

Diseño de sistema de control UV para inhibir patógenos en sector salud

Jesse Itzel Bautista-Martínez¹, Renata Leal-García¹ y Axel José Uribe-Callejas^{1,*}

¹ Tecnológico Nacional de México/ ITS Huichapan División Ingeniería Mecatrónica; (JIBM) a21021484@iteshu.edu.mx; (RLG) a21021104@iteshu.edu.mx; a21021002@iteshu.edu.mx*

Resumen: La pandemia por SARS-CoV-2 destacó la necesidad de desarrollar métodos de desinfección que minimicen la exposición humana y prevengan contagios. En este contexto, esta investigación se centró en el desarrollo de un sistema robótico que utiliza luz ultravioleta tipo C para inhibir patógenos en ambientes sanitarios cerrados, contribuyendo a reducir focos de infección. Se realizaron encuestas en hospitales y consultorios de Huichapan, Hidalgo, que revelaron una alta disposición hacia el uso de robots para desinfección. Basado en estos hallazgos, se estudiaron parámetros de emisión y tiempos de funcionamiento para combatir diversos microorganismos. El modelo a escala fue probado en laboratorio para evaluar su tiempo de exposición, alcance y rango de irradiación, confirmando su eficacia en desinfección.

Keywords: *Ultravioleta; Desinfección; Automatización*

1. Introducción

La pandemia de COVID-19 ha resaltado la importancia de la higiene y la desinfección para limitar la propagación de enfermedades infecciosas (Calderón-Vicente et al., 2024, Yamanaga et al., 2024). Los hospitales y otros centros de atención médica son vulnerables a la propagación de patógenos por la alta concentración de pacientes y la naturaleza de los procedimientos médicos que pueden generar aerosoles contaminados (Rucci et al., 2024). Las nuevas normativas y recomendaciones han transformado la prestación de servicios de atención médica, demandando un mayor cuidado y precisión en el tratamiento de los pacientes para evitar exposiciones no deseadas al virus u otras enfermedades (Mundle et al., 2024).

Desde el inicio de la pandemia, las clínicas han implementado diversas medidas para prevenir las infecciones por SARS-CoV-2 asociadas a la atención sanitaria (Wild et al., 2023). Entre estas medidas se encuentran los controles administrativos y de ingeniería, así como el uso de equipos de protección personal. Una de las principales estrategias de control administrativo ha sido la realización de pruebas de vigilancia del SARS-CoV-2, lo que ha permitido detectar infecciones asintomáticas y presintomáticas al momento del ingreso a la clínica (Karan et al., 2022).

Además, las clínicas han recurrido a desinfectantes eficaces durante la pandemia, como la niebla seca de peróxido de hidrógeno con partículas $< 1 \mu\text{m}$, que está compuesta por agua purificada, 6,6% de peróxido de hidrógeno, 60 mg/l de cationes de plata y una serie de otros cofórmulantes patentados. El peróxido de hidrógeno y los iones de plata actúan de manera sinérgica, dañando la membrana, el ADN y otros componentes celulares, e inhibiendo la síntesis de proteínas y la actividad enzimática (Amodio et al., 2020).

Asimismo, los alcoholes, como el etanol y el isopropanol, han sido utilizados como desinfectantes de bajo nivel en entornos sanitarios durante años, gracias a su amplio espectro de actividad germicida contra bacterias, virus y hongos. Diferentes tipos y

Bautista-Martínez, Jesse Itzel.; Leal-García, Renata.; Uribe-Callejas, Axel José. Diseño de sistema de control UV para inhibir patógenos en sector salud.

REIA 2024, 8, (4), 33-50.

Recibido: 16/09/2024

Aceptado: 15/11/2024

Publicado: 29/11/24

concentraciones de alcoholes (del 30 al 95%) inactivan eficazmente el SARS-CoV-2. En general, un tiempo de contacto de varios segundos o más suele ser suficiente para reducir de 3 a 4 log₁₀ las poblaciones de microorganismos. Sin embargo, es importante señalar que este tiempo corresponde a pruebas experimentales *in vitro*, y no al tiempo recomendado para su uso práctico (Xiao et al., 202).

Más allá de estos compuestos, el ozono también ha destacado por su notable capacidad oxidante, siendo letal para una amplia gama de bacterias y virus, incluyendo enfermedades como el Ébola, el VIH y la hepatitis B y C. En el estudio de Tizaoui (2020), utilizando modelos moleculares, se ha evaluado la reactividad del ozono hacia elementos clave de la estructura del SARS-CoV-2. Los resultados indican que el ozono puede atacar las proteínas y lípidos de las espigas y la envoltura del virus, alterando su estructura de manera que podría conducir a la inactivación del patógeno.

Sin embargo, si bien la contaminación en espacios interiores siempre ha sido un factor de riesgo e interés con referencia a la salud mundial que puede generar la propagación de enfermedades infecciosas. En ese sentido, es importante encontrar estrategias en las cuales se aplique una menor concentración de químicos tradicionales para la limpieza y desinfección (Sousa et al., 2024). Debido a esto, en el ámbito tecnológico, el uso de sistemas de control UV para la desinfección de habitaciones en el sector sanitario es pionero en la lucha contra la propagación de enfermedades infecciosas (Pereira et al., 2023).

El uso de luz UV-C se perfila como una alternativa prometedora a las estrategias convencionales de control de enfermedades e insectos, encontrándose actualmente en desarrollo comercial (Janisiewicz et al., 2021). Su funcionamiento se basa en la absorción de los rayos UV por los componentes del ácido nucleico (ADN y ARN) de las células, dañando su estructura y destruyendo su capacidad de reproducción (Dorbani et al., 2024). Estudios han demostrado que dosis de 5 mJ/cm² durante 6s o de 22 mJ/cm² durante 25s logran reducciones del 99% y 99,99% respectivamente en el SARS-CoV-2 (Buonanno et al., 2020).

La desinfección con luz UV-C ha demostrado ser efectiva en la reducción de infecciones asociadas a la asistencia sanitaria (IAAS), especialmente aquellas causadas por bacterias productoras de betalactamasas de espectro extendido (BLEE). Un estudio reciente realizado en la Unidad de Cuidados Intensivos Neonatales (UCIN) de un hospital pediátrico de tercer nivel en la Ciudad de México evaluó los efectos beneficiosos de la desinfección ultravioleta C (UV-C) y el recubrimiento adhesivo de cobre sobre las IAAS (De La Rosa-Zamboni et al., 2024). Los resultados mostraron que estas intervenciones, tanto en combinación con la higiene de manos como con los paquetes de prevención, son prometedoras en la reducción de las IAAS, destacando la importancia de adoptar enfoques multidisciplinarios para mejorar la seguridad y la salud de los neonatos en entornos hospitalarios.

No obstante, aunque la radiación UV-C es prometedora para la desinfección, ya que puede esterilizar automáticamente en menos tiempo que los métodos manuales o químicos, sin dejar residuos dañinos y de manera respetuosa con el medio ambiente. Tiene limitaciones, como la necesidad de una exposición directa a la luz para desinfectar, la posibilidad de sombreado y la influencia de la topografía de la superficie en su rendimiento por lo que se debe tener en cuenta estos aspectos al momento de trabajar con ella (Demeersseman et al., 2023).

Aun con las limitaciones técnicas y de infraestructura encontradas, la investigación en esta área puede mejorar significativamente la seguridad y salud de pacientes y personal médico, con un impacto más amplio al ayudar a frenar la propagación de enfermedades infecciosas. Dado el respaldo de estudios que demuestran la eficacia de la luz UV-C, se busca aprovechar este hallazgo para desarrollar un sistema de desinfección robótico que reduzca la exposición del personal de limpieza. La desinfección UV-C es una técnica bien establecida que se espera desempeñe un papel cada vez más importante en este contexto (Probst-Rüd et al., 2024).

El presente trabajo busca documentar el proceso teórico y práctico del proyecto. Este sistema tiene como objetivo principal mejorar la desinfección en entornos hospitalarios, donde la propagación de infecciones puede tener consecuencias graves para la salud de los pacientes.

A través de este proyecto, se espera contribuir a la mejora de la seguridad en los entornos de atención médica, reduciendo la incidencia de infecciones asociadas a la asistencia sanitaria (IAAS) y promoviendo un enfoque multidisciplinario que involucre tanto la tecnología como las mejores prácticas en higiene y control de infecciones.

2. Materiales y Métodos

En este estudio se analizaron los aspectos necesarios en el proceso de inhibición con rayos ultravioleta para obtener un sistema que permita eliminar agentes patógenos en espacios cerrados en el sector salud. El diseño del sistema de inhibición de patógenos consta de 5 etapas descritas en la Figura 1, en el diagrama se expresan las etapas a detalle comenzando con la etapa 1 de Análisis de mercado, donde hacemos un sondeo general en base a encuestas realizadas en el sector salud, posteriormente se realizaron estudios respecto a la luz que se utilizó midiendo parámetros e intensidad que irradia, el diseño del sistema tomando en cuenta los grados de libertad del robot móvil; el ensamblaje del prototipo se considera en la 4ta etapa del diagrama, teniendo como etapa final las pruebas con organismos vivos con el objetivo de medir el alcance de desinfección del dispositivo.

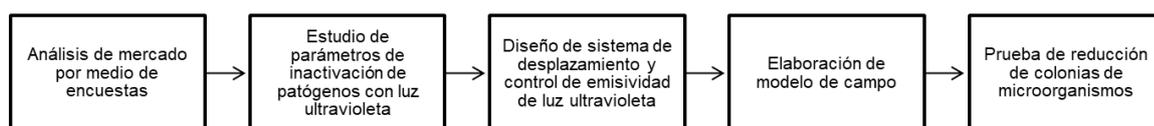


Figura 1. Proceso para el desarrollo de un sistema de control UV para inhibir patógenos en sector salud.

2.1 Análisis de mercado por medio de encuestas

Con el objetivo de identificar el nivel de aceptación o renuencia a la implementación de un robot móvil que dirige la emisión de rayos ultravioleta para inhibición de patógenos en espacios cerrados por parte de personal perteneciente al sector de la salud, se llevaron a cabo dos encuestas, en la primera de ellas se utilizó la escala Likert y se realizó a través de la plataforma Google Forms (Apéndice A).

A partir de lo obtenido en la primera encuesta se generó una segunda con el mismo medio, pero enfocada en conocer los intereses particulares y el grado de aceptación del sistema, en la que se adjuntó un video explicativo con mayor detalle del funcionamiento del proyecto (Apéndice B).

Ambas encuestas se distribuyeron en hospitales y consultorios médicos de la región de Huichapan en el estado de Hidalgo. Y se diseñaron para obtener información relevante sobre los desafíos específicos en esterilización de microorganismos en espacios cerrados. Además, permitieron determinar la existencia de una demanda real y significativa por parte de instituciones del sector salud para implementar soluciones de inhibición de patógenos.

2.2 Estudio de parámetros de inactivación de patógenos con luz ultravioleta

La luz ultravioleta (UV) ha demostrado la capacidad de inactivar una amplia lista de bacterias patógenas, virus y protozoos, ofreciendo una ventaja importante sobre la desinfección con cloro, ya que puede suspender la reproducción celular de patógenos perjudiciales para el ser humano.

Para lograr la inhibición o destrucción de los microorganismos patógenos es necesario transferir energía electromagnética desde una lámpara hasta llegar al material genético

del organismo (ADN o ARN). Su desactivación se deriva del daño a los ácidos nucleicos. El ADN y el ARN celular de cada microorganismo absorben la energía alta asociada a la energía UV de longitud de onda corta, oscilando entre 200 nm y 280 nm. Esta variación ocurre por la naturaleza de los microorganismos existentes.

Debido a que las instituciones del sector salud son consideradas potenciales focos de infección por su alta concentración de pacientes y personal sanitario es importante saber la longitud de onda y el tiempo de exposición necesaria que influyen en la anulación reproductiva de diferentes bacterias patógenas, virus y protozoos.

2.3 Diseño de sistema de desplazamiento y control de emisividad de luz ultravioleta

En esta etapa se realizó la construcción conceptual del sistema destinado a controlar la emisividad de luz ultravioleta (UV) para la inactivación de patógenos. El sistema se diseñó teniendo en cuenta tres componentes fundamentales: mecánico (mecanismo de desplazamiento), electrónico (emisión de luz ultravioleta) y control (microcontrolador y algoritmo de comportamiento).

En el proceso de diseño del sistema, se tuvo en cuenta la selección de un mecanismo de desplazamiento que permitiera conducir la luz ultravioleta por el área seleccionada para la desinfección, siguiendo una trayectoria definida por el usuario, para evitar colisiones y llevar a cabo recorridos que requieran el menor tiempo posible, aumentando el número de tareas de desinfección realizables en poco tiempo.

2.4 Elaboración de modelo de campo

En esta etapa se construyó un modelo de habitación convencional de hospital privado con cama, sofá, silla y gaveta (para almacenar artículos) para conocer el tiempo de exposición y el rendimiento del sistema elaborado en un espacio específico. Como referencia el ejemplo de la Figura 2.



Figura 2. Habitación convencional de hospital privado tomada como referencia para modelo a escala.

2.5 Prueba de irradiación de espacios

Para conocer la capacidad del sistema construido, se realizaron pruebas para determinar la forma y el alcance del haz de luz irradiada alrededor del robot móvil durante su funcionamiento. En esta fase de revisión y evaluación, se analizó detenidamente la emisividad de las lámparas UV-C dispuestas en torno al equipo, considerando específicamente 3 patrones de cono de luz diferenciados. Esto permitió comparar el desempeño de las distintas configuraciones y seleccionar la más adecuada para maximizar la cobertura del área de desinfección.

Adicionalmente, se exploró la posibilidad de mejorar el alcance y dispersión del haz luminoso a través de ajustes y optimizaciones en la programación del sistema de control. Así, se buscó optimizar el rendimiento del dispositivo en cuanto a la efectividad y uniformidad de la irradiación UV-C en torno al robot móvil.

3. Resultados y discusión

3.1 Análisis de mercado por medio de encuestas

Las dos encuestas aplicadas en conjunto sumaron una muestra de 8 personas cercanas a un rubro importante dentro de hospitales y servicios de sector salud dentro del Estado de Hidalgo. De estos el 67% de los entrevistados laboran en el sector público y el resto pertenece a sistemas privados.

Los médicos entrevistados expresaron una clara preferencia por la adopción de tecnología de inhibición de microorganismos mediante luz UV-C, ya que consideran que esto simplificaría sus tareas diarias (Figura 3). Esta actitud se encuentra respaldada por diversas fuentes, como el estudio de Morio *et al.* (2022), donde, impulsados por los avances en tecnología de desinfección, investigaron que el uso de lámparas LED UV-C en el tratamiento de conductos radiculares podría complementar los métodos actuales de desinfección para erradicar microorganismos y fomentar la curación dental.

Esta sección puede estar dividida en subsecciones. Debe presentar una descripción concisa y precisa de los resultados experimentales, su interpretación, así como las conclusiones experimentales que pueden obtenerse.

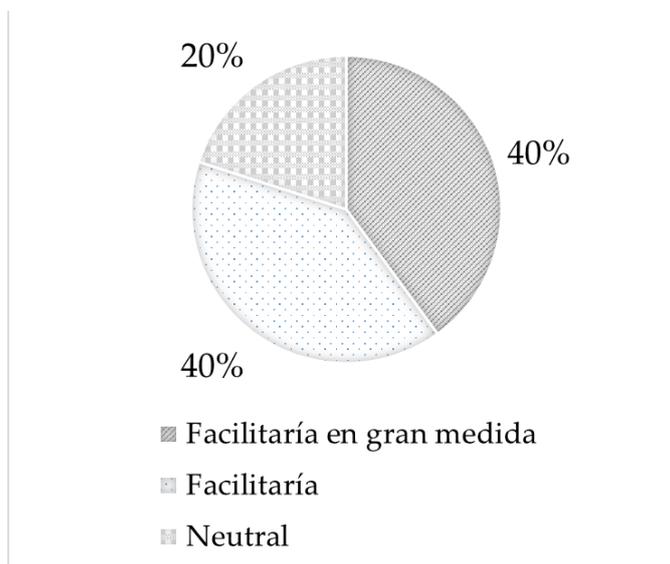


Figura 3. Opinión acerca de cuanto facilitarían la introducción de un sistema de emisión de radiación ultravioleta en el ámbito de la salud.

Según la actitud positiva mostrada por los encuestados, existe un nivel significativo de disposición para invertir en el sistema de desinfección (Figura 4). Este enfoque se encuentra respaldado por investigaciones como la de Sottani *et al.* (2023), quienes han evaluado la eficacia de la combinación de luz UV-C y ozono para la desinfección de espacios. Sus conclusiones indican que la efectividad del ozono, cuando se combina de manera sinérgica con la desinfección del aire mediante UV-C, demuestra que este proceso oxidativo reduce la concentración de patógenos comunes, logrando una disminución de 2 log 10 en la presencia de patógenos.

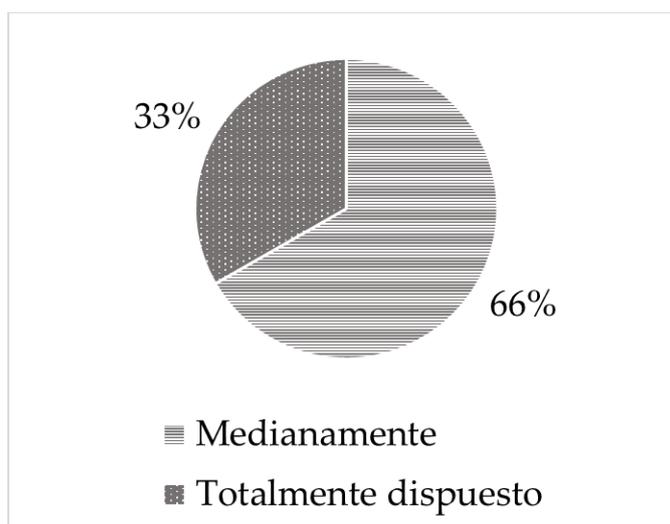


Figura 4. Disposición de inversión hacia un sistema de desinfección de espacios con luz UV-C.

Finalmente, en cuanto a los resultados de las encuestas, se identificaron factores considerados de mayor importancia para la implementación de la tecnología de inhibición de microorganismos mediante luz UV-C, tales como el costo, la seguridad y la efectividad (Figura 5). Este enfoque es comprensible, ya que investigaciones como la de Sun *et al.* (2022) señalan que, con el rápido avance de la desinfección UV, la fiabilidad de la desinfección se ha vuelto una preocupación crucial. Además, se ha observado que la luz UV-C puede degradar ciertos materiales, como lo han documentado Kuyyakanont e Iwata (2024), en relación con ciertos tipos de polímeros. Por eso, se ha hecho un estudio sobre varios parámetros de emisión para desactivar microorganismos, evitando exposiciones prolongadas.

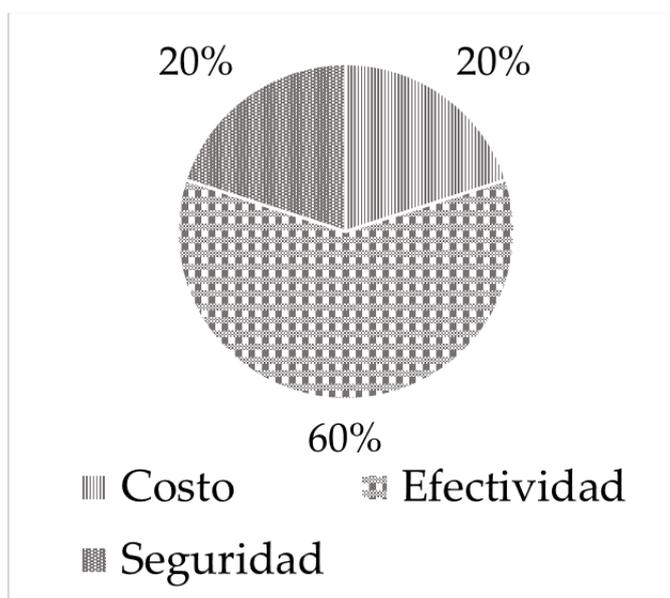


Figura 5. Factores de importancia para el personal interesado en la inversión del sistema de inhibición de microorganismos con luz UV-C.

3.2 Estudio de parámetros de inactivación de patógenos con luz ultravioleta

Según los hallazgos recopilados por Pereira *et al.* (2023), se presenta un resumen que abarca los tipos de exposición para microorganismos, así como la disminución observada en sus comunidades microbianas según el tipo específico de luz UV-C utilizada.

Tipo de patógenos	Nombre	Características de la lámpara UVC	Tiempo de exposición	Efecto
Bacterias	<i>S. aureus</i>	6 mJ/ cm2	N / A	4 reducción logarítmica
		23 mJ/ cm2	8 horas	98,4 % de reducción
	<i>L. monocytogenes</i>	0,29 mW/ cm2		Peroxidación lipídica
				Disminución de la actividad deshidrogenasa de la cadena respiratoria
	<i>S. enterica serovar Typhimurium</i>			Daño a la membrana celular
	<i>E. coli O157:H7</i>	20 vatios; 0,29 mW/ cm2		Daño al ADN
				Reducción de 5 log
		75 mJ/ cm2		2,81 reducción logarítmica
	<i>P. aeruginosa</i>	24 mJ/ cm2		4 reducción logarítmica
	<i>C. esporogenes</i>	36 mJ/ cm2	N / A	Reducción de registros al límite indetectable
<i>E. coli</i>			Tasa de inactivación valor Z constante: 4,9 cm 2 /mJ	
<i>P. alcaligenes</i>		N / A	Tasa de inactivación valor Z constante: 7,5 cm 2 /mJ	
<i>marcescens</i>			Tasa de inactivación valor Z constante: 3,3 cm 2 /mJ	
<i>S. epidermidis</i>			Tasa de inactivación valor Z constante: 6,3 cm 2 /mJ	
Esporas	<i>Esporas de B. subtilis</i>	21,6 mJ/ cm2		2 reducción logarítmica
	<i>Esporas de A. niger</i>	500 mJ/ cm2		
	<i>T. esporas rojas</i>	72 mJ/ cm2		Reducción de registros al límite indetectable
	<i>Endosporas de B. cereus, C. sporogenes y C. difficile</i>	96 mJ/ cm2		
Hongos	<i>C. albicans</i>	72 mJ/ cm2	N / A	
Virus	Coronavirus humanos en aerosol (alfa HCoV-229E y beta HCoV-OC43)	1,7 y 1,2 mJ/ cm2		99,9 % de reducción
			8 minutos	90 % de reducción viral
		3 mJ/ cm2	25 minutos	99,9 % de reducción viral (aerosoles)
	Gripe A (H1N1)	1,28 mJ/ cm2		90 % de reducción
		2 mJ/ cm2 ; 120 μW/ cm2	N / A	1.3 reducción logarítmica
		6 mJ/ cm2		Reducción de registros al límite indetectable
		0,1 mW/ cm2	10 segundos	88,5 % de reducción
		3 mJ/ cm2	30 segundos	99,7 % de reducción
		280 μJ/ cm2	40 segundos	<2 reducción logarítmica
	SARS-CoV-2	Constantes de tasa de inactivación: 1,52 -1,42 cm 2 /mJ		N / A
Constante de tasa de inactivación: 0,64 cm 2 /mJ; dosis 8 mJ/cm2		N / A	99,99 % de reducción	
	2417,7 mJ/ cm2		99,99 % de reducción	

Bacteriófago P22

N / A

Tasa de inactivación valor Z
constante: 3 cm² /mJ**Tabla 1.** Parámetros de exposición para inhibición de diferentes microorganismos.

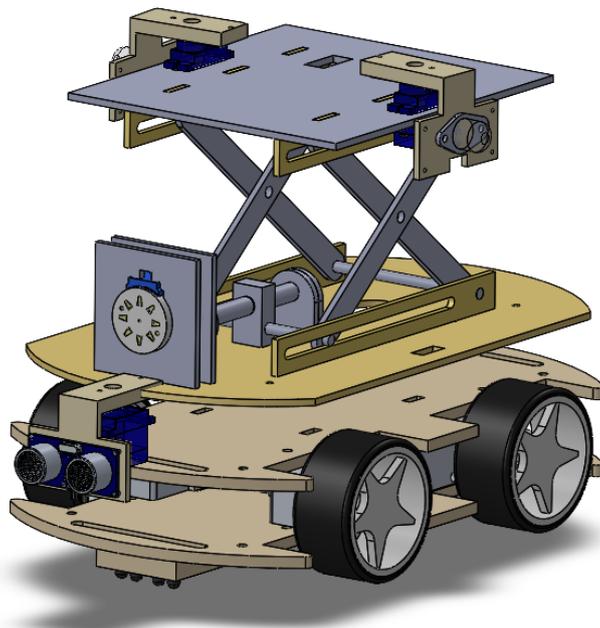
En la Tabla 1 se observa que la potencia de la lámpara y el tiempo de exposición varían según el tipo de microorganismo. Algunos patógenos pueden requerir breves periodos de exposición, en el orden de segundos, mientras que otros pueden necesitar ser expuestos durante horas.

3.3 Diseño de sistema de desplazamiento y control de emisividad de luz ultravioleta

En la Figura 6 se ilustra el diseño del modelo a escala generado para el control y direccionamiento de la radiación ultravioleta obsérvese que cuenta con sensores en la parte inferior que le permiten seguir una trayectoria estipulada de manera similar a un seguidor de línea, ello evita que el robot colisione con elementos, ya que el usuario puede colocar el mapa que debe seguir el dispositivo, aunque en caso de que alguna persona o elemento se coloque cerca, este puede evitarlo gracias al sensor ultrasónico que incorpora.

Otra de las características destacables es que incorpora un mecanismo de elevación de tijera controlado por un motor a pasos que le permite plegarse para ingresar en áreas estrechas de baja altura, además de que almacenarlo requiere menor espacio.

Para tener una mayor cobertura en la emisión de rayos UV-C, se incorporó motores que le permiten cubrir un espacio de 180° a la redonda en cada uno de sus lados, y dependiendo las necesidades se puede añadir más lámparas.

**Figura 6.** Prototipo del sistema de control para emisión de luz ultravioleta.

Este prototipo también se construyó físicamente (Figura 7) añadiendo detalles adicionales para probar el mecanismo planteado mediante una maqueta a escala de un cuarto de hospital.

6.4 Elaboración de modelo de campo

En la Figura 7, se presenta el modelo a escala de la habitación de hospital construida con elementos esenciales de este tipo de habitaciones: cama hospitalaria, silla, sofá y gaveta de almacenamiento.



Figura 7. Modelo a escala de habitación convencional de hospital privada construida.

3.5 Prueba de irradiación de espacios

Como parte de las pruebas de irradiación, se llevó a cabo la medición y análisis de la forma del haz de luz proyectado por las lámparas, evaluando diferentes configuraciones mediante la forma del haz de luz proyectado sobre una hoja blanca tamaño carta.

En las pruebas, se observó el comportamiento del haz de luz con el cono protector que incluían las lámparas de fábrica sobrepuestas en la placa que se eleva con el mecanismo (Figura 8). Posteriormente se retiró el lente protector, para analizar cómo afectaría este cambio a la forma de onda de la luz y su alcance. Para terminar, se añadió un cono de aluminio alrededor de los diodos emisores UV-C, con la intención de evaluar si esta modificación podría mejorar la proyección y dispersión del haz luminoso.



Figura 8. Modelo de lámparas UV-C empleadas.

Con el lente protector integrado, las lámparas presentaban dispersión del haz de luz. Como se aprecia en la Figura 9, el patrón consistía en un círculo central iluminado, seguido de una franja vacía y finalmente, un tenue aro exterior. Esta configuración, con espacios sin cobertura, motivó el análisis de otros métodos de dispersión. Resultaba evidente que, de haberse implementado este mecanismo, se habrían dejado zonas sin irradiar, afectando la eficacia de la desinfección.

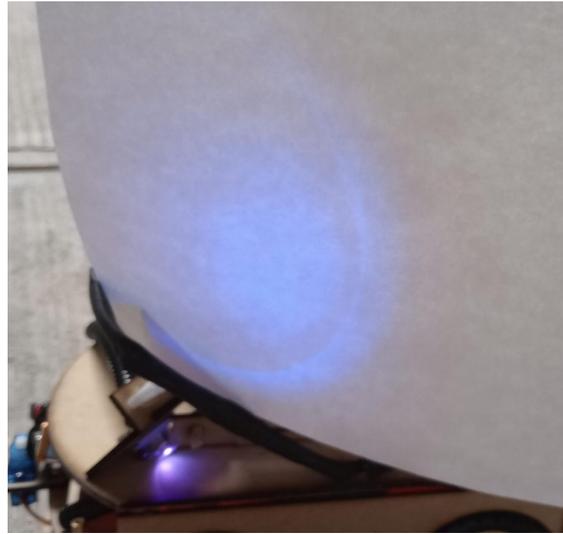


Figura 9. Proyección de haz de luz de las lámparas UV-C con lente protector de fábrica.

Al retirar el lente protector de las lámparas, se consiguió un haz de luz más uniforme, pero con un alcance y diámetro reducidos (Figura 10). Esta configuración podría haber sido una opción para considerar en el montaje del robot, pero tendría la desventaja de un alcance efectivo inferior a 5 cm de radio a la redonda para cada lámpara.

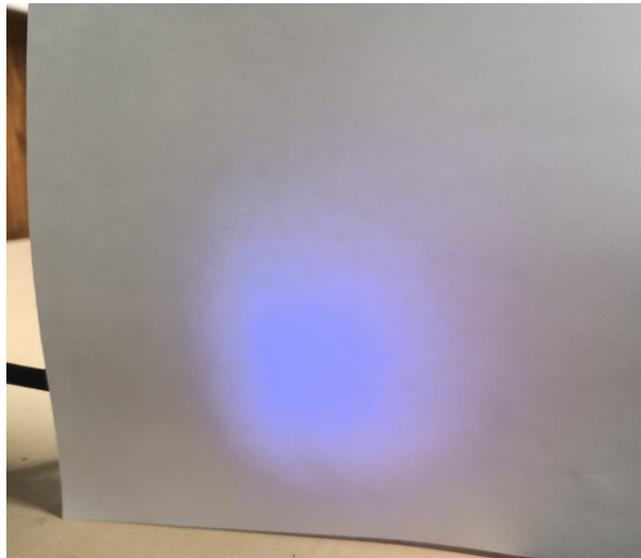


Figura 10. Proyección de haz de luz de las lámparas UV-C sin lente protector.

Al añadir el cono reflector de aluminio a las lámparas sin el lente, se obtuvo una proyección de luz más uniforme y con mayor alcance que en la prueba anterior (Figura 11). Sin embargo, este método presentaba un posible inconveniente: el diámetro exterior del cono reflectante debía ser lo suficientemente amplio para aumentar la zona de proyección. No obstante, si el cono era demasiado ancho, la luz se dispersaba en gran medida, lo que reducía la eficacia del mecanismo. Por el contrario, al utilizar un cono de menor diámetro, si bien se lograba un mayor alcance, el diámetro del haz luminoso resultaba más reducido.

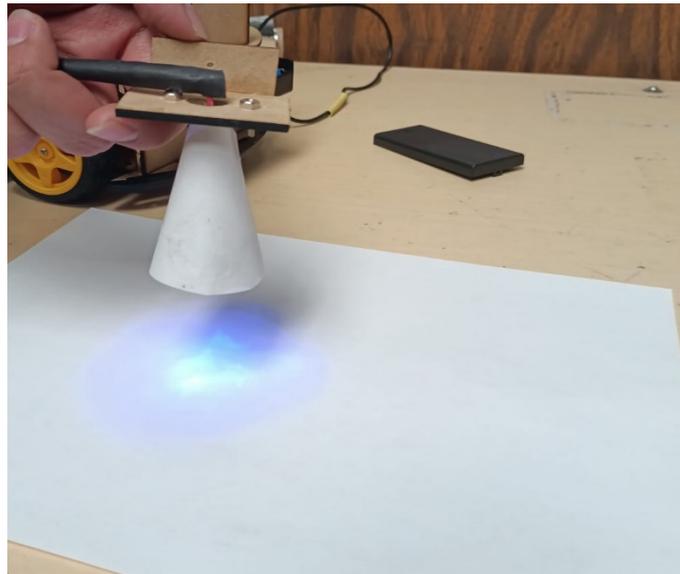


Figura 11. Proyección de haz de luz de las lámparas UV-C sin lente protector.

Las dimensiones del cono empleado para las pruebas y que después se integró a las lámparas UV-C del dispositivo se presentan en la Figura 12.

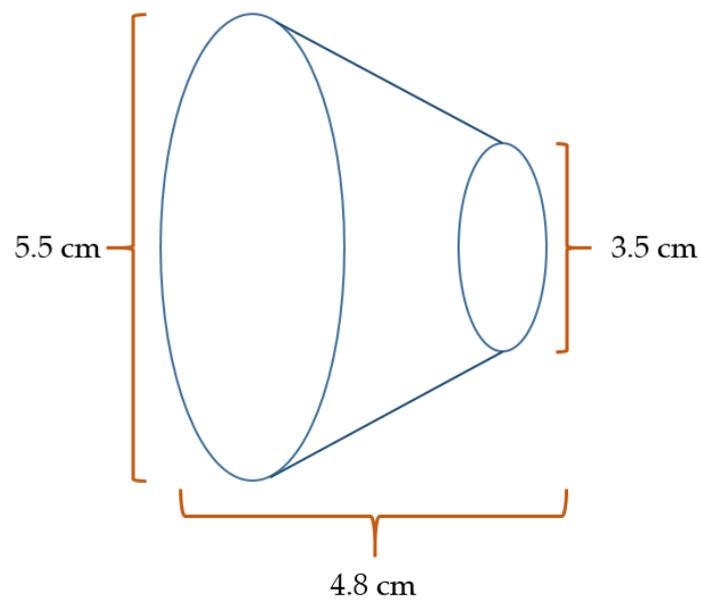


Figura 12. Dimensiones del cono reflector de aluminio empleado en las pruebas e integrado al dispositivo móvil.

Asimismo, la Figura 13 muestra cómo se realizaron las pruebas. En esta figura, se detallan las variables de estudio y cómo se recolectó datos relacionados con el haz de luz proyectado.

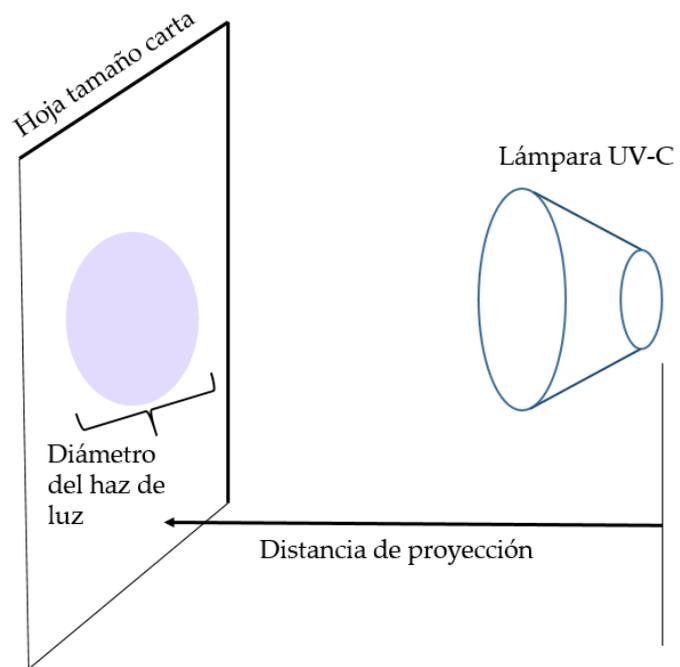


Figura 13. Mecanismo de pruebas con el haz de luz proyectado por las lámparas. Se detallan el tipo de cono y las variables de estudio consideradas en la recolección de datos.

En la Tabla 2 se presenta la distancia de proyección y el diámetro del haz de luz obtenido en las pruebas. En cada caso la distancia máxima de proyección se presenta en la segunda imagen.

Modo de emisión de lámpara	Distancia de proyección	Diámetro del haz de luz	Fotografía
Con lente	3.8 cm	9 cm	

	5 cm	13 cm	
	3 cm	5 cm	
Sin lente	6 cm	10 cm	
Cono de aluminio	7 cm	8 cm	

10 cm 12 cm



Tabla 2. Resultados de análisis de proyección y forma de onda de las lámparas UV-C.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en las pruebas de proyección del haz de luz, se optó por emplear el cono de aluminio como solución. Adicionalmente, mediante programación, se implementó un mayor tiempo entre cada desplazamiento de las lámparas en su movimiento de 30 a 160 grados. Inicialmente, se contempló que la secuencia de movimiento del robot fuera como se presenta en la Figura 14. No obstante, en último momento, se decidió realizar 2 vueltas completas con los servomotores que integran las lámparas UV-C, es decir, se programó que antes de avanzar, el robot movería los servomotores de 30 a 160 grados y de 160 a 30 grados de radio a la redonda, repitiendo este ciclo 2 veces. Estas modificaciones buscaban optimizar la cobertura y uniformidad de la irradiación UV-C en el área a desinfectar.

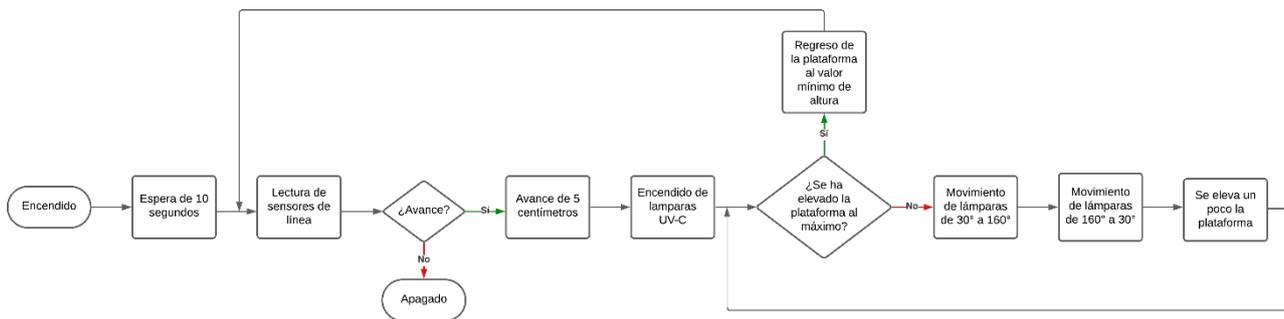


Figura 14. Diagrama de bloques de la programación del sistema de control UV.

Para determinar el movimiento de las lámparas, también se calculó el tiempo entre cada desplazamiento de los servomotores. El objetivo era reducir las poblaciones de virus presentadas en la Tabla 1. Para ello, se tomó como referencia el flujo luminoso de 4 mW de las lámparas empleadas y se estableció un área de irradiación de 8 cm de diámetro. La meta era emitir al menos 10 mJ/cm² utilizando la fórmula (1).

$$\text{Tiempo de exposición (s)} = \frac{\text{Dosis deseada (mJ/cm}^2\text{)} * \text{Área de irradiación (cm}^2\text{)}}{\text{Potencia de la lámpara (mW ó mJ/s)}} \tag{1}$$

Después de despejar los datos (2), se obtuvo como resultado que el tiempo mínimo de exposición es de al menos 126 segundos para conseguir la dosis necesaria para afectar a los virus y algunas bacterias registradas en la Tabla 1. Este dato se consideró en la programación del equipo como la variable t_serv (Apéndice C).

$$\text{Tiempo de exposición mínimo (s)} = \frac{10 \text{ (mJ/cm}^2\text{)} * ((8/2)^2) * 3.1416 \text{ (cm}^2\text{)}}{4 \text{ (mW)}} = 125.664 \text{ s} \tag{2}$$

Con los datos de tiempo de exposición y forma de haz de luz se determinó el área de cobertura que el equipo podría alcanzar junto con el mecanismo de elevación de tijera que

incluía el robot móvil. Se comprobó que el alcance de elevación del equipo tiene un rango de 15 cm que, aunado a la forma de las lámparas y el radio de irradiación de 8 cm de proyección sobre la superficie, podría conseguir un área de iluminación efectiva de 23 cm x 8 cm con las lámparas en posición estática (Figura 15).

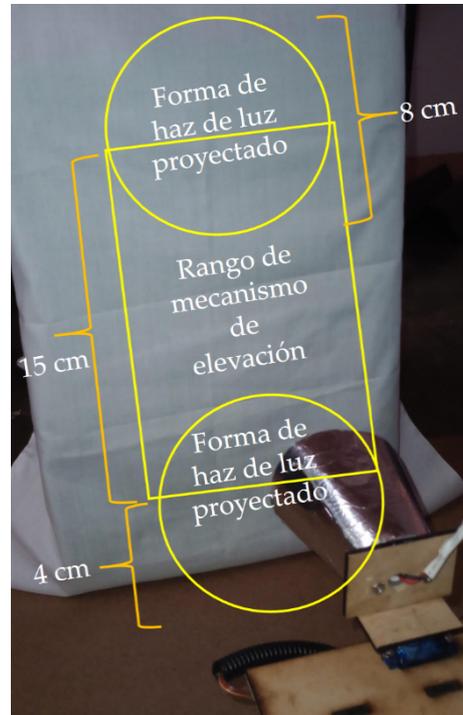


Figura 15. Rango de alcance de irradiación del dispositivo a una distancia de 7 cm entre objetivo a desinfectar y la lámpara UV-C.

Tras determinar el tiempo de exposición y la distancia a la que deberían encontrarse los objetos del robot para conseguir la dosis mínima de irradiación, se generó pruebas para determinar su desempeño en campo, para ello se montó un escenario de la forma de la habitación como se presenta en la Figura 16. Como referencia se encuentran dos monedas de 5 pesos sobre la silla y la cama de la maqueta.



Figura 16. Disposición de la maqueta en pruebas de campo con el robot móvil.

En las pruebas se observó que el haz de luz podía irradiar las superficies con mayor alcance al esperado. En la Figura 17 se aprecia el haz de luz UV-C en un tono azulado y, como referencia, el respaldo del sillón estaba a 26 cm de distancia del led de la lámpara.



Figura 17. Irradiación observada sobre los muebles de la habitación en las pruebas de campo.

En la Figura 18 se observa un acercamiento de la irradiación proyectada sobre el sillón y la cama de la maqueta. En esta imagen, se aprecia claramente la forma del haz de luz que se proyecta sobre los muebles. Es notable que el alcance del haz consigue iluminar a una distancia no menor de 26 cm de radio a la redonda de la lámpara UV-C.



Figura 18. Acercamiento a dos zonas de irradiación apreciadas en la prueba de campo.

5. Conclusiones

A través de las pruebas y análisis realizados en este proyecto, se ha logrado desarrollar un sistema robótico de desinfección basado en la tecnología de iluminación UV-C.

Tras evaluar diferentes configuraciones ópticas, se determinó que la solución más efectiva consistía en el uso de lámparas con conos reflectores de aluminio, los cuales permitían obtener una proyección de luz más uniforme y con un mayor alcance.

Asimismo, los ajustes en la programación del sistema de control, como el incremento en el tiempo entre desplazamientos de las lámparas y la implementación de múltiples ciclos de rotación, contribuyeron a optimizar aún más la cobertura y eficacia de la irradiación UV-C.

Aunque existen algunos desafíos como la necesidad de mejorar la infraestructura para realizar pruebas con microorganismos, los resultados resaltan el gran potencial de este enfoque para fortalecer la seguridad y salud del personal de limpieza en entornos médicos. Además, esta solución podría tener un impacto más amplio en la sociedad al ayudar a prevenir la propagación de enfermedades infecciosas.

Futuros trabajos de investigación, enfocados en la integración de mecanismos complementarios a la desinfección UV-C, permitirán seguir avanzando hacia sistemas cada vez más robustos y eficaces en la desactivación de agentes patógenos.

Contribución: Encuestas, J.I.B.M., R.L.G., A.J.U.C.; investigación, J.I.B.M., R.L.G., A.J.U.C.; diseño del sistema, A.J.U.C.; Revisión y armado de prototipo, J.I.B.M., R.L.G., A.J.U.C.; escritura-revisión y edición, J.I.B.M., R.L.G., A.J.U.C.

Financiamiento: Esta investigación no recibió financiamiento externo.

Conflicto de interés: Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Referencias

- Calderón Vicente, D. M. a, Marco Martínez, A., Gómez García, I., Quílez Toboso, R., Quiroga López, I., Delgado Rey, M., Gargallo Vaamonde, J., Olmos Alemán, M., Miralles Moragrega, R., Gonzalvo Díaz, C., González López, J. (2024). Efectos de la pandemia por COVID-19 sobre la diabetes gestacional en Castilla-La Mancha (España). *Endocrinología, Diabetes y Nutrición*, 71(2), 53–60. <https://doi.org/10.1016/j.endinu.2023.12.004>
- Yamanaga, S., Shimata, K., Ohfuji, S., Yoshikawa, M., Natori, Y., Hibi, T., Yuzawa, K., Egawa, H. (2024). Excess mortality in COVID-19-affected solid organ transplant recipients across the pandemic. *American Journal of Transplantation*. <https://doi.org/10.1016/j.ajt.2024.03.016>
- Rucci, J. M., Law, A. C., Bolesta, S., Quinn, E. K., Garcia, M. A., Gajic, O., Boman, K., Yus, S., Goodspeed, V. M., Kumar, V., Kashyap, R., Walkey, A. J., Mesland, J.-B., Henin, P., Petre, H., Buelens, I., Gerard, A.-C., Markotić, D., Bošnjak, I., ... Mendoza, R. (2024). Variation in Sedative and Analgesic Use During the COVID-19 Pandemic and Associated Outcomes. *CHEST Critical Care*, 2(1), 100047. <https://doi.org/10.1016/j.chstcc.2024.100047>
- Mundle, K., Yu, B., & Malvankar-Mehta, M. S. (2024). Impact of the pandemic on clinical management of glaucoma. *JFO Open Ophthalmology*, 5, 100080. <https://doi.org/10.1016/j.jfop.2024.100080>
- Wild, C. E. K., Wells, H., Coetzee, N., Grant, C. C., Sullivan, T. A., Derraik, J. G. B., & Anderson, Y. C. (2023). End-user acceptability of personal protective equipment disinfection for potential reuse: a survey of health-care workers in Aotearoa New Zealand. *The Lancet Planetary Health*, 7(2), e118–e127. [https://doi.org/10.1016/s2542-5196\(22\)00333-3](https://doi.org/10.1016/s2542-5196(22)00333-3)
- Karan, A.; Klompas, M.; Tucker, R.; Baker, M.; Vaidya, V.; Rhee, C. El riesgo de transmisión del síndrome respiratorio agudo grave por coronavirus (SARS-CoV-2) de pacientes con enfermedad por coronavirus 2019 (COVID-19) no diagnosticada a compañeros de habitación en un gran centro médico académico. *Academic Medical Center. Clin. Infect. Dis.* 2022, 74, 1097-110.
- Amodio, E., Kuster, S. P., Garzoni, C., Zinkernagel, A. S., Sax, H., & Wolfensberger, A. (2020). Disinfecting noncritical medical equipment—Effectiveness of hydrogen peroxide dry mist as an adjunctive method. *American Journal of Infection Control*, 48(8), 897–902. <https://doi.org/10.1016/j.ajic.2020.05.016>
- Xiao, S., Yuan, Z., & Huang, Y. (2022). Disinfectants against SARS-CoV-2: A Review. *Viruses*, 14(8), 1721. <https://doi.org/10.3390/v14081721>
- Tizaoui, C. (2020). Ozone: A Potential Oxidant for COVID-19 Virus (SARS-CoV-2). *Ozone: Science & Engineering*, 42(5), 378–385. <https://doi.org/10.1080/01919512.2020.1795614>
- Sousa, M., Oliveira, I. M., Correia, L., Gomes, I. B., Sousa, C. A., Braga, D. F. O., & Simões, M. (2024). Far-UV-C irradiation promotes synergistic bactericidal action against adhered cells of *Escherichia coli* and *Staphylococcus epidermidis*. *Science of The Total Environment*, 917, 170352. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170352>
- Pereira, A. R., Braga, D. F. O., Vassal, M., Gomes, I. B., Simões, M. (2023). Ultraviolet C irradiation: A promising approach for the disinfection of public spaces? *Science of The Total Environment*, 879, 163007. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163007>

12. Janisiewicz, W., Takeda, F., Evans, B., & Camp, M. (2021). Potential of far ultraviolet (UV) 222 nm light for management of strawberry fungal pathogens. *Crop Protection*, 150, 105791. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2021.105791>
13. Dorbani, I., Berberian, A., Riedel, C., Duport, C., & Carlin, F. (2024). Comparing resistance of bacterial spores and fungal conidia to pulsed light and UVC radiation at a wavelength of 254 nm. *Food Microbiology*, 121, 104518. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2024.104518>
14. Buonanno, M.; Welch, D.; Shuryak, I.; Brenner, D.J. Far-UVC light (222 nm) efficiently and safely inactivates airborne human coronaviruses. *Sci. Rep. Nat.* 2020, 10, 10285.
15. De la Rosa-Zamboni, D., Villa-Guillén, M., Bustos-Hamdan, A., Rosas-Mateos, M. I., Medina-Pelcastre, M., Torres-García, M., Franco-Hernández, M. I., del Carmen Castellanos-Cruz, M., Parra-Ortega, I., Fest-Parra, E., Casillas-Casillas, M. C., & Guerrero-Díaz, A. C. (2024). Effect of UV-C disinfection and copper plating on healthcare-associated infections in a NICU with high ESBL infections. *Enfermedades Infecciosas y Microbiología Clínica*. <https://doi.org/10.1016/j.eimc.2024.02.009>
16. Demeersseman, N., Saegeman, V., Cossey, V., Devriese, H., & Schuermans, A. (2023). Shedding a light on ultraviolet-C technologies in the hospital environment. *Journal of Hospital Infection*, 132, 85–92. <https://doi.org/10.1016/j.jhin.2022.12.009>.
17. Probst-Rüd, S., Nyangaresi, P. O., Adeyeye, A. A., Ackermann, M., Beck, S. E., & McNeill, K. (2024). Synergistic effect of UV-A and UV-C light is traced to UV-induced damage of the transfer RNA. *Water Research*, 252, 121189. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.121189>
18. Fan, Y., Hu, Y., Jiang, L., Liu, Q., Xiong, L., Pan, J., Hu, W., Cui, Y., Chen, T., & Zhang, Q. (2021). Intelligent disinfection robots assist medical institutions in controlling environmental surface disinfection. *Intelligent Medicine*, 1(1), 19–23. <https://doi.org/10.1016/j.imed.2021.05.004>
19. Rodrigo, D. V., Sierra-García, J. E., & Santos, M. (2023). Gladius bio-inspired neural networks based UV-C disinfection path planning improved by preventive deadlock processing algorithm. *Advances in Engineering Software*, 175, 103330. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2022.103330>
20. Gowri, V., Sethuramalingam, P., & Uma, M. (2022). Performance analysis of autonomous UV disinfecting robot (UV bot) using Taguchi method. *Materials Today: Proceedings*, 68, 1980–1987. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.08.227>
21. Rodgers, M., Cremers, S., & Bowles, E. (2023). Description and results of a new method for assessing real-life performance of a UV-C disinfection robot. *Infection Prevention in Practice*, 5(4), 100322. <https://doi.org/10.1016/j.infpip.2023.100322>
22. Morio, K. A., Sternowski, R. H., & Brogden, K. A. (2022). Using ultraviolet (UV) light emitting diodes (LED) to create sterile root canals and to treat endodontic infections. *Current Opinion in Biomedical Engineering*, 23, 100397. <https://doi.org/10.1016/j.cobme.2022.100397>
23. Sottani, C., Favorido Barraza, G., Frigerio, F., Corica, G., Robustelli della Cuna, F. S., Cottica, D., & Grignani, E. (2023). Effectiveness of a combined UV-C and ozone treatment in reducing healthcare-associated infections in hospital facilities. *Journal of Hospital Infection*, 139, 207–216. <https://doi.org/10.1016/j.jhin.2023.06.029>
24. Sun, Z., Li, M., Li, W., & Qiang, Z. (2022). A review of the fluence determination methods for UV reactors: Ensuring the reliability of UV disinfection. *Chemosphere*, 286, 131488. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131488>
25. Kuyyakanont, A., & Iwata, M. (2024). Study of different degradation effects in UV-sensitive polymers using xenon lamp and deuterium lamp to simulate UV irradiation in space environment. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 549, 165267. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2024.165267>