plasma in medicine and healthcare: the new frontier in low temperature plasma applications,” *front. Phys.*, vol. 8, mar. 2020, doi: 10.3389/fphy.2020.00074/full.
- [4] p. De i. Electrónica, “proyecto educativo del programa. Pasto: universidad cesmag,” *línea y sublínea investig. U. Cesmag*, p. 67, 2015.
- [5] “colombia - estadísticas vitales - eevv 2017 - 2018.” Accessed: oct. 17, 2024. [online]. Available: <https://microdatos.dane.gov.co/index.php/catalog/652#metadata-identification>
- [6] d. E. Cambio, *política nacional de cambio climático*. 2018.
- [7] minambiente, *política nacional de gestión integral del recurso hídrico*. 2010.
- [8] e. L. Agua, *medidas prácticas*.
- [9] “agua, higiene y saneamiento | unicef.” Accessed: oct. 17, 2024. [online]. Available: <https://www.unicef.org/colombia/agua-higiene-y-saneamiento>
- [10] “encuesta nacional de la situación nutricional-ensin 2015,” p. 6, 2015.
- [11] oms, “directrices de la oms sobre higiene de las manos en la atención sanitaria [internet].,” *organ. Mund. La salud*, 2005, [online]. Available: http://www.who.int/patientsafety/information_centre/spanish_hh_guidelines.pdf?ua=1
- [12] takashi asano and professor, *water reuse issues, technologies and aapplications (metcalf&eddy/aecom)*. 2007.
- [13] m. Tanino, w. Xilu, k. Takashima, s. Katsura, and a. Mizuno, “sterilization using dielectric barrier discharge at atmospheric pressure,” *conf. Rec. - ias annu. Meet. (ieee ind. Appl. Soc., vol. 2, no. 1, pp. 784–788, 2005, doi: 10.1109/ias.2005.1518421*.
- [14] a. G. Fane, r. Wang, and m. X. Hu, “synthetic membranes for water purification: status and future,” *angew. Chemie - int. Ed.*, vol. 54, no. 11, pp. 3368–3386, 2015, doi: 10.1002/anie.201409783.
- [15] e. Eriksson, k. Auffarth, m. Henze, and a. Ledin, “characteristics of grey wastewater,” *urban water*, vol. 4, no. 1, pp. 85–104, 2002, doi: 10.1016/s1462-0758(01)00064-4.

- [16] g. R. Stratton, f. Dai, c. L. Bellona, t. M. Holsen, e. R. V. Dickenson, and s. Mededovic thagard, “plasma-based water treatment: efficient transformation of perfluoroalkyl substances in prepared solutions and contaminated groundwater,” *environ. Sci. Technol.*, vol. 51, no. 3, pp. 1643–1648, 2017, doi: 10.1021/acs.est.6b04215.
- [17] p. Lukes, e. Dolezalova, i. Sisrova, and m. Clupek, “aqueous-phase chemistry and bactericidal effects from an air discharge plasma in contact with water: evidence for the formation of peroxyxynitrite through a pseudo-second-order post-discharge reaction of h₂o₂ and hno₂,” *plasma sources sci. Technol.*, vol. 23, no. 1, 2014, doi: 10.1088/0963-0252/23/1/015019.
- [18] c. Z. Myint, l. Gopal, and y. L. Aung, “wsn-based reconfigurable water quality monitoring system in iot environment,” *ecti-con 2017 - 2017 14th int. Conf. Electr. Eng. Comput. Telecommun. Inf. Technol.*, pp. 741–744, 2017, doi: 10.1109/ecticon.2017.8096345.
- [19] l. Barillas, “design of a prototype of water purification by plasma technology as the foundation for an industrial wastewater plant l barillas,” *j. Phys. Conf. Ser.*, vol. 591, no. 1, 2015, doi: 10.1088/1742-6596/591/1/012057.
- [20] j. Herbert, c. Horsham, h. Ford, a. Wall, and e. Hacker, “deployment of a smart handwashing station in a school setting during the covid-19 pandemic: field study,” *jmir public heal. Surveill.*, vol. 6, no. 4, pp. 1–10, 2020, doi: 10.2196/22305.
- [21] c. Tseng, x. He, w. Chen, and c. L. Tseng, “evaluating automatic hand hygiene monitoring systems: a scoping review,” *public heal. Pract.*, vol. 4, no. 2006, p. 100290, 2022, doi: 10.1016/j.puhip.2022.100290.
- [22] j. Lee, j. Y. Lee, s. M. Cho, k. C. Yoon, y. J. Kim, and k. G. Kim, “design of automatic hand sanitizer system compatible with various containers,” *healthc. Inform. Res.*, vol. 26, no. 3, pp. 243–247, 2020, doi: 10.4258/hir.2020.26.3.243.
- [23] k. Bello, m. Kanakana-katumba, r. Mahadhzi, t. O. Ayeye, o. Adeniran, and b. A. Bolaji, “evaluation of a sustainable automated hand washing system equipped with a water recycling device,” *2023 int. Conf. Sci. Eng. Bus. Sustain. Dev. Goals, seb-sdg 2023*, vol. 8, no. 2, pp. 217–222, 2023, doi: 10.1109/seb-sdg57117.2023.10124609.
- [24] r. P. Actual, “parámetros fisicoquímicos de dureza total en calcio y magnesio , ph , conductividad y temperatura del agua pota - ble analizados en conjunto con las asociaciones administra - doras del acueducto , (asadas), de cada distrito de grecia , cantón de alajuel,”

- vol. 9, no. 12, pp. 125–134, 2009.
- [25] m. Rocío *et al.*, “evaluación de la turbiedad como parámetro indicador del tratamiento en una planta potabilizadora municipal evaluation of turbidity as a parameter indicator of treatment in a drinking water treatment plant,” 2020, doi: 10.18273/revuin.v19n1-2020001.
- [26] m. D. E. Ambiente and v. Y. D. Territorial, “los ministros de la protección social y de ambiente , vivienda resuelve : capítulo i,” 2007.
- [27] l. Puente-díaz, “principios, aplicaciones y efectos de la aplicación de plasma frío en alimentos: una revisión actualizada,” *rev. Chil. Nutr.*, vol. 51, no. 2, pp. 155–164, 2024, doi: 10.4067/s0717-75182024000200155.
- [28] m. G. Kong, b. N. Ganguly, and r. F. Hicks, “plasma jets and plasma bullets,” *plasma sources sci. Technol.*, vol. 21, no. 3, pp. 24–26, 2012, doi: 10.1088/0963-0252/21/3/030201.
- [29] e. Fernández puente, “implementación metodológica fundamentada en la combinación de biosensores de especies reactivas del oxígeno y nitrógeno (rons) y análisis cuantitativo de imagen de microscopía de fluorescencia para el estudio del papel señalizador y modulador de las rons en la captación de glucosa en el músculo esquelético,” 2023, accessed: oct. 20, 2024. [online]. Available: <http://hdl.handle.net/10366/154302>
- [30] j. Gutiérrez-salinas, p. Mondragón-terán, l. García-ortíz, s. Hernández-rodríguez, s. Ramírez-garcía, and n. Núñez-ramos, “breve descripción de los mecanismos moleculares de daño celular provocado por los radicales libres derivados de oxígeno y nitrógeno mechanisms of cellular damage caused,” *rev esp med quir*, vol. 19, pp. 446–454, 2014.
- [31] united states environmental protection agency, “reutilización y reciclaje del agua | epa de ee. Uu.” Accessed: oct. 20, 2024. [online]. Available: <https://www.epa.gov/waterreuse?form=mg0av3>
- [32] s. Sabater, h. Guasch, r. Moreno, a. Romaní, and i. Muñoz, *calidad y cantidad de agua: el estado ecológico de los sistemas acuáticos continentales*. 2008. [online]. Available: http://s9c21adfc2988c5cf.jimcontent.com/download/version/1445896795/module/7866296786/name/aguas continentales csic.book_109_com.pdf
- [33] f. M. Sal, “sistemas de recirculación y tratamiento de agua,” 2007.
- [34] y. P. C. Regino and univ, “sistema de monitoreo de la calidad del agua basado en iot, utilizando técnicas de analítica de datos para la detección de anomalías, en los acueductos ejecutados por el plan departamental de aguas (pda) de córdoba yulieth,” *pharmacogn.*

Mag., vol. 75, no. 17, pp. 399–405, 2021.

- [35] d. A. . W. D. M. . H. F. J. . & c. S. R. Skoog, “fundamentos de química analítica 9na edición : isbn: 978-0-495-55828-6 : free download, borrow, and streaming : internet archive.” Accessed: mar. 24, 2026. [online]. Available: <https://archive.org/details/fundamentosdequimicaanaliticasakoog9ed/page/n571/mode/1up>

Anexos

Anexo 1. Código de Control y Automatización del sistema de desinfección de agua mediante plasma frio.

```

//-----Definir Umbrales Ultrasónicos-----
#define NIVEL_MIN    11
#define NIVEL_MAX    23
#define NIVEL_SENSADO 4
#define NIVEL_PLASMA_MIN 10
//-----Definir Constantes de tiempo-----
#define TIEMPO_MOTOR    7200000UL    // 2 horas
#define TIEMPO_LECTURA 240000UL    // 4 minutos
//-----Variables globales-----
int ESTADO_LIMPIA = 0;
unsigned long tiempoPulsoPlasma = 0;
unsigned long tiempoEstado = 0;
bool pulsoPlasmaActivo = false;
const int muestras = 10;
float ph = 0.0;
Estado estado = ESPERA_SUCIA;
//-----Personalización de control de proceso-----
enum Estado {
    ESPERA_SUCIA,
    LLENANDO_SUCIA,
    MOTOR_2H,
    JABON,
    ESPERA_PULSO_PLASMA,
    LLENANDO_PLASMA,
    ESPERA_SENSADO,
    LECTURA_CALIDAD,
    LLENADO_FINAL,
    RETORNO
};
//-----Medición nivel de agua-----

```

```

long medirCM(int trig, int echo) {
    digitalWrite(trig, LOW);
    delayMicroseconds(2);
    digitalWrite(trig, HIGH);
    delayMicroseconds(10);
    digitalWrite(trig, LOW);
    long dur = pulseIn(echo, HIGH, 30000);
    return dur * 0.034 / 2;
}
//-----setup-----
void setup() {
    Serial.begin(115200);
    //Configuracion de pines
    pinMode(BOMBA_SUCIA, OUTPUT);
    pinMode(BOMBA_LIMPIA, OUTPUT);
    pinMode(BOMBA_JABON, OUTPUT);
    pinMode(BOMBA_PLASMA, OUTPUT);
    pinMode(BOMBA_SENSADO, OUTPUT);
    pinMode(BOMBA_RETORNO, OUTPUT);
    pinMode(MOTOR_JABON, OUTPUT);
    pinMode(PULSO_INPUT, INPUT);
    pinMode(PULSO_OUT, OUTPUT);
    pinMode(PULSO_PEDAL, INPUT);
    int trigs[] = {13,14,27,26};
    int echos[] = {32,33,34,16};
    for(int i=0;i<4;i++){
        pinMode(trigs[i], OUTPUT);
        pinMode(echos[i], INPUT);
    }
}
//-----loop-----
-----
void loop() {
    // Lectura de sensores nivel de agua
    long nivelSucia = medirCM(13,32);

```

```

long nivelPlasma = medircM(14,33);
long nivelSensado = medircM(27,34);
long nivelLimpia = medircM(26,16);
//-----Casos-----
-----

switch(estado){
  case ESPERA_SUCIA:
    if(nivelSucia <= NIVEL_MIN){
      digitalWrite(BOMBA_SUCIA, HIGH);
      ESTADO_LIMPIA= 1;
      estado = LLENANDO_SUCIA;
    }break;
  case LLENANDO_SUCIA:
    if(nivelSucia >= NIVEL_MAX){
      digitalWrite(BOMBA_SUCIA, LOW);
      ESTADO_LIMPIA = 0;
      digitalWrite(MOTOR_JABON, HIGH);
      tiempoEstado = millis();
      estado = MOTOR_2H;
    } break;
  case MOTOR_2H:
    if(millis() - tiempoEstado >= TIEMPO_MOTOR){
      digitalWrite(MOTOR_JABON, LOW);
      digitalWrite(BOMBA_JABON, HIGH);
      estado = JABON;
    } break;
  case JABON:
    if(nivelPlasma <= NIVEL_PLASMA_MIN && !pulsoPlasmaActivo){
      digitalWrite(BOMBA_JABON, LOW);
      digitalWrite(PULSO_OUT, HIGH);
      tiempoPulsoPlasma = millis();
      pulsoPlasmaActivo = true;
    }break;
  case ESPERA_PULSO_PLASMA:
    if(digitalRead(PULSO_INPUT) == HIGH){

```

```

        digitalWrite(BOMBA_PLASMA, HIGH);
        estado = LLENANDO_PLASMA;
    } break;
case LLENANDO_PLASMA:
    if(nivelPlasma >= NIVEL_MAX){
        digitalWrite(BOMBA_PLASMA, LOW);
        estado = ESPERA_SENSADO;
    } break;
case ESPERA_SENSADO:
    if(nivelSensado <= NIVEL_SENSADO){
        tiempoEstado = millis();
        estado = LECTURA_CALIDAD;
    }break;
case LECTURA_CALIDAD:
    if(millis() - tiempoEstado >= TIEMPO_LECTURA){
        float suma = 0.0;
        // Leer 10 muestras
        for (int i = 0; i < muestras; i++) {
            int valorADC = analogRead(pinSensor);
            float v = (valorADC * 3.3) / 4095.0; // ADC a voltaje
            suma += v;
            delay(50);
        }
        // Calcular promedio
        voltaje = suma / muestras;
        //Ecuación calibrada
        ph = -7.86 * voltaje + 17.65;
        Serial.println(ph, 2);

        int adcValue = analogRead(TURBIDITY_PIN);
        float ntu = (-5* adcValue) + 50000;
        if (ntu < 0) ntu = 0;
        Serial.print(ntu, 2);
        delay(200);
    }break;
case LLENADO_FINAL:

```

```

    if(nivelSensado >= NIVEL_MAX){
        digitalWrite(BOMBA_SENSADO, LOW);
        estado = ESPERA_SUCIA;
    }break;
case RETORNO:
    if(nivelSensado >= NIVEL_MAX){
        digitalWrite(BOMBA_RETORNO, LOW);
        estado = JABON;
    }break;
}
// ----- Control pedal-----
if(digitalRead(PULSO_PEDAL) == HIGH && ESTADO_LIMPIA == 0 &&
nivelLimpia < NIVEL_MAX){
    digitalWrite(BOMBA_LIMPIA, HIGH);    // pedal presionado
} else {
    digitalWrite(BOMBA_LIMPIA, LOW);    // pedal NO presionado
}
}
//-----Pulso plasma-----
if(pulsoPlasmaActivo && millis() - tiempoPulsoPlasma >= 100){
    digitalWrite(PULSO_OUT, LOW);
    pulsoPlasmaActivo = false;
    estado = ESPERA_PULSO_PLASMA;
}

```

Anexo 2. Código de calibración de sensor de pH.

```
void loop() {
    float suma = 0.0;
    for (int i = 0; i < muestras; i++) {
        int valorADC = analogRead(pinSensor);
        float v = (valorADC * 3.3) / 4095.0; // ADC a voltaje
        suma += v;
        delay(50);
    }
    voltaje = suma / muestras;
    // Ecuación calibrada
    pH = -7.92 * voltaje + 17.71;
    // Mostrar resultados
    Serial.print("Voltaje promedio: ");
    Serial.print(voltaje, 3);
    Serial.print(" V --> pH estimado: ");
    Serial.println(pH, 2);
    delay(1000);
}
```

Anexo 3. Código de calibración de sensor de turbidez.

```
int adcValue = analogRead(TURBIDITY_PIN);

float ntu = (0.004388*(ADC)^2 + -13.297949*(ADC) +
9569.755523);

if (ntu < 0) ntu = 0;

Serial.print("ADC: ");
Serial.println(adcValue);

Serial.print("Turbidez: ");
Serial.print(ntu, 2);
Serial.println(" NTU");

delay(2000);
```

Anexo 4. Código en Matlab para la obtención la ecuación de calibración del sensor de turbidez mediante regresión polinómica.

```

clc;
clear;
close all;
% =====
% 1. Datos experimentales
% =====
ADC = [2000 1800 1500 1000 500 0.075];
NTU = [0 55 210 700 3150 10000];
% =====
% 2. Ajuste polinómico grado 2
% =====
coef = polyfit(ADC, NTU, 2);
a = coef(1);
b = coef(2);
c = coef(3);
fprintf('Ecuacion de calibracion:\n');
fprintf('NTU = %.6f*(ADC)^2 + %.6f*(ADC) + %.6f\n\n', a, b, c);
% =====
% 3. Generar curva ajustada
% =====
x = linspace(0,2000,100);
y = polyval(coef, x);
% =====
% 4. Graficar
% =====
figure
plot(ADC, NTU, 'o') % puntos experimentales
hold on
plot(x, y) % curva ajustada
grid on
xlabel('ADC')
ylabel('NTU')
title('Calibracion del sensor de turbidez')
legend('Datos experimentales','Ajuste polinomico')
% =====
% 5. Calculo de R^2
% =====
y_ajustado = polyval(coef, ADC);
SS_res = sum((NTU - y_ajustado).^2);
SS_tot = sum((NTU - mean(NTU)).^2);
R2 = 1 - (SS_res / SS_tot);
fprintf('Coeficiente de determinacion R^2 = %.4f\n', R2);


```

Anexo 5. Código de Sensor Ultrasónico HC-SR04.

```
void loop() {
  digitalWrite(TRIGPIN, LOW);
  delayMicroseconds(2);
  digitalWrite(TRIGPIN, HIGH);
  delayMicroseconds(10);
  digitalWrite(TRIGPIN, LOW);
  duration = pulseIn(ECHOPIN, HIGH);
  distance = (duration * 0.0343) / 2;
  float volumen_cm3 = largo * ancho * distance;
  // Conversión a litros
  float volumen_litros = volumen_cm3 / 1000.0;

  Serial.print("Distancia: ");
  Serial.print(distance);
  Serial.println(" cm");
  Serial.print("Distancia: ");
  Serial.print("Volumen del agua (Litros): ");
  Serial.println(volumen_litros);
  delay(1000); // lectura cada 1 segundo
}
```

Anexo 6. Resultados de laboratorio del agua antes de tratamiento del sistema automatizado de lavado de manos con recirculación y desinfección con plasma frío.

 SECCION DE LABORATORIOS LABORATORIO DE ANÁLISIS QUÍMICO Y AGUAS INFORME DE RESULTADOS MUESTRAS AMBIENTALES		Código: LBE- Página: 1 de 1 Versión: 05 vigencia a partir del 2022-03-10				
<p>"Laboratorio Acreditado por el IDEAM para los parámetros: Alcalinidad, Conductividad a 25°C, Nitritos, Sulfatos, Grasas y aceites, Sólidos Totales, Sólidos Suspendidos Totales, Demanda Bioquímica de Oxígeno, Demanda Química de Oxígeno, Toma de muestra simple o puntual: pH (SM 4500-H+B), : Fósforo total, Fosfatos, Turbiedad, Cloruro, Dureza Total, Dureza Calcio, Toma de muestra simple o puntual: Protocolo para el monitoreo y seguimiento del agua. IDEAM 2021. Variables medidas en campo: Sólidos sedimentables (SM 2540 F), Oxígeno disuelto (SM 4500 OH). Temperatura (SM 2550 B), Conductividad eléctrica (SM 2510 B), Caudal (Volumétrico).</p>						
FECHA EMISIÓN RESULTADOS: 2025-12-15 INFORME No: LAQ-R-223-25						
DATOS USUARIO DATOS MUESTRAS						
Solicitante: Yineth Botina		Tipo de Muestra: Agua cruda				
Dirección: Calle 20 No 7A Este 3B Vereda Puerres, Pasto		Tipo de Muestreo: Simple				
Teléfono: 3242682978		Sitio de Toma: Vereda Puerres, Municipio de Pasto, Nariño.				
Cédula ciudadanía: 1.010.147.440		Responsable del Muestra: Externo: Laura Melissa Pineda				
e-mail: yinethbotina@gmail.com		Fecha de Muestreo: 2025-11-24				
Cotización No: LAQ-C-472-25		Fecha Recepción Muestra en Laboratorio: 2025-11-24				
TIPO DE ANALISIS SOLICITADOS: FISICOQUIMICO Y MICROBIOLÓGICO PARCIAL						
Código Muestra LAQ-439-25		Descripción PRIMER PUNTO DE SISTEMA LAVAMANOS PORTATIL - CASA DE HABITACIÓN CALLE 20 No. 7A ESTE 3B - VEREDA PUERRES				
PARAMETRO	METODO	TECNICA	CODIGO MUESTRA LAQ-439-25	UNIDAD DE MEDIDA	FECHA DE ANALISIS	HORA DE ANALISIS
pH (Medición en Laboratorio)	SH EDICION No. 24 4500 -B	ELECTROMETRICA	6,30	pH	2025-11-24	11:00:00
COLOR APARENTE	SH EDICION No. 24 2120 -C	FOTOMETRICA	165,9	APC	2025-11-24	5:00:00
TURBIEDAD	SH EDICION No. 24 2130 -B	NEFELOMETRICA	54,4	NTU	2025-11-24	7:20:00
CONDUCTIVIDAD A 25 °C	SH EDICION No. 24 2510 -B	ELECTROMETRICA	136,8	µS/cm	2025-11-24	5:00:00
ACIDEZ	SH EDICION No. 24 2310 -B	VOLUMETRICO	17,82	mg CaCO ₃ /L	2025-11-24	5:10:00
ALCALINIDAD TOTAL	SH EDICION No. 24 2320 -B	VOLUMETRICO	27,36	mg CaCO ₃ /L	2025-11-24	4:50:00
DUREZA TOTAL	SH EDICION No. 24 2340 -C	VOLUMETRICO	41,6	mg CaCO ₃ /L	2025-12-05	7:33:00
DUREZA CALCIO	SH EDICION No. 24 2360 -C-D	VOLUMETRICO	21,29	mg CaCO ₃ /L	2025-12-05	5:10:00
DUREZA MAGNESIO	SH EDICION No. 24 2360 -Hq-E	VOLUMETRICO	20,3	mg CaCO ₃ /L	2025-12-05	5:10:00
CLORUROS	SH EDICION No. 24 4500 Cl- B	VOLUMETRICO	7,40	mg Cl ₂ /L	2025-11-28	11:10:00
HIERRO TOTAL	SH EDICION No. 24 3500 Fe- B	FOTOMETRICA	0,17	mg Fe+3/L	2025-11-28	11:00:00
FOSFATOS	SH EDICION No. 24 4500 P- D	FOTOMETRICA	< 0,05	mg P-PO4/L	2025-11-24	5:00:00
NITRITOS	SH EDICION No. 24 4500 NO ₂ - B	FOTOMETRICA	0,075	mg N-NO ₂ /L	2025-11-24	4:00:00
NITRATOS	SH EDICION No. 24 4500 NO ₃ - B	FOTOMETRICA	0,172	mg N-NO ₃ /L	2025-11-24	5:00:00
AMONIO	SH EDICION No. 24 4500 NH ₄ - C	FOTOMETRICA	0,2	mg N-NH ₄ /L	2025-11-28	8:00:00
SULFATOS	SH EDICION No. 24 4500 SO ₄ - E	TURBIDIMETRICA	8,7	mg SO ₄ /L	2025-12-05	5:04:00
MAGNESIO	SH EDICION No. 24 3500Mg-E	ESPECTROFOTO. A.A	4,93	mg Mg / L	2025-12-05	5:10:00
CALCIO	SH EDICION No. 24 3500Ca-B	ESPECTROFOTO. A.A	8,51	mg Ca / L	2025-12-05	5:10:00
ALUMINIO	SH EDICION No. 24 3500Al-B	ESPECTROFOTO. A.A	0,307	mg Al / L	2025-11-28	9:00:00
ZINC	SH EDICION No. 24 3500Zn-B	ESPECTROFOTO. A.A	0,3	mg Zn / L	2025-11-28	4:00:00
MANGANESO	SH EDICION No. 24 3500Mn-B	ESPECTROFOTO. A.A	0,287	mg Mn / L	2025-11-29	10:00:00
COLIFORMES TOTALES	SH ED. 24 9221 C	DENSIDAD BACTERIANA	54000	NMP/100 cm ³	2025-11-24	12:00:00
FECHEROGIA COLI	SH ED. 24 9221 C	DENSIDAD BACTERIANA	315	NMP/100 cm ³	2025-11-24	12:00:00
OBSERVACIONES						
DESVIACIONES / EXCLUSIONES / ACLARACIONES AL INFORME (El Laboratorio solo es responsable del análisis de la muestra)		Los resultados aquí reportados corresponden a la muestra conforme se recibió en el laboratorio. El análisis de la muestra registrada se realizó de acuerdo a los Protocolos establecidos dentro del Laboratorio de Análisis Químico y Aguas de la Universidad de Nariño. Prohibida su reproducción parcial o total sin previa autorización del laboratorio.				
LOS RESULTADOS SON VALIDOS UNICAMENTE PARA LA MUESTRA ANALIZADA ESTE INFORME REEMPLAZA AL ORIGINAL						
Elaboró: 2025-11-28 S.C. Revisó: 2025-12-15 JR	original firmado NANCY GALINDEZ Bacterióloga Registro No 125 Universidad de Nariño		original firmado RUTH JOHANA RODRIGUEZ L. Química PQ -2828 CPQ Universidad de Nariño			
FIN INFORME DE RESULTADOS Nuestro Compromiso Universitario es: la Excelencia Ciudad Universitaria- Torobajo - Teléfonos 7244309 - 7311449 Extensión 2120						

Anexo 7. Resultados de laboratorio del agua después de tratamiento del sistema automatizado de lavado de manos con recirculación y desinfección con plasma frío.

FECHA EMISION RESULTADOS: 2025-12-15		INFORME No: LAQ-R-009-26	
<p align="center">SECCION DE LABORATORIOS LABORATORIO DE ANÁLISIS QUÍMICO Y AGUAS INFORME DE RESULTADOS MUESTRAS DE AGUA POTABLE</p>			
<p align="center">Código Muestra LAQ-014-26</p>		<p align="center">Descripción Tanque de Almacenamiento Agua Tratada mediante sistema Plasma Frío, Vereda Puermes, Municipio de Pasto, Nariño.</p>	
PARAMETRO	METODO	TECNICA	CODIGO MUESTRA LAQ-014-26
PH (Medición en Laboratorio)	SM 8033-01-01-24-0001-R	ELECTROMETRICA	7,68
COLOR APARENTE	SM 8033-01-01-24-0101-C	FOTOMETRICA	5,7
TURBIDEZ	SM 8033-01-01-24-0101-R	NEFELOMETRICA	0,80
ACIDEZ	SM 8033-01-01-24-0101-R	VOLUMETRICO	4,01
ALCALINIDAD TOTAL	SM 8033-01-01-24-0101-R	VOLUMETRICO	35,02
DUREZA TOTAL	SM 8033-01-01-24-0101-C	VOLUMETRICO	49,7
DUREZA CALCIO	SM 8033-01-01-24-0101-CAD	VOLUMETRICO	33,43
DUREZA MAGNESIO	SM 8033-01-01-24-0101-MAG	VOLUMETRICO	16,2
CLORUROS	SM 8033-01-01-24-0101-CL	VOLUMETRICO	15,94
NIERAZO TOTAL	SM 8033-01-01-24-0101-NI	FOTOMETRICA	<0,05
FOSFATOS	SM 8033-01-01-24-0101-F	FOTOMETRICA	0,09
NITRITOS	SM 8033-01-01-24-0101-NI	FOTOMETRICA	<0,01
NITRATOS	SM 8033-01-01-24-0101-NI	FOTOMETRICA	1,19
AMONIO	SM 8033-01-01-24-0101-AM	FOTOMETRICA	0,2
SULFATOS	SM 8033-01-01-24-0101-S	TURBIDIMETRICA	4,7
CLORIDO RESIDUAL	SM 8033-01-01-24-0101-CL	FOTOMETRICA	0,03
MAGNESIO	SM 8033-01-01-24-0101-M	ESPECTROFOT. A.A	3,94
CALCIO	SM 8033-01-01-24-0101-C	ESPECTROFOT. A.A	13,37
ALUMINIO	SM 8033-01-01-24-0101-A	ESPECTROFOT. A.A	0,014
ZINC	SM 8033-01-01-24-0101-Z	ESPECTROFOT. A.A	<0,018
MANGANESO	SM 8033-01-01-24-0101-M	ESPECTROFOT. A.A	<0,052
COLIFORMES TOTALES	SM 8033-01-01-24-0101-C	FILT. MEMBRANA	<1
ESCHERICHIA COLI	SM 8033-01-01-24-0101-E	FILT. MEMBRANA	<1
MESOFILOS	SM 8033-01-01-24-0101-M	FILT. MEMBRANA	120
OBSERVACIONES			
<p align="center">El IRCA por muestra: 5 puntos de riesgo asignado a las características no aceptables IRCA (%) = $\frac{\text{IRCA}}{5}$ 5 puntos de riesgo asignado a todas las características evaluadas.</p>			0
<p align="center">OPINIONES E INTERPRETACIONES</p>		<p align="center">IRCA por muestra</p>	<p align="center">IRCA mensual</p>
IRCA (%)	Nivel de Riesgo	(Notificaciones que adelantará la autoridad sanitaria de manera inmediata)	(Acciones)
80.1 - 100	INVARIABLEMENTE SANITARIAMENTE	Informar a la persona prestadora, al COVE, Alcalde, Gobernador, SSPD, MPS, INS, MAVDT, Contraloría General y Procuraduría General.	Agua no apta para consumo humano, gestión directa de acuerdo a su competencia de la persona prestadora, alcaldes, gobernadores y entidades del ciclo nacional.
35.1 - 80	ALTO	Informar a la persona prestadora, COVE, Alcalde, Gobernador y a la SSPD.	Agua no apta para consumo humano, gestión directa de acuerdo a su competencia de la persona prestadora y
14.1 - 35	MEDIO	Informar a la persona prestadora, COVE, Alcalde y Gobernador.	Agua no apta para consumo humano, gestión directa de la persona prestadora.
5.1 - 14	BAJO	Informar a la persona prestadora y al COVE.	Agua no apta para consumo humano, susceptible de mejoramiento.
0 - 5	SIN RIESGO	Continuar el control y la vigilancia.	Agua apta para consumo humano. Continuar la vigilancia.
<p>DESVIACIONES / EXCLUSIONES / ACLARACIONES AL INFORME (El Laboratorio solo es responsable del análisis de la muestra)</p>		<p>Los resultados aquí reportados corresponden a la muestra conforme se recibió en el laboratorio. El análisis de la muestra registrada se realizó de acuerdo a los Protocolos establecidos dentro del Laboratorio de Análisis Químico y Aguas de la Universidad de Nariño. Prohibida su reproducción parcial o total sin previa autorización del laboratorio.</p>	

LOS RESULTADO SON VALIDOS UNICAMENTE PARA LA MUESTRA ANALIZADA

ESTE INFORME REEMPLAZA AL ORIGINAL

Elaboró: 2025-11-28 S.C.
Revisó: 2025-12-15 RB

original firmado
NANCY GALINDEZ
Bacterióloga Registro No 125
Universidad de Nariño

original firmado
RUTH JOHANA RODRIGUEZ L.
Química PQ -2828 CPQ
Universidad de Nariño

FIN INFORME DE RESULTADOS

Nuestro Compromiso Universitario es la Excelencia

Universidad de Nariño, Calle 18 No. 50-02, Teléfono: 7243309 - 7311449 Extensión 2120
Cali-WhatsApp: 3156948036
Correo electrónico: labquimicoaguas@udenar.edu.co

Anexo 8. Resultados de laboratorio del agua de grifo domiciliario (agua empapasto).

FECHA EMISIÓN RESULTADOS: 2025-12-15		INFORME No: LAQ-R-224-B-25	
<p align="center">SECCION DE LABORATORIOS LABORATORIO DE ANÁLISIS QUÍMICO Y AGUAS INFORME DE RESULTADOS MUESTRAS DE AGUA POTABLE</p>			
<p align="center">Código Muestra LAQ-441-25</p>		<p align="center">Descripción SISTEMA - GRIFO LAVAMANOS PORTATIL - CASA DE HABITACIÓN CALLE 20 No. 7A ESTE 38 - VEREDA PUERRES</p>	
PARAMETRO	METODO	TECNICA	CODIGO MUESTRA LAQ-441-25
PH (Medición en Laboratorio)	SH FIEC036 No.24 4508 - B	ELECTROMETRICA	6,40
COLOR APARENTE	SH FIEC036 No.24 5026 - C	FOTOMETRICA	< 5,00
TURBIDEZ	SH FIEC036 No.24 5030 - B	NEFELOMETRICA	0,59
ACIDEZ	SH FIEC036 No.24 5308 - B	VOLUMETRICO	6,73
ALCALINIDAD TOTAL	SH FIEC036 No.24 5308 - C	VOLUMETRICO	<20,00
DUREZA TOTAL	SH FIEC036 No.24 5308 - C	VOLUMETRICO	34,7
DUREZA CALCIO	SH FIEC036 No.24 5308 - Ca-D	VOLUMETRICO	24,75
DUREZA MAGNESIO	SH FIEC036 No.24 5308 - Mg-E	VOLUMETRICO	9,9
CLORUROS	SH FIEC036 No.24 5308 - Cl - B	VOLUMETRICO	13,22
HIERRO TOTAL	SH FIEC036 No.24 5308 Fe - B	FOTOMETRICA	0,05
POSFATOS	SH FIEC036 No.24 4508 P - D	FOTOMETRICA	<0,05
NITRITOS	SH FIEC036 No.24 4508 NO2 - B	FOTOMETRICA	< 0,01
NITRATOS	SH FIEC036 No.24 4508 NO3 - B	FOTOMETRICA	1,16
AMONIO	SH FIEC036 No.24 4508 NH4 - C	FOTOMETRICA	0,2
SULFATOS	SH FIEC036 No.24 4508 SO4 - E	TURBIDIMETRICA	< 2,00
CLORIDO RESIDUAL	SH FIEC036 No.24 4508 Cl2 - D	FOTOMETRICA	1,11
MANGANESO	SH FIEC036 No.24 5308 Mn - B	ESPECTROFOTO. A.A	2,41
CALCIO	SH FIEC036 No.24 5308 Ca - B	ESPECTROFOTO. A.A	9,90
ALUMINIO	SH FIEC036 No.24 5308 Al - B	ESPECTROFOTO. A.A	0,011
ZINC	SH FIEC036 No.24 5308 Zn - B	ESPECTROFOTO. A.A	<0,018
MANGANESO	SH FIEC036 No.24 5308 Mn - B	ESPECTROFOTO. A.A	0,045
COLIFORMES TOTALES	SH FIEC036 No.24 5022 - B	FILT. Y MEMBRANA	<1
ESHERICHIA COLI	SH FIEC036 No.24 5022 - D	FILT. Y MEMBRANA	<1
MESOFILOS		FILT. Y MEMBRANA	9
OBSERVACIONES			
<p align="center">El IRCA por muestra: 5 puntajes de riesgo asignado a las características no aceptables. IRCA (%) = $\frac{5}{5} \times 100 = 100$ 5 puntajes de riesgo asignados a todas las características analizadas.</p>			2
<p align="center">Clasificación</p>		<p align="center">IRCA por muestra</p>	<p align="center">IRCA mensual</p>
IRCA (%)	Nivel de Riesgo	(Notificaciones que adelantará la autoridad sanitaria de manera inmediata)	(Acciones)
80.1 - 100	INVIABLE SANITARIAMENTE	Informar a la persona prestadora, al COVE, Alcalde, Gobernador, SSPD, MPS, INS, MAVDT, Contraloría General y Procuraduría General.	Agua no apta para consumo humano, gestión directa de acuerdo a su competencia de la persona prestadora, alcaldes, gobernadores y entidades del orden nacional.
35.1 - 80	ALTO	Informar a la persona prestadora, COVE, Alcalde, Gobernador y a la SSPD.	Agua no apta para consumo humano, gestión directa de acuerdo a su competencia de la persona prestadora y
14.1 - 35	MEDIO	Informar a la persona prestadora, COVE, Alcalde y Gobernador.	Agua no apta para consumo humano, gestión directa de la persona prestadora.
5.1 - 14	BAJO	Informar a la persona prestadora y al COVE.	Agua no apta para consumo humano, susceptible de mejoramiento.
0 - 5	SIN RIESGO	Continuar el control y la vigilancia.	Agua apta para consumo humano. Continuar la vigilancia.
<p>DESVIACIONES / EXCLUSIONES / ACLARACIONES AL INFORME (El Laboratorio solo es responsable del análisis de la muestra)</p>		<p>Los resultados aquí reportados corresponden a la muestra conforme se recibió en el laboratorio. El análisis de la muestra registrada se realizó de acuerdo a los Protocolos establecidos dentro del Laboratorio de Análisis Químico y Aguas de la Universidad de Nariño. Prohibida su reproducción parcial o total sin previa autorización del laboratorio.</p>	

LOS RESULTADO SON VALIDOS UNICAMENTE PARA LA MUESTRA ANALIZADA

ESTE INFORME REEMPLAZA AL ORIGINAL

Elaboró: 2025-11-28 S.C.
Revisó: 2025-12-15 JR

original firmado
NANCY GALINDEZ
Bacterióloga Registro No 125
Universidad de Nariño

original firmado
RUTH JOHANA RODRIGUEZ L.
Química PQ -2828 CPQ
Universidad de Nariño

FIN INFORME DE RESULTADOS

Nuestro Compromiso Universitario es la Excelencia
Ciudad Universitaria - Torobajo - Teléfono: 7314477

 <p>UNIVERSIDAD CESMAG NIT: 800.109.387-7 VIGILADA MINEDUCACIÓN</p>	CARTA DE ENTREGA TRABAJO DE GRADO O TRABAJO DE APLICACIÓN – ASESOR(A)	CÓDIGO: AAC-BL-FR-032
		VERSIÓN: 1
		FECHA: 09/JUN/2022

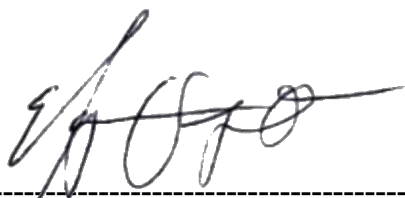
San Juan de Pasto, 29 de abril del 2026

Biblioteca
REMIGIO FIORE FORTEZZA OFM. CAP.
Universidad CESMAG
Pasto

Saludo de paz y bien.

Por medio de la presente se hace entrega del Trabajo de Grado / Trabajo de Aplicación denominado IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA AUTOMATIZADO DE LAVADO DE MANOS CON RECIRCULACIÓN Y DESINFECCIÓN CON PLASMA FRÍO, presentado por las autoras YINETH DANIELA BOTINA PUERRES y LAURA MELISA PINEDA PAREDES del Programa Académico de INGENIERIA ELECTRÓNICA, al correo electrónico biblioteca.trabajosdegrado@unicesmag.edu.co. Manifiesto como asesor, que su contenido, resumen, anexos y formato PDF cumple con las especificaciones de calidad, guía de presentación de Trabajos de Grado o de Aplicación, establecidos por la Universidad CESMAG, por lo tanto, se solicita el paz y salvo respectivo.

Atentamente,



EDGAR ALBERTO UNIGARRO CALPA, Ph.D.


CC:1085266351

Ingeniería Electrónica

Universidad CESMAG

Tel.3182969880


eaunigarro@unicesmag.edu.co

 UNIVERSIDAD CESMAG <small>NIT: 800.109.387-7 VIGILADA MINEDUCACIÓN</small>	AUTORIZACIÓN PARA PUBLICACIÓN DE TRABAJOS DE GRADO O TRABAJOS DE APLICACIÓN EN REPOSITORIO INSTITUCIONAL	CÓDIGO: AAC-BL-FR-031
		VERSIÓN: 1
		FECHA: 09/JUN/2022

INFORMACIÓN DEL (LOS) AUTOR(ES)	
Nombres y apellidos del autor: Yineth Daniela Botina Puerres	Documento de identidad: 1010147440
Correo electrónico: yinethbotina@gmail.com	Número de contacto: 3242682978
Nombres y apellidos del autor: Laura Melisa Pineda Paredes	Documento de identidad: 1004233063
Correo electrónico: lauramparedes19 @gmail.com	Número de contacto: 3165892836
Nombres y apellidos del autor:	Documento de identidad:
Correo electrónico:	Número de contacto:
Nombres y apellidos del autor:	Documento de identidad:
Correo electrónico:	Número de contacto:
Nombres y apellidos del asesor: Edgar Alberto Unigarro Calpa	Documento de identidad: 1085266351
Correo electrónico: eaunigarro@unicesmag.edu.co	Número de contacto: 3182969880
Título del trabajo de grado: Implementación de un sistema automatizado de lavado de manos con recirculación y desinfección con plasma frío.	
Facultad y Programa Académico: Facultad de Ingeniería - Programa de Ingeniería Electrónica	

En mi (nuestra) calidad de autor(es) y/o titular (es) del derecho de autor del Trabajo de Grado o de Aplicación señalado en el encabezado, confiero (conferimos) a la Universidad CESMAG una licencia no exclusiva, limitada y gratuita, para la inclusión del trabajo de grado en el repositorio institucional. Por consiguiente, el alcance de la licencia que se otorga a través del presente documento, abarca las siguientes características:

- a) La autorización se otorga desde la fecha de suscripción del presente documento y durante todo el término en el que el (los) firmante(s) del presente documento conserve (mos) la titularidad de los derechos patrimoniales de autor. En el evento en el que deje (mos) de tener la titularidad de los derechos patrimoniales sobre el Trabajo de Grado o de Aplicación, me (nos) comprometo (comprometemos) a informar de manera inmediata sobre dicha situación a la Universidad CESMAG. Por consiguiente, hasta que no exista comunicación escrita de mi(nuestra) parte informando sobre dicha situación, la Universidad CESMAG se encontrará debidamente habilitada para continuar con la publicación del Trabajo de Grado o de Aplicación dentro del repositorio institucional. Conozco(conocemos) que esta autorización podrá revocarse en cualquier momento, siempre y cuando se eleve la solicitud por escrito para dicho fin ante la Universidad CESMAG. En estos eventos, la Universidad CESMAG cuenta con el plazo de un mes después de recibida la petición, para desmarcar la visualización del Trabajo de Grado o de Aplicación del repositorio institucional.

 UNIVERSIDAD CESMAG <small>NIT: 800.109.387-7 VIGILADA MINEDUCACIÓN</small>	AUTORIZACIÓN PARA PUBLICACIÓN DE TRABAJOS DE GRADO O TRABAJOS DE APLICACIÓN EN REPOSITORIO INSTITUCIONAL	CÓDIGO: AAC-BL-FR-031
		VERSIÓN: 1
		FECHA: 09/JUN/2022


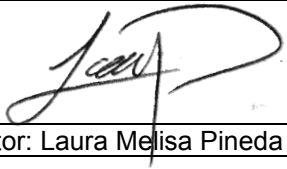
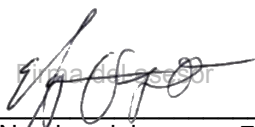
- b) Se autoriza a la Universidad CESMAG para publicar el Trabajo de Grado o de Aplicación en formato digital y teniendo en cuenta que uno de los medios de publicación del repositorio institucional es el internet, acepto(amos) que el Trabajo de Grado o de Aplicación circulará con un alcance mundial.
- c) Acepto (aceptamos) que la autorización que se otorga a través del presente documento se realiza a título gratuito, por lo tanto, renuncio(amos) a recibir emolumento alguno por la publicación, distribución, comunicación pública y/o cualquier otro uso que se haga en los términos de la presente autorización y de la licencia o programa a través del cual sea publicado el Trabajo de grado o de Aplicación.
- d) Manifiesto (manifestamos) que el Trabajo de Grado o de Aplicación es original realizado sin violar o usurpar derechos de autor de terceros y que ostento(amos) los derechos patrimoniales de autor sobre la misma. Por consiguiente, asumo(asumimos) toda la responsabilidad sobre su contenido ante la Universidad CESMAG y frente a terceros, manteniéndose indemne de cualquier reclamación que surja en virtud de la misma. En todo caso, la Universidad CESMAG se compromete a indicar siempre la autoría del escrito incluyendo nombre de(los) autor(es) y la fecha de publicación.
- e) Autorizo(autorizamos) a la Universidad CESMAG para incluir el Trabajo de Grado o de Aplicación en los índices y buscadores que se estimen necesarios para promover su difusión. Así mismo autorizo (autorizamos) a la Universidad CESMAG para que pueda convertir el documento a cualquier medio o formato para propósitos de preservación digital.

NOTA: En los eventos en los que el trabajo de grado o de aplicación haya sido trabajado con el apoyo o patrocinio de una agencia, organización o cualquier otra entidad diferente a la Universidad CESMAG. Como autor(es) garantizo(amos) que he(hemos) cumplido con los derechos y obligaciones asumidos con dicha entidad y como consecuencia de ello dejo(dejamos) constancia que la autorización que se concede a través del presente escrito no interfiere ni transgrede derechos de terceros.

Como consecuencia de lo anterior, autorizo(autorizamos) la publicación, difusión, consulta y uso del Trabajo de Grado o de Aplicación por parte de la Universidad CESMAG y sus usuarios así:

- Permiso(permitimos) que mi(nuestro) Trabajo de Grado o de Aplicación haga parte del catálogo de colección del repositorio digital de la Universidad CESMAG por lo tanto, su contenido será de acceso abierto donde podrá ser consultado, descargado y compartido con otras personas, siempre que se reconozca su autoría o reconocimiento con fines no comerciales.

En señal de conformidad, se suscribe este documento en San Juan de Pasto a los 29 días del mes de abril del año 2026

 Firma del autor	 Firma del autor
Nombre del autor: Yineth Daniela Botina Puerres	Nombre del autor: Laura Melisa Pineda Paredes
 Firma del autor	 Firma del autor
Nombre del autor:	Nombre del autor:
 Nombre del asesor: Edgar Alberto Unigarro Calpa	