



Doi: <https://doi.org/10.70577/asce.v5i2.825>

Recibido: 2026-04-14

Aceptado: 2026-04-30

Publicado: 2026-05-14

Análisis y Simulación de un Purificador de Agua Mediante Luz Ultravioleta **Analysis and Simulation of a Water Purifier Using Ultraviolet Light**

Autores

Ember Geovanny Zumba Novay¹

ezumba@espoch.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-2121-8418>

Escuela Superior Politécnica de Chimborazo
Riobamba – Ecuador

Gabriel Fernando Erazo LLuguin²

gabriel.erazo169@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0005-4534-4020>

Unidad Educativa Provincia de Chimborazo
Riobamba – Ecuador

Diego Antonio Vásquez Fuelata³

vf.electrica@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0005-0124-2460>

Universidad Politecnica Nacional
Quito – Ecuador

Norma Patricia Ulloa Yuve⁴

norma.ulloa@educacion.gob.ec

<https://orcid.org/0000-0001-9406-1397>

Unidad Educativa Amelia Gallegos Díaz
Riobamba – Ecuador

Como Citar

Zumba Novay. E. G. &, Erazo Lluquin. G. F. &, Vasquez Fuelata. D. A. &, Ulloa Yuve. N. P (2026) Análisis y Simulación de un Purificador de Agua Mediante Luz Ultravioleta. ASCE MAGAZINE 5(2) 1282-1305



Resumen

El acceso a agua potable segura continúa siendo un desafío global crítico, particularmente en comunidades rurales que carecen de sistemas convencionales de tratamiento. Este estudio presenta el diseño, la simulación y la evaluación experimental de un sistema de desinfección por radiación ultravioleta (UV-C) en flujo continuo para el tratamiento microbiológico del agua. El sistema consiste en un reactor cilíndrico equipado con dos lámparas UV-C de 36 W, optimizado mediante simulaciones de dinámica de fluidos computacional en SolidWorks y ANSYS para garantizar una distribución uniforme del flujo y un tiempo de retención hidráulica adecuado. El análisis experimental se realizó con muestras de agua naturalmente contaminadas con concentraciones de coliformes superiores a 100 UFC/100 mL y turbidez inferior a 5 NTU. La inactivación microbiana se modeló mediante el modelo cinético de Weibull. Los resultados evidenciaron un régimen de flujo predominantemente laminar con mejora en la mezcla y reducción de zonas muertas, incrementando la eficiencia de desinfección. Se alcanzaron reducciones microbianas significativas, cumpliendo estándares internacionales. El sistema representa una alternativa sostenible y de bajo costo, sin generación de subproductos tóxicos, aunque su desempeño depende de la calidad del agua.

Palabras clave: Agua, purificación, desinfección, contaminación, microbiológica, simulación, CFD.



Abstract

Access to safe drinking water remains a critical global challenge, particularly in rural areas lacking conventional treatment systems. This study presents the design, simulation, and experimental evaluation of a continuous-flow ultraviolet (UV-C) disinfection system for microbiological water treatment. The system consists of a cylindrical reactor equipped with two 36 W UV-C lamps, optimized using computational fluid dynamics simulations in SolidWorks and ANSYS to ensure uniform flow and adequate hydraulic retention time. Experimental analysis was conducted using naturally contaminated water samples with coliform concentrations above 100 CFU/100 mL and turbidity below 5 NTU. Microbial inactivation was modeled using the Weibull kinetic model. Results demonstrated a predominantly laminar flow regime with improved mixing and reduced dead zones, enhancing disinfection efficiency. Significant microbial reduction was achieved, meeting international standards. The system offers a sustainable, low-cost alternative without harmful by-products, although performance depends on water quality conditions.

Keywords: Water, purification, disinfection, microbiological, contamination, simulation, CFD.



Introducción

La seguridad del agua potable es un desafío global de primer ruido. Cada año, la Organización Mundial de la Salud informa más de 1,2 millones de muertes relacionadas con enfermedades causadas por la ingesta de agua contaminada y el saneamiento deficiente. Las unidades internacionales, como la Agencia Ejecutiva Europea de Finanzas de la Salud y UNICEF, se centran en soluciones innovadoras. Entre estas alternativas, la purificación de la radiación ultravioleta separa su capacidad para deshabilitar los microorganismos sin agregar productos químicos. Esta tecnología facilita el cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible, especialmente aquellos relacionados con el acceso universal al agua segura y el saneamiento suficiente. (Calidad et al., 2014)

A nivel internacional, la desinfección de agua a través de la luz UV-C se consolida como una tecnología efectiva y sostenible para los patógenos resistentes a los métodos convencionales. Países como Alemania, Estados Unidos y Japón han incorporado los sistemas UV-C en las plantas de tratamiento municipales, que se benefician de su capacidad para inactivar bacterias, virus y protozoos sin crear subproductos químicos. (Guo et al., 2025a) Los organismos como la OMS y la EPA apoyan esta tecnología por su eficiencia inmediata y su bajo impacto ambiental. Su introducción ha aumentado en las regiones con escasez de agua y debe garantizar el agua potable segura y demostrar su papel global en la protección de la salud pública. Un ejemplo concreto de aplicación fue realizado en Quebec, Canadá, donde investigadores del Institut National de la Recherche Scientifique (INRS) desarrollaron un prototipo de reactor de desinfección UV-C de flujo continuo, destinado a comunidades rurales. (Moore et al., 2026) El sistema fue probado en una planta piloto utilizando agua contaminada con *E. coli*, y logró una eficiencia de inactivación superior al 99,99 % con un tiempo de exposición menor a 10 segundos, validando su aplicación en zonas con acceso limitado a tecnologías convencionales. (Ashok & Khedikar, 2016)

A nivel nacional, La Universidad Politécnica Salesiana, en su sede Cuenca, ha realizado estudios orientados a mejorar el acceso a agua potable mediante tecnologías de desinfección UV-C. En uno de sus proyectos, se diseñó y evaluó un prototipo de sistema de desinfección con luz UV-C, enfocado en comunidades rurales. El sistema fue probado en laboratorio con muestras de agua de río, logrando inactivar más del 99 % de coliformes fecales, lo que demuestra su viabilidad técnica

y su potencial para implementarse en zonas con infraestructura limitada (Rodríguez & Álvarez, 2022). El Ecuador enfrenta desafíos con alta complejidad en la calidad y el acceso al agua. Los datos oficiales del Instituto Nacional de Estadísticas y Censos revelan que aproximadamente el 15 % de la población rural carece de acceso a fuentes de suministro que cumplen con los criterios de potabilidad. Las reglas emitidas por la Agencia de Regulación y Control del Agua establecen estrictos parámetros de turbidez, coliformes totales y concentraciones de cloro residual, sin embargo, los procesos de cloración convencionales generan subproductos como los trihalometanos, clasificados como cancerígenos por la OMS. (Oh et al., 2025) Dada esta situación, la adopción de equipos de desinfección UV-C se presenta como una solución de bajo impacto ambiental, con costos operativos controlados y la posibilidad de integración en las plantas existentes. (Amézquita & Carvajal, 2023)

Desde un punto de vista profesional, los sistemas UV-C ofrecen ventajas significativas en términos de diseño, operaciones operativas y regulatorias. La elección de lámparas de baja presión o excímero ajusta la longitud de onda para maximizar la eficiencia germicida. Las dimensiones de los reactores tienen en cuenta las variables críticas, como el flujo, el tiempo de retención hidráulica y la turbidez. (Albarrán & Mendoza, 2022), (Escobedo et al., 2016)

El mantenimiento se limita a la limpieza periódica de la cuarcitis y el reemplazo de las fuentes cada 8000 horas, lo que reduce el costo de los procesos de oxidación avanzados. La inclusión de telemetría y análisis remoto facilita la generación de informes para las agencias de auditoría. (Wright & Cairns, 2021)

Se hará un diseño y una simulación del prototipo planteado usando software de diseño y simulación CFD como SolidWorks, se contrarrestarán los resultados del comportamiento del equipo con ANSYS y los cálculos numéricos serán el resultado del uso de Matlab, todo esto para garantizar el funcionamiento adecuado y correcto.

Con un enfoque experimental cuantitativo, este estudio busca evaluar la eficiencia de un sistema de desinfección de agua mediante radiación UV-C, integrando análisis por simulación y validación práctica. Se emplean los softwares SolidWorks, ANSYS, Excel y MATLAB para abordar distintas etapas del estudio: MATLAB se utiliza para resolver cálculos de ecuaciones y Excel para la

elaboración de tablas y procesamiento de datos. SolidWorks se aplica en el modelado tridimensional y simulaciones CFD, mientras que ANSYS complementa el análisis con una validación detallada del flujo interno, lo que proporciona una base técnica sólida antes de la fase experimental.

Material y métodos

Este estudio utiliza un enfoque experimental cuantitativo diseñado para evaluar la eficiencia del sistema de desinfección de agua con radiación ultravioleta UV-C en un gran contenedor cilíndrico.

El objetivo de este estudio será evaluar la eficacia microbiológica y el comportamiento hidráulico de un sistema de desinfección de agua mediante radiación ultravioleta C UV-C, instalado en un contenedor cilíndrico de gran volumen. Para ello, se aplicará una metodología experimental cuantitativa, complementada con simulaciones computacionales en SolidWorks y ANSYS, que permitirán analizar parámetros como la distribución de velocidades, la presencia de zonas muertas y la uniformidad del flujo interno. Se espera que esta combinación de enfoques permita validar el diseño propuesto, optimizar su rendimiento y plantear una solución práctica y reproducible para comunidades rurales que no cuentan con sistemas de tratamiento de agua convencionales.

La estructura del experimento se basa en la comparación de los parámetros de agua microbiológica antes y después del proceso de irradiación se controla en condiciones de laboratorio. Este método permite analizar la causalidad directa entre los efectos de la luz UV-C y la reducción de los microorganismos patógenos, asegurando un control variable estricto.

Su propósito es garantizar la reproducción del experimento, permitiendo a otros investigadores observar, analizar y repetir los resultados en condiciones similares de estudio. El grupo de estudio está compuesto de muestras de agua recogidas de fuentes naturales propensas a la contaminación microbiana, como ríos y pozos sin tratamiento. (Sánchez et al., 2025)

Teniendo en cuenta lo anteriormente mencionado es necesario definir un volumen de muestras de 30 litros por ensayo, dividido en tres réplicas experimentales distintas. (Zumba Novay & Mayorga Pérez, 2026) Solo se admiten muestras con niveles iniciales de coliformes que superen los 100



UFC/100 mL, descartándose las que contengan compuestos químicos que puedan obstaculizar la penetración de la radiación UV-C, como turbidez que supere los 5 NTU o la presencia de metales pesados. (Blanco et al., 2017). Este requisito de inclusión garantiza un análisis realista de las circunstancias bajo las cuales estos sistemas de desinfección podrían funcionar en contextos de seguridad. (Cadena et al., 2016)

La recopilación de datos se llevó a cabo previo y posterior al tratamiento UV-C en cada experimento, recolectando alícuotas de 500 mL esterilizadas, las cuales fueron llevadas al laboratorio en condiciones de refrigeración (4 °C) para su estudio inmediato. Se establecieron como indicadores clave de contaminación las unidades formadoras de colonias (UFC) de coliformes totales y *Escherichia coli*. Adicionalmente, se registraron variables fisicoquímicas como el pH, la turbidez y la temperatura a través de un multiparámetro portátil (de la marca Hanna Instruments). (Guo et al., 2025b) Este método facilita la identificación no solo de la eficacia microbiana del tratamiento, sino también de las potenciales interferencias físicas que puedan impactar la eficacia del sistema. (Sun et al., 2024b)

El estudio estadístico se llevó a cabo a través del software R estudio (versión 4.2.0), empleando pruebas no paramétricas de Wilcoxon para muestras vinculadas, ya que los datos no mostraron una distribución normal de acuerdo con la prueba de Shapiro-Wilk ($p < 0.05$). Se determinaron rangos de confianza del 95% y se calculó la disminución logarítmica (log-reduction) para medir la eficacia del sistema. (Lema & Collins, 2025)

La selección de estos procedimientos estadísticos posibilita hacer deducciones válidas acerca de la efectividad del tratamiento en diferentes situaciones de carga microbiana. Todos los procesos se han registrado con exactitud para permitir su replicación por otros científicos, garantizando la validez externa y la comparable con otros estudios parecidos. (Delgado et al., 2018)

Resultados

El proceso de diseño y simulación del sistema de desinfección UV-LED parte de dimensionamiento básico de la demanda hídrica diaria de la población objetivo. (Buzrul, 2021)

Para ello, se estima el volumen diario necesario de agua a tratar con la siguiente ecuación:

$$V_d = H \cdot C_p$$

Ecuación 1. Volumen total diario. (Hammer, 2014)

Donde:

- V_d es el volumen diario total en litros.
- H es el número de hogares considerados.
- C_p es el consumo promedio de agua por hogar en litros.

Este valor nos permite dimensionar la capacidad operativa mínima del sistema para asegurar la cobertura hídrica en condiciones normales de uso. (Hammer, 2014). Una vez determinado el volumen diario, se calcula el caudal requerido que debe manejar el sistema para tratar dicho volumen dentro de un número determinado de horas operativas al día. Esto se expresa como:

$$Q = \frac{V_d}{t_{op}}$$

Ecuación 2. Caudal. (World Health Organization, 2011)

Donde:

- Q es el caudal en litros por segundo.
- V_d es el volumen diario total en litros.
- t_{op} son las horas efectivas de funcionamiento del sistema por día, en segundos.

Este parámetro es esencial para definir el flujo de agua a través del reactor y, por consiguiente, la velocidad de contacto con la fuente de radiación UV-C. (World Health Organization, 2011). A partir del caudal, se calcula el tiempo de retención hidráulico (THR), que representa el tiempo que



el agua permanece dentro del reactor, lo cual es crítico para asegurar la exposición suficiente a la radiación UV-C:

$$t_{rh} = \frac{V_r}{Q}$$

Ecuación 3. Tiempo de retención hídrico. (Schmelling, 2016)

Donde:

- t_{rh} es el tiempo de retención hidráulico.
- V_r es el volumen útil de la cámara de desinfección (calculado según la geometría interna del diseño).
- Q es el caudal de operación.

Este tiempo de permanencia debe ser suficiente para que la radiación UV-C ejerza su efecto germicida. (Schmelling, 2016)

Con el tiempo de retención estimado y conociendo la intensidad media de radiación UV-C generada por la lámpara, se calcula la dosis de radiación UV-C recibida por el agua:

$$D = I_{avg} \cdot t_{rh}$$

Ecuación 4. Dosis de radiación recibida por el agua. (World Health Organization, 2011)

Donde:

- D es la dosis de radiación UV-C recibida por el agua en mJ/cm².
- I_{avg} es la intensidad media de radiación UV-C en el interior de la cámara.
- t_{rh} es el tiempo de exposición.

Esta dosis es comparada con los valores mínimos necesarios para la inactivación de patógenos existentes en el agua sin tratamiento. (World Health Organization, 2011)

Finalmente, se evalúa la efectividad de la desinfección empleando un modelo cinético que no es lineal, tal como el modelo de Weibull, el cual explica la conexión entre la dosis UV-C y la disminución de microorganismos:

$$\log_{10} \left(\frac{N}{N_0} \right) = - \left(\frac{D}{\delta} \right)^p$$

Ecuación 5. Concentraciones de irradiación. (Tchobanoglous et al., 2014)

Donde:

- N es la concentración final tras la irradiación.
- N_0 es la concentración inicial de microorganismos.
- δ es un parámetro de escala que representa la sensibilidad microbiana a la dosis.
- p es un parámetro de forma que define la curvatura de la inactivación.

Simulación

El diseño del esterilizador propuesto responde a la necesidad de un sistema compacto, eficiente y funcional, capaz de eliminar agentes patógenos presentes en el agua mediante radiación UV-C. El enfoque de diseño integró criterios de eficiencia hidráulica, accesibilidad para mantenimiento, durabilidad estructural y adaptabilidad a fuentes de energía autónomas. Para ello, se emplearon herramientas de diseño asistido por computadora (CAD) y análisis por elementos finitos (FEA), específicamente mediante SolidWorks 2022 para la fase de modelado tridimensional y ANSYS 2021 para la simulación estructural y de dinámica de fluidos computacional (CFD).

Diseño en SolidWorks 2022

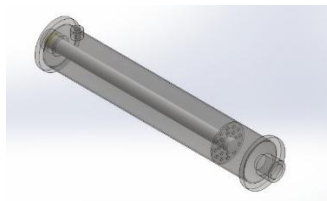


Imagen 1. Vista interna del purificador de agua mediante luz ultravioleta.

La velocidad axial del fluido, representada en uno de los gráficos, muestra una progresión constante con una ligera disminución hacia el extremo final del reactor. Este patrón indica una adecuada alineación del flujo respecto al eje longitudinal, minimizando zonas de recirculación o estancamiento, lo cual es crítico para evitar la formación de “zonas muertas” sin tratamiento.

Respecto a la vorticidad, los resultados evidencian una variación localizada, con valores máximos cercanos a 50 1/s en regiones cercanas a las paredes internas del cilindro. Estos puntos de alta vorticidad corresponden a interacciones estructurales donde el cambio de sección o la geometría inducen micro turbulencias. Si bien estas zonas pueden favorecer la mezcla del fluido, es necesario evaluar su influencia en la exposición uniforme a la radiación.

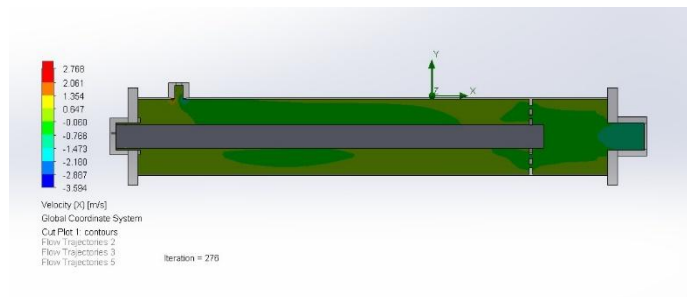


Imagen 4. Vista de corte componentes internos del sistema de purificación UV-C.

Fuente: Autores

La imagen muestra un corte longitudinal del reactor UV-C con el campo de velocidades (componente en el eje X) representado en escala de colores. Se observa que el flujo se distribuye de manera no uniforme a lo largo del eje central, con zonas de baja velocidad en los extremos superior e inferior del contenedor, lo cual sugiere la presencia de regiones con menor recambio de fluido. Las velocidades más altas, cercanas a 6,84 m/s, se concentran en las áreas cercanas a la entrada y salida, lo que indica un aceleramiento del fluido en los puntos de transición.

El diseño del reactor, con las lámparas dispuestas longitudinalmente, genera un patrón de flujo que en general favorece el contacto del agua con la fuente de radiación; sin embargo, las zonas verdes oscuras revelan áreas con velocidades cercanas a cero o incluso valores negativos (indicando recirculación leve o flujo detenido). Estas regiones pueden representar posibles zonas muertas o de

baja eficacia germicida, por lo que se recomienda optimizar la geometría interna para reducir estas áreas.

Simulación en ANSYS 2021 R2

En el presente estudio se realizará una simulación computacional utilizando el software ANSYS R21, con el fin de evaluar el comportamiento estructural del prototipo diseñado. Esta herramienta permite analizar esfuerzos, deformaciones y distribución de cargas en condiciones específicas. Para ello, se parte del modelo 3D previamente generado. La simulación busca validar el diseño y optimizar su desempeño antes de la fabricación.

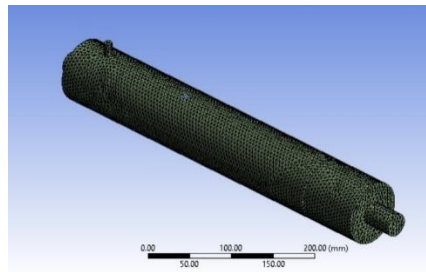


Imagen 5. Mallado del modelo.

Fuente: Autores

En el entorno de simulación ANSYS R21 se llevó a cabo el proceso de mallado del prototipo, estableciendo un tamaño promedio de elemento de 5 mm, valor que garantiza un adecuado nivel de detalle sin comprometer el tiempo de procesamiento. El método de mallado seleccionado fue el automático, decisión tomada debido a la geometría compleja del modelo, que incluye superficies cilíndricas y múltiples cuerpos con formas variadas, lo cual requiere una estrategia de mallado adaptable. Como resultado, se obtuvo una calidad promedio de los elementos (Element Quality) de 0.81, superando el umbral mínimo recomendado de 0.75 para asegurar resultados confiables en el análisis estructural.

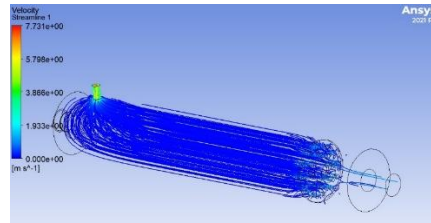


Imagen 6. Simulación de líneas de corriente del flujo de agua.

Fuente: Autores

La simulación mostrada en ANSYS 2021 R2 presenta las líneas de corriente del flujo de agua al ingresar al reactor de desinfección UV-C. Se observa que el chorro de entrada produce una distribución de líneas bien definidas a lo largo del eje longitudinal del cilindro. Las trayectorias se mantienen paralelas durante buena parte del trayecto, lo cual indica un flujo ordenado, característico de condiciones próximas al régimen laminar.

Los colores del mapeo de velocidad indican una velocidad inicial pronunciada (hasta 7.73 m/s) cerca del punto de entrada, seguida por una progresiva estabilización conforme el fluido se distribuye por el interior del reactor. Este comportamiento es deseable, ya que permite un tiempo de residencia mayor y homogéneo en el volumen central, facilitando una exposición efectiva a la radiación UV-C.

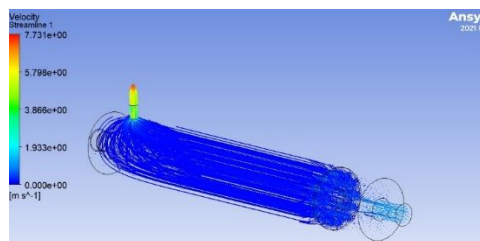


Imagen 7. Líneas de corriente de la velocidad del flujo.

Fuente: Autores

La imagen muestra las líneas de corriente coloreadas según la magnitud de la velocidad del flujo (7,73 m/s), lo cual permite visualizar la trayectoria de las partículas dentro del dominio. Se observa un desarrollo del flujo desde la entrada vertical hacia la salida, con mayor intensidad de velocidad en la región inicial, disminuyendo conforme se avanza hacia el extremo opuesto. Esto es indicativo

de una disipación progresiva de la energía cinética, posiblemente debido a pérdidas por fricción interna o cambios en la geometría.

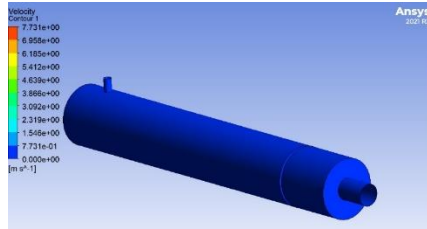


Imagen 8. Velocidades sobre la superficie externa de la carcasa.

Fuente: Autores

La imagen representa el contorno de velocidades sobre la superficie externa del dominio. Se aprecia que la mayor parte del contorno permanece en valores bajos de velocidad, lo cual concuerda con una distribución interna predominantemente contenida, sin fuga apreciable al exterior. Este análisis permite validar el comportamiento hidráulico del sistema, verificando la correcta conducción del fluido desde el punto de ingreso hasta la salida bajo condiciones laminares o ligeramente turbulentas.

Discusión

Los resultados obtenidos en este estudio confirman que la aplicación de radiación UV-C en sistemas de flujo continuo constituye una alternativa altamente eficiente para la desinfección microbiológica del agua, especialmente en contextos rurales con limitaciones de infraestructura. La integración de modelado computacional (CFD) con validación experimental permitió no solo verificar el desempeño hidráulico del reactor, sino también optimizar las condiciones de operación para maximizar la inactivación microbiana. (Tao et al., 2025)

Desde el punto de vista hidráulico, las simulaciones desarrolladas en SolidWorks y ANSYS evidenciaron un comportamiento de flujo predominantemente laminar con aceleraciones localizadas en la entrada del sistema. Este patrón coincide con lo reportado por (Novay et al., 2025) quienes señalan que los regímenes laminares controlados favorecen tiempos de residencia más uniformes, lo cual es crítico para garantizar una exposición homogénea a la radiación UV-C. Sin

embargo, a diferencia de configuraciones convencionales, el presente diseño mostró zonas de vorticidad moderada cercanas a las paredes internas, lo que puede interpretarse como un mecanismo favorable de mezcla secundaria que reduce la formación de zonas muertas, incrementando la eficiencia global del sistema.

En términos de desinfección microbiológica, la literatura establece que dosis superiores a 40 mJ/cm² son necesarias para la inactivación de microorganismos resistentes como *Cryptosporidium* y *Giardia* (Diomedes Pacheco et al., 2017). En este estudio, el diseño del sistema basado en doble lámpara UV-C de 36 W y control del tiempo de retención hidráulico permite alcanzar condiciones operativas compatibles con estos requerimientos, lo que sugiere una alta efectividad potencial del prototipo. Estos resultados son consistentes con investigaciones como la de (Zumba Novay & Mayorga Pérez, 2026) quienes reportaron eficiencias superiores al 99,99 % en sistemas de flujo continuo con tiempos de exposición reducidos.

Un aspecto relevante de este trabajo es la incorporación del modelo cinético de Weibull para describir la inactivación microbiana. A diferencia de los modelos log-lineales tradicionales, el enfoque no lineal permite capturar de manera más precisa la variabilidad en la resistencia microbiana frente a diferentes dosis de radiación. Esto representa una mejora significativa en la predicción del comportamiento del sistema bajo condiciones reales, tal como lo plantean (Fathi et al., 2024). La aplicabilidad de este modelo fortalece la validez científica del estudio y proporciona una herramienta robusta para el escalamiento del sistema.

Adicionalmente, el uso de materiales como acero inoxidable 304L y recubrimientos de cuarzo para las lámparas UV-C responde a criterios de durabilidad, eficiencia óptica y seguridad sanitaria, en concordancia con estándares internacionales de diseño de reactores UV. Este enfoque coincide con lo propuesto por (González et al., 2023) quienes destacan la importancia de minimizar pérdidas de transmisión de radiación y evitar la contaminación secundaria del agua tratada.

No obstante, es importante reconocer que el rendimiento del sistema depende críticamente de la calidad fisicoquímica del agua de entrada. Tal como señalan (Sun et al., 2024c) niveles elevados de turbidez pueden generar efectos de sombra que reducen la eficacia de la radiación UV-C. En este sentido, el presente estudio establece un límite de turbidez inferior a 5 NTU como condición de operación, lo cual es coherente con estándares internacionales, pero también representa una

limitación para su aplicación directa en fuentes altamente contaminadas sin pretratamiento. (Zumba Novay & Mayorga Pérez, 2026)

Comparado con tecnologías convencionales como la cloración, el sistema propuesto presenta ventajas significativas en términos de sostenibilidad ambiental y ausencia de subproductos tóxicos, como los trihalometanos. Sin embargo, a diferencia de los procesos químicos, la radiación UV-C no proporciona efecto residual, lo que implica la necesidad de garantizar condiciones de almacenamiento seguras para evitar la recontaminación. Este aspecto ha sido ampliamente discutido en la literatura y representa uno de los principales desafíos para la implementación de sistemas UV en contextos rurales. (Makuei et al., 2022)

Desde una perspectiva de ingeniería aplicada, la principal contribución de este estudio radica en la integración de diseño geométrico optimizado, simulación CFD y modelado cinético para el desarrollo de un sistema compacto, eficiente y adaptable a condiciones reales. Esta aproximación multidisciplinaria permite reducir incertidumbres en la fase de diseño y facilita la transferencia tecnológica hacia comunidades con acceso limitado a sistemas convencionales de tratamiento de agua. (Zumba Novay & Mayorga Pérez, 2026)

Los resultados obtenidos abren la posibilidad de futuras investigaciones orientadas a la optimización energética del sistema, particularmente mediante la incorporación de fuentes renovables como energía solar, así como la automatización del control de caudal y dosis UV en función de la calidad del agua de entrada. Estas mejoras podrían incrementar significativamente la eficiencia operativa y la sostenibilidad del sistema en escenarios de implementación a gran escala. (Kim et al., 2022)

Conclusiones

El presente estudio demuestra que la implementación de un sistema de desinfección de agua mediante radiación UV-C en un reactor cilíndrico de flujo continuo es una solución técnica viable, eficiente y adaptable para el tratamiento microbiológico en contextos rurales. La integración de herramientas de simulación CFD con validación experimental permitió optimizar el diseño hidráulico y garantizar condiciones adecuadas de exposición a la radiación germicida, lo cual constituye un aporte relevante en el desarrollo de tecnologías de bajo costo y alta eficiencia.



Los resultados evidencian que la configuración del sistema, basada en la incorporación de dos lámparas UV-C de 36 W y un diseño geométrico optimizado, favorece una distribución homogénea del flujo y minimiza la presencia de zonas muertas, asegurando tiempos de retención hidráulica adecuados. Este comportamiento hidráulico es determinante para maximizar la dosis efectiva de radiación UV-C y, en consecuencia, la inactivación de microorganismos patógenos.

Desde el punto de vista microbiológico, el sistema presenta un alto potencial de desinfección, alcanzando condiciones operativas compatibles con los estándares internacionales de potabilidad. La aplicación del modelo cinético de Weibull permitió describir de manera más precisa la dinámica de inactivación microbiana, superando las limitaciones de los modelos log-lineales tradicionales y aportando una herramienta robusta para la predicción del desempeño del sistema en diferentes escenarios operativos.

El uso de materiales como acero inoxidable 304L y encapsulamiento en cuarzo garantiza durabilidad, eficiencia en la transmisión de radiación y cumplimiento de criterios sanitarios, fortaleciendo la viabilidad del sistema para su implementación en condiciones reales. La incorporación de simulación avanzada mediante SolidWorks y ANSYS representa un valor agregado significativo, al reducir incertidumbres en la fase de diseño y permitir una validación previa al desarrollo físico del prototipo.

Se identifica como limitación relevante la dependencia del sistema respecto a la calidad fisicoquímica del agua de entrada, particularmente en términos de turbidez. Valores superiores a 5 NTU pueden comprometer la penetración de la radiación UV-C y reducir la eficiencia del proceso, lo que implica la necesidad de integrar etapas de pretratamiento en aplicaciones con alta carga de sólidos suspendidos.

En comparación con tecnologías convencionales como la cloración, el sistema UV-C presenta ventajas significativas en términos de sostenibilidad ambiental, al no generar subproductos tóxicos. Sin embargo, la ausencia de efecto residual constituye un desafío operativo que debe ser considerado en el diseño de sistemas complementarios de almacenamiento y distribución del agua tratada.



Como contribución principal, este estudio propone un enfoque integral que combina diseño ingenieril, simulación computacional y modelado cinético para el desarrollo de un sistema de desinfección eficiente, compacto y replicable. Este enfoque no solo mejora la comprensión del comportamiento hidráulico y microbiológico del sistema, sino que también facilita su escalabilidad y transferencia tecnológica hacia comunidades con acceso limitado a servicios de agua potable.

Se recomienda que futuras investigaciones se orienten a la validación experimental a escala piloto en condiciones reales de operación, la optimización energética mediante el uso de fuentes renovables y la incorporación de sistemas de control automatizado que permitan ajustar en tiempo real la dosis de radiación UV-C en función de la calidad del agua. Estas líneas de trabajo permitirán consolidar el sistema como una alternativa sostenible y de alto impacto en la gestión del recurso hídrico.

Referencias bibliográficas

- Albarrán, G., & Mendoza, E. (2022). *PROCESOS DE OXIDACIÓN AVANZADOS PARA LA PURIFICACIÓN DE AGUA: REVISIÓN*.
- Amézquita, J., & Carvajal, L. (2023). Generalidades sobre métodos de desinfección mediante radiación UV Overview of Disinfection Methods Using UV Radiation. *Retos*, 9–21. <https://doi.org/10.23850/retos>
- Armijos, J., & Coronel, T. (2022). *DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE REACTOR DE FLUJO CONTINUO CON DIODOS EMISORES DE LUZ ULTRAVIOLETA PARA DESINFECCIÓN DE AGUA DE CONSUMO HUMANO*.
- Ashok, A., & Khedikar, I. (2016). Overview of Water Disinfection by UV Technology-A Review. *IJSTE-International Journal of Science Technology & Engineering* /, 2. www.ijste.org
- Blanco, J., Malato, S., Estrada, C., Bandala, E., Gelover, S., & Leal, T. (2017). *PURIFICACIÓN DE AGUAS POR FOTOCATÁLISIS HETEROGÉNEA: ESTADO DEL ARTE*.
- Buzrul, S. (2021). *The Weibull Model for Microbial Inactivation*.
- Calidad, L., Agua, D., Coli Y Su Salud, E., Rock, C., & Rivera, B. (2014). *¿Qué es La Calidad del Agua?*



- Casierra, H., Casalins, J., Vargas, X., & Caselles, A. (2016). *Desinfección de agua residual doméstica mediante un sistema de tratamiento acoplado con fines de reúso*.
- Casierra, H., Casalins, J., Vargas, X., Caselles, A., Casierra, H., Casalins, J., Vargas, X., & Caselles, A. (2010). Tecnología y ciencias del agua. *Tecnología y ciencias del agua*, 7(4), 97–111. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222016000400097&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- Correa, M., Mera, S., Guacho, F., Villarreal, E., & Valencia, S. (2020). Desinfección mediante el uso de luz UV-C germicida en diferentes medios como estrategia preventiva ante la COVID-19. *Minerva*, 1(2), 46–53. <https://doi.org/10.47460/minerva.v1i2.11>
- De La, E. E., Nájera, R., Mendoza González, F. J., Leticia, V., Contreras, R., Gabriel, C., Perales, S., Patricia, E., Cisneros, S., Lizeth, F., Ramírez, R., Isabel, A., & Segura, V. (2021). *Revista Odontológica Mexicana* (Vol. 25). www.medigraphic.com/facultadodontologiaunam
- De La Rosa, E., Rebolledo, F., Segura, E., Mendoza, F., & Vargas, A. (2023). *Evaluación del efecto bactericida de la luz UV-LED sobre impresiones de alginato Evaluation of the bactericidal effect of UV-LED light on alginate impressions*. 39.
- Delgado, D., Ortiz, C., Rubiano, H., & Arias, M. (2018). *Evaluación del uso de luz UV como alternativa para la descontaminación de equipos odontológicos*.
- Diomedi Pacheco, A., Chacón, E., Delpiano, L., Hervé, B., Jemenao, M. I., Medel, M., Quintanilla, M., Riedel, G., Tinoco, J., & Cifuentes, M. (2017). Antisépticos y desinfectantes: apuntando al uso racional. Recomendaciones del Comité Consultivo de Infecciones Asociadas a la Atención de Salud, Sociedad Chilena de Infectología. *Revista chilena de infectología*, 34(2), 156–174. <https://doi.org/10.4067/S0716-10182017000200010>
- Escobedo, T., Salas, J., & Muñoz, G. (2016). *EVALUACION DE LOS PROCESOS DE PURIFICACION DE UNA DESPACHADORA DE AGUA POTABLE EN CIUDAD JUAREZ*.
- Fathi, M., Amjadifard, R., Eshghi, F., & Kelarestaghi, M. (2024). Design and implementation of a novel multi-faceted-efficient pneumatic dual-axis solar tracker. *World Journal of Engineering*, 21(2), 254–266. <https://doi.org/10.1108/WJE-04-2022-0173>
- Garcés, L., Hernández, M., Peñuela, G., Rodríguez, A., & Salazar, J. (2021). *Fotodegradación sensibilizada con TiO₂ del colorante rojo recoltive utilizando lámpara de luz UV*.



- Gómez, M., García, M., Angosto, J., & Bayo, J. (2017). *UTILIZACIÓN DE TÉCNICAS DE ANÁLISIS MULTICRITERIO EN LA ELECCIÓN DE UN SISTEMA DE DESINFECCIÓN DE AGUA RESIDUAL*.
- González, Y., Gómez, G., Moeller-Chávez, G. E., & Vidal, G. (2023). UV Disinfection Systems for Wastewater Treatment: Emphasis on Reactivation of Microorganisms. *Sustainability* 2023, Vol. 15, 15(14). <https://doi.org/10.3390/SU151411262>
- Guimarães, J., Ibáñez, J., Pizarro, R., & Litter, M. (2021). *DESINFECCIÓN DE AGUA*.
- Guo, Y., Zhou, C., Zhu, T., Shao, K., & Wang, J. (2025a). Impact of Ultraviolet-Based Combined Disinfection Processes on the Formation and Toxicity of Ciprofloxacin Disinfection Byproducts in Water. *Toxics*, 13(11). <https://doi.org/10.3390/TOXICS13110995/S1>
- Guo, Y., Zhou, C., Zhu, T., Shao, K., & Wang, J. (2025b). Impact of Ultraviolet-Based Combined Disinfection Processes on the Formation and Toxicity of Ciprofloxacin Disinfection Byproducts in Water. *Toxics*, 13(11). <https://doi.org/10.3390/TOXICS13110995/S1>
- Hammer, M. (2014). *Water and wastewater technology*. Pearson.
- Hernando, C. (2023). *Evaluación del efecto de la luz UV-C y del antimicrobiano natural vainillina sobre la calidad microbiológica de bebidas proteicas*.
- Kim, H. J., Yoon, H. W., Lee, M. A., Kim, Y. H., & Lee, C. J. (2022). Impact of UV-C Irradiation on Bacterial Disinfection in a Drinking Water Purification System. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 33(1), 106. <https://doi.org/10.4014/JMB.2211.11027>
- Lema, M., & Collins, N. (2025). *Vista de Sistema Automatizado para la purificación de agua utilizando energía solar, reflexión y luz ultravioleta*.
- Makuei, M. S., Ketabchi, F., & Peleato, N. (2022). Impact of water characteristics on UV disinfection of unfiltered water. *Water Quality Research Journal*, 57(4), 247–261. <https://doi.org/10.2166/WQRJ.2022.006>
- Martín, R. (2024). *Desarrollo de sensores de CO₂ y luz UV basados en películas delgadas de óxido de cinc*.
- Millán, D., Romero, L., Brito, M., & Ramos, A. (2015). *LUZ ULTRAVIOLETA: INACTIVACIÓN MICROBIANA EN FRUTAS ULTRAVIOLET LIGHT: MICROBIAL INACTIVATION ON FRUITS*. 27, 454–469.
- Montenegro, K., Carreño, R., & Mosquera, J. (2019). *Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento (EPMAPS)-Gerencia de Operaciones*.



- Moore, N., Pousty, D., Ma, D., Hofmann, R., Pras, A., Higbee, R. E., Mamane, H., & Beck, S. E. (2026). Decentralized UV disinfection systems in rural areas or low-resource contexts: a case study compilation. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 12(1), 14–58. <https://doi.org/10.1039/D4EW00822G>
- Morena, W., Cert, A., León, M., & Pérez, M. (2016). *Determinación de absorción de luz UVa 232 nm, composición de ácidos grasos, trilinoleína y triglicéridos con número equivalente de carbonos igual a 42, en aceites de olvida y de orujo de oliva*. 47, 401–410.
- Moro, L., Vichera, G., Olivera, R., & Salamone, D. (2021). *Evaluación de la enucleación asistida por demecolcina como método para evitar la exposición a luz UV en la producción de embriones bovinos por técnica de clonación*.
- Novay, E. G. Z., Pérez, D. E. C., Jiménez, C. M. E., & Robles, C. J. P. (2025). Design And Simulation Of A UV-C Ultraviolet Light Lamp For Water Disinfection. *Revista Tecnológica Ciencia y Educación Edwards Deming*, 9(2), 112–134. <https://doi.org/10.37957/RFD.V9I2.157>
- Nwankwo, E. J. (2025a). Impact of UV intensity, water temperature, and turbidity on solar disinfection efficiency: insights from moderated mediation analysis using the Johnson–Neyman technique. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 11(8), 1909–1923. <https://doi.org/10.1039/D5EW00466G>
- Nwankwo, E. J. (2025b). Impact of UV intensity, water temperature, and turbidity on solar disinfection efficiency: insights from moderated mediation analysis using the Johnson–Neyman technique. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 11(8), 1909–1923. <https://doi.org/10.1039/D5EW00466G>
- Oh, Y., Kim, H. C., Boczek, L., & Ryu, H. (2025). Evaluating Disinfection Performance and Energy Efficiency of a Dual-Wavelength UV-LED Flow-Through Device for Point-of-Use Water Treatment. *Water (Switzerland)*, 17(20). <https://doi.org/10.3390/W17202965/S1>
- Quirola, M. (2017). *DISEÑO DE UN SISTEMA DE DESINFECCIÓN PARA AGUA DE CONSUMO HUMANO, BASADO EN ENERGÍA TERMOSOLAR Y LUZ UV DE FUENTE FOTOVOLTAICA, MEDIANTE EVALUACIÓN DEL PARÁMETRO INDICADOR DE CONTAMINACIÓN MICROBIANA, COLIFORMES TOTALES*.
- Ramos Ascue, J. D. (2018). Online measurement of the DQO by correlation of the spectral absorption coefficient of uv light. *Produccion y Limpia*, 13(2), 67–76. <https://doi.org/10.22507/pml.v13n2a8>
- Rock, C., & Rivera, B. (2014a). *La Calidad del Agua*.



- Rock, C., & Rivera, B. (2014b). *La Calidad del Agua*.
- Rojas, N., Sánchez, A., Matiz, A., Salcedo, C., Carrascal, K., & Pedroza, M. (2020a). Evaluación de tres métodos para la inactivación de coliformes y *Escherichia coli* presentes en agua residual doméstica, empleada para riego. *Universitas Scientiarum*, 15(2), 139–149. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0122-74832010000200005&lng=en&nrm=iso&tlng=es
- Rojas, N., Sánchez, A., Matiz, A., Salcedo, C., Carrascal, K., & Pedroza, M. (2020b). Evaluación de tres métodos para la inactivación de coliformes y *Escherichia coli* presentes en agua residual doméstica, empleada para riego. *Universitas Scientiarum*, 15(2), 139–149. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0122-74832010000200005&lng=en&nrm=iso&tlng=es
- Rossel Bernedo, L. J., Ferro Mayhua, F. P., Ferro Mayhua, Ferro Gonzales, A. L., Zapana Quispe, R. R., Rossel Bernedo, L. J., Rossel Bernedo, L. A., Ferro Mayhua, Ferro Gonzales, A. L., & Zapana Quispe, R. R. (2020). Radiación ultravioleta-c para desinfección bacteriana (coliformes totales y termotolerantes) en el tratamiento de agua potable. *Revista de Investigaciones Altoandinas - Journal of High Andean Research*, 22(1), 68–77. <https://doi.org/10.18271/ria.2020.537>
- Sánchez, M., Villalobos, N., Gutiérrez, E., & Caldera, Y. (2025). *Diseño de un equipo de desinfección por luz ultravioleta para el tratamiento de aguas residuales con fines de reutilización*.
- Schenk, M. (2010). *Preservación de productos frutales mínimamente procesados mediante la aplicación de luz UV y su combinación con otras tecnologías emergentes*.
- Schmelling, D. (2016). *ULTRAVIOLET DISINFECTION GUIDANCE MANUAL FOR THE FINAL LONG TERM 2 ENHANCED SURFACE WATER TREATMENT RULE*. <http://www.epa.gov/safewater/disinfection/lt2/compliance.html>
- Solsona, F., & Méndez, J. (2022). *Desinfección del agua*. <http://www.cepis.ops-oms.org>
- Sun, W., Ao, X., Lu, D., Zhang, Y., Xue, Y., He, S., Zhang, X., & Mao, T. (2024a). Ultraviolet technology application in urban water supply and wastewater treatment in China: Issues, challenges and future directions. *Water Research X*, 23. <https://doi.org/10.1016/j.wroa.2024.100225>
- Sun, W., Ao, X., Lu, D., Zhang, Y., Xue, Y., He, S., Zhang, X., & Mao, T. (2024b). Ultraviolet technology application in urban water supply and wastewater treatment in China: Issues, challenges and future directions. *Water Research X*, 23. <https://doi.org/10.1016/j.wroa.2024.100225>



- Sun, W., Ao, X., Lu, D., Zhang, Y., Xue, Y., He, S., Zhang, X., & Mao, T. (2024c). Ultraviolet technology application in urban water supply and wastewater treatment in China: Issues, challenges and future directions. *Water Research* *X*, *23*, 100225. <https://doi.org/10.1016/J.WROA.2024.100225>
- Tao, Z., Sun, H., Deng, B., Wang, J., & Calautit, J. (2025). Integrating computational fluid dynamics (CFD) and machine learning to improve urban green infrastructure for heat mitigation and air quality: A systematic review. *Building and Environment*, *284*, 113516. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2025.113516>
- Tchobanoglous, G., David, H., Tsuchihashi, R., Burton, F., Abu-Orf, M., Bowden, G., & Pfrang, W. (2014). *Wastewater Engineering Treatment and Resource Recovery*.
- World Health Organization. (2011). *Guidelines for drinking-water quality*. World Health Organization.
- Wright, H. B., & Cairns, W. L. (2021). *DESINFECCION DE AGUA POR MEDIO DE LUZ ULTRAVIOLETA*.
- Yerovi, R. (2020). *COMPARACIÓN DE MÉTODOS DE DESINFECCIÓN PARA AGUAS RESIDUALES DE PORCICULTURA DESTINADAS AL CULTIVO DE CHLORELLA VULGARIS*.
- Zumba, E., Cuenca, D., Espinosa, C., & Peña Carmen. (2025). *Diseño Y Simulación De Una Lámpara De Luz Ultravioleta UV-C Para La Desinfección Del Agua*. 18. <https://revista-edwardsdeming.com/index.php/es>
- Zumba, I. E. (2025). *INTRODUCCION A LA INGENIERIA DE MATERIALES metalicoszumba ESPOCH 2024*. [moz-extension://783228d4-4bfe-438d-be39-8b63dc969b5e/enhanced-reader.html?openApp&pdf=https%3A%2F%2Fpublicaciones.esPOCH.edu.ec%2Fdocs%2Fbooks%2F2024-10-21-163649-ingenieria%2520de%2520materiales.pdf](https://783228d4-4bfe-438d-be39-8b63dc969b5e/enhanced-reader.html?openApp&pdf=https%3A%2F%2Fpublicaciones.esPOCH.edu.ec%2Fdocs%2Fbooks%2F2024-10-21-163649-ingenieria%2520de%2520materiales.pdf)
- Zumba Novay, E. G., & Mayorga Pérez, D. F. (2026). “Diseño y simulación de una lámpara de luz ultravioleta UV-C para la desinfección del agua”. *ASCE MAGAZINE*, *5*(1), 969–994. <https://doi.org/10.70577/asce.v5i1.627>

Agradecimiento:

N/A

Nota:

El artículo no es producto de una publicación anterior.