

# Generalidades sobre métodos de desinfección mediante radiación UV

## Overview of Disinfection Methods Using UV Radiation

Juan Carlos AMÉZQUITA-TOVAR <sup>1</sup>  
Luis Armando CARVAJAL-AHUMADA <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Tecnoparque Nodo Bogotá. Servicio Nacional de Aprendizaje SENA. Calle 54 #10-39. Bogotá, Colombia. [t.amezquita.juancarlos@gmail.com](mailto:t.amezquita.juancarlos@gmail.com)

<sup>2</sup> Tecnoparque Nodo Bogotá. Servicio Nacional de Aprendizaje SENA. Calle 54 #10-39. Bogotá, Colombia. [ing.lcarvajal@gmail.com](mailto:ing.lcarvajal@gmail.com)

### Recepción:

24 / nov / 2022

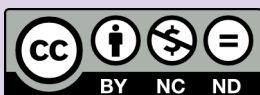
### Aceptado:

05 / oct / 2023

### Citar como (APA):

Amézquita-Tovar, J.C. y Carvajal-Ahumada, L.A.(2022). Generalidades sobre métodos de desinfección mediante radiación UV. Revista RETO, 10(1), p. 9-21. <https://doi.org/10.23850/reto.v10i1.5463>

### Licenciamiento:



## Resumen

La descontaminación por radiación ultravioleta es un método de descontaminación sin contacto que se presenta como una buena alternativa, en tanto que realiza inactivación rápida y eficiente de virus y bacterias, según estudios de hasta un 90% de estos microorganismos desactivados. Cuando las bacterias, protozoos y virus son expuestos a la luz ultravioleta no son capaces de reproducirse, a diferencia de los métodos químicos que se utilizan para la desinfección de aguas, alimentos, superficies o artículos quirúrgicos. Básicamente la luz UV logra desnaturalizar el DNA y RNA que constituye el virus inhabilitando su capacidad de replicación. El presente documento es una revisión de la literatura respecto a las generalidades de los sistemas de desinfección mediante radiación de luz ultra violeta (UV). Igualmente realiza una comparación de este sistema con otros sistemas de desinfección sin contacto como el sistema de vapor de peróxido de hidrogeno en donde se aprecia que los sistemas de desinfección UV tienen menos desventajas que este, no obstante es importante resaltar que los sistemas de desinfección UV deben utilizarse sin presencia de personas o con personal con prendas de seguridad, debido a que la radiación UV-C tiene efectos perjudiciales para la salud cuando se tiene una exposición directa, de acuerdo a la programa nacional de toxicología este tipo de radiación es clasificada como un probable carcinógeno humano.

**Palabras clave:** Descontaminación, ultravioleta, UV, desinfección, microorganismos, irradiación

## Abstract

Ultraviolet Radiation Decontamination is a non-contact decontamination method that emerges as a viable alternative, as it achieves rapid y efficient inactivation of viruses y bacteria, according to studies showing up to 90% deactivation of these microorganisms. When bacteria, protozoa, y viruses are exposed to ultraviolet light, they lose their ability to reproduce, unlike chemical methods used for disinfecting water, food, surfaces, or surgical items. Essentially, UV light denatures the DNA y RNA that make up the virus, disabling its replication capability. This document provides a literature review on the basics of disinfection systems using ultraviolet (UV) light. It also compares this system with other non-contact disinfection methods, such as the hydrogen peroxide vapor system, revealing that UV disinfection systems have fewer disadvantages. However, it is important to highlight that UV disinfection systems should be used without the presence of people or with personnel wearing safety garments, as UV-C radiation has harmful effects on health with direct exposure. According to the National Toxicology Program, this type of radiation is classified as a probable human carcinogen.

**Keywords:** Decontamination, Ultraviolet, UV, Disinfection, Microorganisms, Irradiation

## Introducción

La desinfección ambiental, hoy en día, es una batalla en curso para reducir el riesgo de infecciones asociadas a la atención médica. La evidencia que demuestra la contaminación persistente de las superficies ambientales a pesar de los métodos tradicionales de limpieza y desinfección ha llevado a la aceptación generalizada de que existe la necesidad de reevaluar los protocolos de limpieza tradicionales y de utilizar tecnologías de desinfección secundaria (Spencer et al., 2017).

Parte de las causas de que hasta la mitad de la contaminación biológica resista los métodos de limpieza tradicionales es la capacidad de muchos patógenos para sobrevivir durante largos períodos de tiempo en superficies inertes además de la falta de disciplina con la implementación de los protocolos de limpieza en algunas instituciones. Las preocupaciones sobre el cumplimiento deficiente del personal con los protocolos de limpieza y el reconocimiento de que los agentes patógenos pueden propagarse por otros medios que no sean el contacto directo, incluso a través de la difusión aérea, han puesto de relieve la necesidad de complementar los métodos de limpieza manual.

Estudios científicos han demostrado que hasta el 50% de las superficies permanecen contaminadas con agentes patógenos, incluidos los organismos resistentes a múltiples fármacos como *Staphylococcus aureus* resistente a la meticilina (MRSA) y Enterococos resistentes a vancomicina (VRE) a pesar de los esfuerzos de limpieza tradicionales. (Kim, Kim y Kang, 2017; Bentancor y Vidal, 2018).

Además, se evidencia en estos estudios que hay múltiples lugares para estos patógenos dentro del entorno de atención médica, desde monitores portátiles hasta llaves de paso intravenosas, que no se desinfectan adecuadamente incluso con protocolos mejorados de limpieza manual.

Con base en esta problemática, este trabajo tiene como objetivo realizar una revisión de los sistemas de desinfección mediante radiación UV identificando su forma de funcionamiento, los diferentes tipos de sistemas UV existentes y los pros y contras que tienen estos sistemas.

## Métodos de descontaminación y desinfección “sin contacto”

Dentro de los métodos de descontaminación y desinfección no manuales, se encuentran principalmente los que utilizando peróxido de hidrógeno y los de radiación UV. En el presente documento se exponen las dos técnicas y se realiza una comparativa entre ellas para poder elegir la mejor a implementar.

### Descontaminación mediante sistemas de peróxido de hidrógeno

El Peróxido de hidrógeno (HP) puede ser aplicado como vapor de (HP) o niebla seca en aerosol HP. HP se utiliza como técnica de desinfección debido a su capacidad para descontaminar superficies ambientales, objetos en habitaciones de hospital y suministros médicos no utilizados (Rutala y Weber, 2019). El vapor HP se ha utilizado cada vez más para la descontaminación de salas en la atención médica. Algunos estudios indican que los sistemas HP son un método altamente eficaz para erradicar diversos patógenos de portadores, habitaciones, muebles y equipos inoculados de acuerdo con el trabajo realizado por (p. Ej., MRSA, M. tuberculosis, Serratia, esporas de *C. difficile*, esporas de *Clostridium botulinum*). En otro estudio, se indica que los desinfectantes de superficie basados en HP han demostrado ser más efectivos (> reducción de 6 log<sub>10</sub>) y microbicidas de fijación (30-60 segundos) en presencia de una carga de suelo (para simular la presencia de fluidos corporales) (Rutala y Weber, 2013).

### Luz UV para descontaminación de ambientes

La luz ultravioleta (UV) es una luz que el ojo humano no la puede detectar, la cual se divide en tres tipos de menor a mayor intensidad: UV-A, UV-B y UV-C. Los rayos UV-C se utilizan en los mecanismos de desinfección, ya que puede sustituir el ADN en los microorganismos. En efecto cuando las bacterias, los protozoos y los virus se exponen a las determinadas longitudes de onda de esta luz ultravioleta quedan inactivos. Por ese motivo, desde hace años se aprovechan tales propiedades espermicidas para la desinfección del agua, el aire, alimentos y diversas superficies.

Esta irradiación germicida ultravioleta (UVGI) basada en la tecnología de generación de radiación UV-C se ha utilizado para “depurar” el aire en instalaciones y laboratorios de atención médica durante muchas décadas. Se sabe que UVGI es eficaz en diversos grados para controlar la circulación de partículas infecciosas en el aire y sobre superficies (Memarzadeh, Olmsted y Bartley, 2010).

La radiación UV se utiliza para el control de microorganismos patógenos en una variedad de aplicaciones, como el control de la legionela, así como la desinfección del aire, las superficies y los instrumentos. A ciertas longitudes de onda, la luz ultravioleta romperá los enlaces moleculares en el ADN, destruyendo así el organismo. UV-C tiene un rango de longitudes de onda característico de 200-280 nm, que se encuentra en la porción activa germicida del espectro electromagnético de 200-320 nm. La exposición a la luz ultravioleta a esta longitud de onda es un método práctico y rentable para inactivar virus, micoplasmas, bacterias y hongos en el aire en superficies limpias (Memarzadeh, Olmsted y Bartley, 2010).

Hay que tener en cuenta que este método con luz ultravioleta no añade componente químico alguno, un detalle especialmente importante al desinfectar el agua o los alimentos. Además, tampoco necesita ser procesado, por lo que destaca por poseer ciertas ventajas frente a otros sistemas de desinfección como los sistemas que utilizan químicos para la desinfección de las superficies.

El trabajo de (Luis Rossel, 2020) muestra los efectos de utilizar radiación UV-C para tratar el agua en busca de eliminar bacterias coliformes, demostrando que este es un método eficiente para tal fin cuando se expone el agua por un tiempo de cinco segundos a la radiación.

La eficacia de la radiación UV depende de muchos parámetros, como la concentración biológica, la distancia con el dispositivo UV, el tipo de patógeno, la dosis UV, el tiempo de exposición, la colocación de la lámpara, la línea de visión directa o indirecta desde el dispositivo, el tamaño y la forma de la habitación, la intensidad, reflexión y patrones de movimiento del aire (Rutala y Weber, 2019).

Los niveles de exposición de radiación UV dependen también del medio u objeto que se pretende desinfectar como lo expone (Correa et al., 2020), en medios líquidos la irradiación se produce dentro de los 15 cm, por lo cual se requieren niveles de UV más altos, para este medio los niveles son diez veces más altos que lo utilizados para realizar desinfección en el aire. Por otra parte (Elio Pietrobon Tarrán, 2002) resumen en los siguientes factores que afectan una desinfección eficaz con luz UV en el agua y que también algunos pueden ser extrapolados a otros ambientes, calidad del agua, transmisión de la luz UV, sólidos suspendidos, nivel de orgánicos disueltos, dureza total, condición de la lámpara, limpieza del tubo cuarzo, tiempo de uso de la lámpara, tratamiento del agua antes de aplicar luz UV, flujo y diseño del reactor. Las superficies sin importar su tipo son fuente de infección por lo cual es importante aplicar a estos procesos de desinfección, los parámetros principales a considerar en la desinfección de las superficies son la distancia de exposición de la superficie y el tiempo de exposición (Correa et al., 2020).

### **Efecto de UV-C sobre microorganismos**

La luz ultravioleta inactiva los microorganismos, debido a que daña el ácido nucleico de bacterias y virus, lo que limita su capacidad de crecer y multiplicarse cuando se inhala o se recoge en superficies. La función germicida de la luz UV-C es en gran parte el resultado de la formación de dímeros de timina, que inactivan el ADN y el ARN del organismo (Memarzadeh, Olmsted y Bartley, 2010). Se ha demostrado que la irradiación germicida ultravioleta para la desinfección de la superficie es altamente efectiva en la eliminación de patógenos vegetativos, enterobacterias resistentes, bacterias del género *acinetobacter baumannii* resistente a múltiples medicamentos y esporas como *C. difficile*.

Múltiples estudios han demostrado una reducción mayor a  $3 \log_{10}$  (UFC/cm<sup>2</sup>) unidades formadoras de colonias (UFC) por centímetro cuadrado en patógenos clínicamente significativos cuando se probaron sistemas UV-C dentro de una habitación de hospital y estudios in vitro. Otros estudios realizados en un hospital de California (Napolitano, Mahapatra y Tang, 2015), han demostrado una reducción del 34% en el riesgo

en el cuidado médico asociado a infecciones (health care-associated infections -HAI) cuando los sistemas UV-C se integraron en su protocolo de intervenciones ambientales. Los estudios han demostrado repetidamente que la eficacia de los sistemas UV-C disminuye con el aumento de las concentraciones de materia orgánica o proteica (p. Ej., Fluidos corporales, suciedad), lo que subraya la importancia de utilizar la tecnología UV-C como complemento de la limpieza manual (Nerandzic, Fisher y Donskey, 2014; Nerandzic et al., 2015a; Wong et al., 2016).

Todos los virus y casi todas las bacterias (excluidas las esporas) son vulnerables a niveles moderados de exposición a UVGI, pero la magnitud del efecto depende en gran medida de la especie. Los microbios más pequeños que son difíciles de filtrar tienden a ser más susceptibles a los UVGI, mientras que los microbios más grandes, como las esporas, que son más resistentes a los UVGI, tienden a ser más fáciles de filtrar. En consecuencia, algunos sistemas UVGI se instalan junto con una etapa de filtración de alta eficiencia. Este diseño combinado entre filtrado y radiación UV-C puede ser muy efectivo contra agentes biológicos.

En una investigación realizada por Howard et al., (2002), se evidenció que la actividad germicida depende de la mezcla de aire por convección entre la zona superior irradiada de la habitación y las zonas inferiores de atención al paciente. El estudio involucró la instalación de unidades UVGI de la habitación superior y la evaluación del impacto de estas unidades en bacterias cultivables en el aire. Más del 90% de las bacterias detectados fueron desactivadas. La investigación también demostró claramente que el aire de la habitación debe mezclarse para que la UVGI inactive eficazmente los microorganismos. Sin embargo, si ingresa aire caliente, este aire reposará en la parte superior de la habitación mientras que el aire mucho más frío reposará debajo, y la eficacia del sistema UVGI se reduce drásticamente porque los microbios no se mueven hacia arriba para la exposición a la irradiación UV-C de lámparas superiores.

También se debe tener en cuenta que, si la velocidad de ventilación es demasiado alta, las partículas pueden no estar suficientemente expuestas a la radiación UV-C para garantizar

una inactivación completa, o si el sistema de ventilación no proporciona una buena mezcla dentro de la habitación, las partículas en el aire que contienen microbios podrían ni siquiera exponerse a la irradiación UV-C.

Aun cuando la radiación UV-C es eficiente como germicida en microorganismos, en el caso de los virus, un estudio taiwanés encontró que su efectividad depende en gran medida del tipo de ácido nucleico del virus. Los virus con dsRNA o dsDNA son significativamente menos susceptibles a la inactivación con UV en comparación con los virus ssRNA y ssDNA. Para la inactivación del virus en el aire al 90%, la dosis de UVGI fue aproximadamente dos veces mayor para los virus dsRNA y dsDNA que para los virus ssRNA y ssDNA (Tseng y Li, 2005).

Respecto a la susceptibilidad de los microorganismos ante la radiación UV, el factor de susceptibilidad fue más alto para los virus y similar al de las bacterias frágiles, pero trece a veinte veces mayor que el de las bacterias endosporas o esporas de hongos. El factor de susceptibilidad para los virus fue mayor a una humedad relativa (HR) de 55% que a una humedad relativa de 85%, indicando mejor eficiencia a baja humedad, este resultado se podría deber a la adsorción de agua sobre la superficie del virus a mayor humedad, lo que podría proporcionar protección extra contra el daño del ADN o ARN inducido por los rayos UV (Tseng y Li, 2005).

Los factores críticos que afectan la eficacia de UVGI incluyen temperatura, HR y salida de la lámpara. Varios estudios han indicado que la efectividad de los sistemas UVGI de la habitación superior disminuye a medida que aumenta la humedad. Para una eficiencia óptima, la HR debe

controlarse al 60% o menos cuando se instalan los sistemas UVGI de la habitación superior. La temperatura debe mantenerse entre 68°F y 75°F (20°C-24°C).

Para otros agentes infecciosos, como el SARS-CoV y la influenza, el modo de transmisión es por gotas, que no permanecen suspendidas en el aire por largos períodos de tiempo, sino que se caen dentro de un radio promedio de 2 m por una persona que tose o estornuda. Esto hace improbable que se logre una mezcla de aire suficiente para eliminar eficazmente los microbios transmitidos por dichas gotas. Estas partículas nunca alcanzan la zona de desinfección UV si las lámparas están en el techo de la habitación, por lo tanto, se necesita una ubicación alternativa de las lámparas de desinfección (Howard, C, 2002).

### Comparativa entre técnica HP y UV

Tanto los dispositivos UV-C y los sistemas que usan HP tienen sus propias ventajas y desventajas, aunque existe una amplia evidencia de que estos sistemas “sin contacto” pueden reducir la contaminación ambiental con agentes patógenos asociados a la atención médica. Sin embargo, hay varias diferencias importantes entre los dos sistemas. El sistema UV-C ofrece una descontaminación más rápida que reduce el tiempo de inactividad de la habitación antes de que otro paciente pueda ser admitido. Se ha demostrado que los sistemas HP son más efectivos para eliminar los organismos formadores de esporas.

En la Tabla 1 se enumeran las principales ventajas y desventajas de cada técnica (Rutala y Weber, 2013)

Tabla 1

Técnica	Ventajas	Desventajas
Peróxido de hidrógeno	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Actividad biocida (germicida) confirmada contra una amplia gama de agentes patógenos asociados al cuidado de la salud. (funciona mejor en esporas)</li> <li>• Descontamina superficies y equipos.</li> <li>• Es efectivo contra Clostridium difficile.</li> <li>• Es útil para desinfectar equipos y muebles complejos.</li> <li>• No requiere que los muebles y equipos se alejen de las paredes.</li> <li>• HP no tiene residuos y no genera problemas de salud o seguridad (la unidad de aireación convierte HP en oxígeno y agua)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Todos los pacientes y el personal deben ser retirados de la sala antes de la descontaminación.</li> <li>• El sistema de calefacción, ventilación y de aire acondicionado debe estar desactivado para evitar la dilución no deseada de HP durante el uso y las puertas deben cerrarse con espacios sellados con cinta adhesiva.</li> <li>• La descontaminación solo se puede lograr como desinfección terminal (es decir, no se puede usar para la desinfección diaria) ya que se debe vaciar el espacio de las personas.</li> <li>• Los costos de equipo son sustanciales.</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se distribuye de manera uniforme en la sala mediante un sistema de dispersión automatizado.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La descontaminación requiere de 2.5 a 5 horas.</li> <li>• No elimina el polvo y las manchas que son importantes para los pacientes y visitantes.</li> <li>• Se requiere de personal especializado para el manejo del Peróxido de hidrógeno.</li> </ul>
Radiación UV	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Actividad biocida (germicida) confirmada contra una amplia gama de agentes patógenos asociados al cuidado de la salud. (funciona mejor en virus y bacterias de pequeño tamaño)</li> <li>• La descontaminación de la habitación es rápida (15 minutos) para las bacterias vegetativas.</li> <li>• Es eficaz contra Clostridium difficile, aunque requiere una exposición más prolongada (50 minutos).</li> <li>• El sistema HVAC (calefacción, ventilación y aire acondicionado) no necesita ser desactivado y la habitación no necesita ser sellada.</li> <li>• Los rayos UV no contienen residuos y no generan problemas de salud o seguridad.</li> <li>• No hay productos consumibles, por lo que los costos incluyen solo el costo del equipo y tiempo del personal.</li> <li>• Buena distribución en la sala de energía UV a través de un sistema de monitoreo automatizado.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Todos los pacientes y el personal deben ser retirados de la sala antes de la descontaminación.</li> <li>• La descontaminación solo se puede lograr en la desinfección terminal (es decir, no se puede usar para la desinfección diaria) ya que se debe vaciar el espacio de las personas.</li> <li>• Los costos de equipo son sustanciales.</li> <li>• No elimina el polvo y las manchas, lo cual es importante para los pacientes y visitantes.</li> <li>• Parámetros sensibles al uso (p. Ej., Longitud de onda, dosis de UV administrada).</li> <li>• Requiere que el equipo y los muebles se alejen de las paredes.</li> </ul>

Ventajas y desventajas de las técnicas con peróxido de hidrógeno y radiación UV.  
 Nota: Esta tabla muestra las principales ventajas y desventajas de las técnicas utilizadas para desinfección

Con base en la comparación hecha en la Tabla 1, se recomienda diseñar e implementar un sistema de descontaminación y desinfección UV, debido a su menor tiempo biocida efectivo, a que no requiere de consumibles y que tampoco requiere sellar las habitaciones en que se quiera utilizar.

### Consideraciones de la exposición UVGI a la salud humana

De acuerdo con la Asociación Americana de Seguridad Biológica (Burgener, 2006), los efectos biológicos en humanos de la sobreexposición a la radiación UV-C varían con la longitud de onda, la energía de los fotones y la duración de la exposición. En general, los efectos adversos se limitan a la piel y los ojos. El eritema (enrojecimiento de la piel, como en las quemaduras solares) es el efecto cutáneo más comúnmente observado. La exposición crónica a la radiación UV puede acelerar el proceso de envejecimiento de la piel y aumentar el riesgo de cáncer de piel. El Programa Nacional de Toxicología (NTP) clasifica UV-C como un probable carcinógeno humano. La exposición excesiva a la radiación UV-C puede afectar negativamente a los ojos, causando fotoqueratitis y/o conjuntivitis. De

acuerdo con las pautas actuales, no se esperaría que la exposición repetida en o debajo de la pauta actual cause efectos adversos para la salud; Sin embargo, debe enfatizarse que la radiación UV ha sido implicada tanto en el cáncer de piel como en las cataratas en humanos (Memarzadeh, Olmsted y Bartley, 2010).

De acuerdo con lo anterior, es conveniente que los equipos de desinfección UV-C sean controlados a distancia para así evitar la exposición del usuario a la radiación UV, adicional como es expuesto en (Menéndez López, 2021) debería generarse una regulación como la existente a otras radiaciones ionizantes como lo son los rayos X, teniendo en cuenta que, igualmente, es un proceso ionizante de menor energía.

### Tecnología UV

Una forma de clasificar los sistemas emisores de UV-C disponibles comercialmente es por el tipo de lámpara o bombilla:

- Bombillos de mercurio de baja presión en estado estacionario que emiten luz a ~254 nm

Los sistemas de bombillos de mercurio de baja presión suministran radiación en una corriente continua con un sistema que tiene dos configuraciones, vegetativa (12,000 uWs/cm<sup>2</sup>) y esporicida (22,000 uWs/cm<sup>2</sup>), y un sistema que tiene una sola configuración vegetativa o esporicida (46,000 uWs/cm<sup>2</sup>).

- Bombillos de xenón que emiten un espectro de luz (100-280 nm) y espectros visibles (380-700 nm).

Actualmente, hay sistemas con bombillas de xenón que proporcionan pulsos cortos de alta intensidad (2 Hz), en dos ciclos de 5 a 7 minutos, tomando aproximadamente 15-20 minutos para el proceso de desinfección.

Los fabricantes del sistema de xenón pulsado sugieren usar tiempos de desinfección más cortos que la mayoría de los sistemas de mercurio en estado estacionario; sin embargo, un estudio publicado que compara la eficacia de las 2 clases diferentes de lámparas determinó que "PX-UV (UV pulsado) fue menos efectivo que los dispositivos de UV-C continuos. El mismo estudio in vitro concluyó que el vapor de mercurio en estado estacionario de 254 nm redujo aproximadamente el doble que el xenón pulsado las unidades formadoras de colonias de *C. difficile* y MRSA (Nerandzic et al., 2015b).

Ambos tipos de sistemas se pueden operar de forma remota usando dispositivos móviles, pero se deben llevar manualmente a la sala para su operación. Además, casi todos los sistemas tienen software que les permite capturar datos de utilización, incluido el tiempo de tratamiento, el uso de la ubicación y las estadísticas del operador.

El estudio hecho por, Rutala et al se presentan resultados de desinfección de una sala completa mediante un dispositivo UV-C automático y portátil que usa espejos para "rebotar" UVGI alrededor de una habitación para alcanzar todas las superficies, incluyendo aquellos que no están expuestos directamente a la fluencia. Informaron reducciones logarítmicas sustanciales en bacterias vegetativas dentro de los 15 minutos de exposición y en bacterias formadoras de esporas, como *C. difficile*, después de 50 minutos de exposición (Rutala et al., 2010).

También existen sistemas con sensores remotos inalámbricos de medición UV-C, mediante los cuales, el software interpreta los datos de dosis y utilización en tiempo real. La forma en que se determina la dosis final para cada dispositivo varía. Algunos sistemas calculan la dosis que se administra:

$$dosis = Intensidad_{UV-C} \times Tiempo_{Exposición}$$

en función de las dimensiones de la habitación y se establecen en un intervalo cronometrado.

Un estudio comparativo entre equipos con bombillos de mercurio y bombillos de xenón desarrollado en el hospital general de Vancouver durante 2013 y publicado en 2016 en American Journal of Infection Control, se evidenció que la desinfección con UV-C redujo el porcentaje de MRSA de 34.4% a 3.3%, VRE de 29.5% a 4.9%, y *C. difficile* de 31.8% a 0%. La eliminación de patógenos disminuyó en presencia de una carga proteica. Los investigadores concluyeron que "ambos [sistemas de mercurio y de xenón] fueron igualmente exitosos para mejorar la limpieza general de la habitación del paciente como complemento de la limpieza manual en un entorno real" (Wong et al., 2016).

La limpieza de las bombillas UV, tanto de mercurio como de xenón, y su antigüedad deben verificarse periódicamente (aproximadamente cada 6 meses) para garantizar una intensidad de luz UV suficiente para la actividad germicida (UVGI). La intensidad de la luz de longitud de onda germicida disminuye con la edad, y las clasificaciones de bulbo (horas de uso) pueden variar según el fabricante. Esto genera ciertos inconvenientes en la implementación con bombillas tradicionales que pueden ser mitigadas mediante el uso de luz LED.

La eficiencia de los equipos de desinfección UV también está en relación a la intensidad efectiva de la radiación sobre la superficie, particularmente para las áreas sombreadas o áreas que no están en la línea directa de luz. Dada la relación entre la distancia desde el dispositivo y la muerte efectiva, muchos investigadores han aconsejado que los objetos de alto uso, se acerquen al dispositivo antes de la utilización para optimizar la exposición. Existe un sistema patentado de pausa y reposicionamiento que permite reposicionar

la unidad para abordar las partes de la sala más difíciles de alcanzar de una manera efectiva en el tiempo. Otra manera, más simple, de acceder a áreas con sombras o de formas irregulares, puede ser mediante distintas geometrías de aplicadores (Wong et al., 2016).

Adicionalmente, Miller *et al.* informaron una disminución de la efectividad del sistema UVGI cuando las lámparas UV se colocaron en un solo lado de la habitación (Howard, C., 2002). Esto es consistente con los hallazgos de Riley y Permutt, quienes informaron que una distribución más amplia de lámparas UV de baja irradiación fue más eficiente en comparación con el uso de una lámpara UV de alta irradiación ubicada en el centro (Riley y Permutt, 1971). Esto sugiere que los sistemas UVGI deben instalarse para proporcionar la distribución UVGI más uniforme posible. Cuando los espacios son reducidos, las lámparas UV también se pueden colocar dentro de los conductos de suministro o retorno de aire para desinfectar el aire antes de suministrarlo.

La luz que irradia es absorbida por el ADN/ARN de los organismos vivos. Al pasar a través de las paredes celulares de los diferentes patógenos genera diversos daños en sus estructuras moleculares impidiendo su multiplicación. En condiciones normales, la capa de ozono terrestre filtra la luz UVC de origen natural y protege a los seres vivos, entre ellos a los patógenos o microorganismos infecciosos

Se han realizado varios estudios para la utilización de las lámparas con rayos UV, para aprovechar la acción germicida en procesos de esterilización en los sistemas HIVAC, los cuales se utilizan para mejorar la calidad del aire en el interior de los ambientes de los edificios, elimina la carga bacteriana del aire en los procesos de industria alimenticia, hasta controlar la contaminación aerotransportada y virológica en centros de salud.

La generación artificial de la luz UV se lograba antiguamente mediante la utilización de una lámpara de cuarzo que contiene gas de mercurio en su interior. Cuando se genera una corriente eléctrica entre los polos de la lámpara, se produce una ionización provocando que los átomos del gas incrementen sustancialmente su energía; así

mismo el calor producido incrementa la presión del gas y la mayor excitación de electrones haciendo que estos salten y se desplacen en diferentes líneas de longitud de onda, hasta el punto de convertirlos en fotones de luz. Esta energía de fotones que se irradia en forma de luz, es la que actúa como germicida, eliminando microorganismos aerotransportados cuando estos son atravesados por la onda de luz al penetrar en la pared que protege la información genética del microorganismo, dañando así su estructura. (La función de las lámparas UV-C como germicida en instalaciones de HVAC, 2016). En resumen, la Figura 1 muestra la intensidad espectral de diferentes lámparas sobrepuestas a la banda de absorción de DNA.

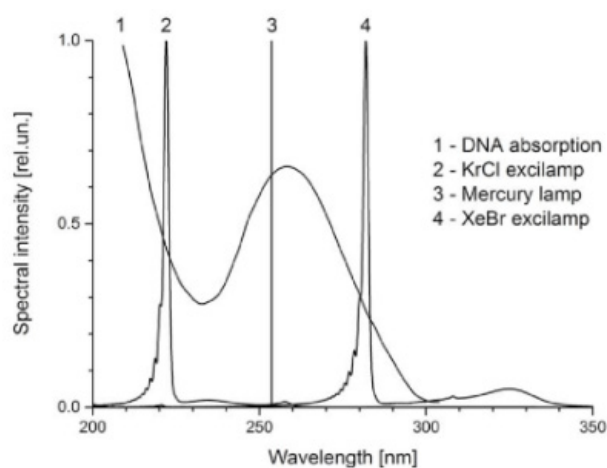


Figura 1. Banda de absorción de DNA y emisiones de distintas lámparas  
Nota: Tomado de Prieto de Castro y Usera, 2020

## Tecnología UV

Tradicionalmente, las lámparas UV de vapor de mercurio de baja presión (LP) se han utilizado para inactivar microorganismos dañinos en entornos industriales. Sin embargo, debido a que las lámparas de LP contienen mercurio, su uso conlleva riesgos considerables para la salud humana y el medio ambiente (Bohrerova *et al.*, 2008; Aoyagi et al., 2011; Kim y Kang, 2017)

Recientemente, se han desarrollado sistemas de desinfección basados en diodos emisores de luz UVC (LED-UVC), que ofrecen potencial como tecnología alternativa al mercurio y al xenón. Los LED UVC no contienen mercurio, lo



que alivia este riesgo, y es posible una radiación máxima rápida con una intensidad constante en un amplio rango de temperatura. La tecnología LED-UVC es económica en relación a las lámparas tradicionales y tiene una vida útil más larga. Además, los módulos UVC-LED se pueden diseñar de tamaños reducidos a diferencia de las tecnologías basadas en mercurio y xenón; esto permite que se puedan incorporar fácilmente en varias formas tanto para ambientes sanitarios como para la industria alimentaria. Aun así, los LED UVC tienen la desventaja de una baja intensidad de irradiación en comparación con las lámparas LP convencionales y a que es tecnología que está actualmente en desarrollo (Andrés, Prieto de Castro y Usera, 2020).

En un estudio realizado por Kim et al., Shin et al., se usaron LED UVC (LG Innotek Co., Seúl, Corea), de 10mW de potencia y que emitían longitudes de onda máximas de 266 o 279 nm y se conectaron a placas de circuitos impresos electrónicos (PCB) para validar el efecto biocida en agua contaminada recirculante. La disposición de los LED fue en las “4 esquinas” del PCB con una distancia de 6 cm entre cada LED y una distancia de 4 cm entre el PCB LED y las superficies de alimentos irradiados. Cada PCB tenía 5 LED y era capaz de generar 50 mW. Finalmente, cada PCB fue ensamblado en forma de caja para generar una radiación total de 200mW. El sistema de LED diseñado requirió de 23 mA para cada PCB de 266 nm de longitud de onda y 20 mA para cada PCB de 279 nm de longitud de onda. Los resultados del estudio mostraron una mayor eficiencia biocida mediante la tecnología LED-UVC que mediante la técnica convencional basada en lámparas de mercurio (Kim y Kang, 2016; Shin et al., 2016).

Dentro de las ventajas de esta tecnología, están su menor precio, la posibilidad de selección de longitudes de onda de emisión, mayor durabilidad, incorporación conveniente en dispositivos de proceso de descontaminación tradicionales y que es una tecnología ambientalmente amigable.

## Tecnología UV pulsada

### Lámparas de xenón pulsadas

El sistema de desinfección con luz ultravioleta (UV) de xenón pulsado utiliza pulsos de alta intensidad para emitir luz UV a frecuencias que cruzan el rango germicida UV (200– 280nm), el rango en el que los microorganismos son susceptibles al daño UV. Las altas frecuencias UV ofrecen diferentes vías de daño a los microorganismos al dañar las paredes celulares y las estructuras celulares e impidiendo la capacidad de replicación de los microorganismos (Green et al., 2017). De acuerdo con Mark Stibich, PhD, MHS, BA, director científico de Xenex (fabricante): “La intensidad del pulso le otorga un par de otras propiedades, por lo que se refleja de manera muy diferente en la habitación que el mercurio UV convencional y causa diferentes tipos de daños a los organismos”. “Penetra en la pared celular de esporas, virus y bacterias, por lo que cualquier cosa con ADN o ARN es susceptible” (Knudson, 2013).

La empresa Xenex Disinfection Services desarrolló un sistema automatizado de desinfección por UV pulsado (Gerz-Zapping Robot) que puede ser considerado una tecnología “verde” debido a que el dispositivo utiliza xenón, un gas noble natural que se considera ecológico.

El Gerz-Zapping Robot es una tecnología con luz de radiación ultravioleta tipo C (UVC) de espectro completo (200-280 nm). Su actuación permite eliminar los organismos infecciosos que quedan en la sala en menos de cinco minutos. “Es muy rápido, eficaz y fácil de usar, siempre y cuando se realice previamente una limpieza manual de las superficies a tratar, para reducir la presencia de polvo y materia orgánica que pueda dificultar la llegada de la luz ultravioleta a todos los puntos de la superficie” explica Usera.

El Gerz-Zapping Robot de Xenex es comparable en tamaño y movilidad a una silla de ruedas. Para poder ser usado, el dispositivo es llevado a una habitación y un usuario lo desbloquea usando una identificación y contraseña en un teclado. Una vez que se presiona el botón de activación, el dispositivo espera 15 segundos para que el usuario salga de la habitación, luego los sensores

de movimiento escanean la habitación durante 15 segundos más, antes de comenzar a pulsar la luz UV. En promedio, cada habitación requiere que el dispositivo haga dos pasadas durante 5-10 minutos en cada pasada. Durante este tiempo, el dispositivo registra los datos de la habitación en uso, cuándo se usa el dispositivo y la dosis UV.



Figura 2. El sistema de desinfección con luz ultravioleta (UV) pulsada de xenón utiliza luz UV de alta energía para dañar las paredes celulares de bacterias, virus y esporas bacterianas. *Nota:* Fuente: (Knudson, 2013)

El equipo de Xenex puede ser usado en múltiples áreas en un centro de atención médica, incluidas habitaciones de pacientes, quirófanos, salas de equipos, salas de emergencia (ER), unidades de cuidados intensivos, áreas compartidas para miembros del personal y áreas públicas.

### Lámparas LED-UV pulsadas

La tecnología LED-UV también tiene la capacidad de activarse y desactivarse con alta frecuencia. Esta característica permite generar irradiación pulsada que no es viable con lámparas de mercurio UV. Aunque las lámparas de xenón convencionales también son capaces de emitir irradiación pulsada, el patrón de pulso es menos controlable y el requerimiento de energía es mucho mayor en comparación con el de los LED UV. Los LED UV ofrecen una gran flexibilidad para el patrón de pulso con varias frecuencias y tasas de trabajo, y tienen un bajo requerimiento de potencia para la operación, lo que brinda un amplio potencial en la aplicación de irradiación pulsada de LED UV.

Los nuevos LED UV de radiación pulsada poseen más opciones en el patrón de pulso, por lo que es razonable suponer que puede producirse un efecto germicida mejorado que puede tener un potencial de ahorro de energía significativo.

Respecto a la eficiencia de la tecnología LED-UV pulsada, algunos estudios iniciales informaron que la eficiencia germicida de la radiación pulsada fue 3.8 y 2.5 veces mayor que la de la radiación continua para la inactivación de *E. coli* por 272 nm y 365 nm, respectivamente (Li et al., 2010; Wengraitis et al., 2013).

Otro estudio mostró que la irradiación pulsada con LED UV de 269 nm es 1,8 veces más eficiente que la irradiación continua para la inactivación de las esporas de *Bacillus globigii* (Tran et al., 2014). Sin embargo, un estudio reciente indicó un rendimiento comparable entre la irradiación pulsada y continua por LED de 405 nm en la inactivación de *Staphylococcus aureus* (Gillespie et al., 2017).

Estas inconsistencias probablemente resultaron de los diferentes métodos de determinación de fluencia UV para irradiación continua y pulsada. La irradiación intermitente por pulsación trae dificultades para la determinación precisa de la fluencia UV y los métodos existentes para la irradiación continua regular pueden no ser directamente aplicables a la irradiación pulsada (Song, Taghipour y Mohseni, 2018).

En el estudio realizado por Kai Song, se realizó una comparativa entre la técnica LED-UV continua y pulsada mediante el diseño y construcción de un sistema electrónica de emisión de luz UV con UV-LED de 265 nm de longitud de onda (Nikkiso Co. Ltd, 10 mW). De acuerdo con los autores, se usaron los de 265 nm debido a que esta longitud de onda está muy cerca del pico de absorción de ADN y, por lo tanto, es más eficiente para la inactivación de la mayoría de los microorganismos (Song, Taghipour y Mohseni, 2018).

En la Figura 3 se muestra un esquemático del dispositivo construido y de la señal de control empleada para el encendido y apagado de la luz UV.

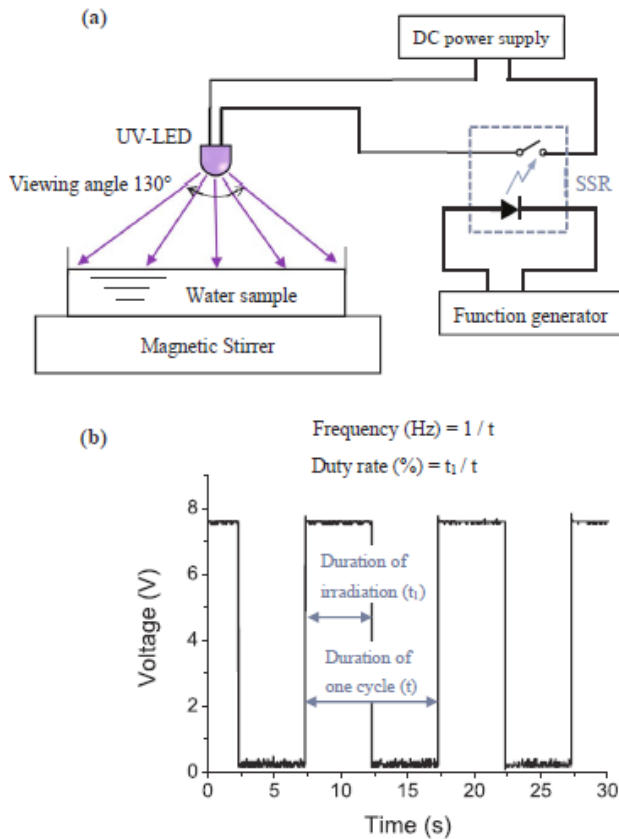


Figura 3. Diagrama esquemático del circuito pulsado de UV-LED y aparato experimental (a); Ilustración de la forma de onda de voltaje para la irradiación pulsada de UV-LED a una frecuencia de 0.1 Hz y una tasa de trabajo del 50% (b). Fuente: (Song, Taghipour y Mohseni, 2018)

De acuerdo con la Figura 3, Los autores colocaron el generador de luz LED-UV en contacto a un disipador de calor con un ventilador para la disipación de calor y se conectó a un termopar para controlar la temperatura (Song, Taghipour y Mohseni, 2018). Esto se debe a que el rendimiento del LED UV es sensible a su temperatura durante el funcionamiento. El LED UV fue ubicado sobre una placa de Petri de vidrio de 9 cm de diámetro con una muestra de agua contaminada de 50 ml para irradiación UV. De acuerdo con los autores, la distancia entre el LED-UV y la superficie del agua era de 2 cm, de modo que la radiación del LED-UV cubría toda la superficie de la placa de Petri. Usaron un agitador magnético para homogeneizar la muestra de agua durante la irradiación UV (Kheyrandish, Mohseni y Taghipour, 2017; Song, Taghipour y Mohseni, 2018).

Adicionalmente, se utilizó una fuente de alimentación de corriente continua (CC) para

controlar el LED UV, ajustada a una corriente de salida constante de 350 mA, tanto para la irradiación continua como pulsada. Para generar irradiación pulsada, se empleó un relé de estado sólido rápido (SSR, Crydom M-ODC5F) para encender y apagar instantáneamente el LED-UV. La frecuencia y la tasa de trabajo fueron ajustadas mediante un generador de funciones, y se utilizó un osciloscopio para medir la forma de onda del voltaje del UVLED.

En este estudio, se evaluaron distintos niveles de frecuencia (0.1, 1, 10, 100, 1 kHz) y ciclo de trabajo (10%, 25%, 50%, 75%, 90%) para determinar la irradiación pulsada, comparándolos con la irradiación continua. La frecuencia representa el número de ciclos de encendido y apagado por segundo, mientras que la tasa de trabajo indica el porcentaje de tiempo de irradiación en un ciclo de encendido y apagado.

De acuerdo con los resultados publicados por los autores del estudio, para inactivación de *E. coli*, se observó que la irradiación continua y pulsada UV-LED de 265 nm indujo una inactivación comparable a varias frecuencias y tasas de trabajo, con la excepción de una tasa de trabajo del 90% y 75% en donde se observó una inactivación ligeramente menor (Song, Taghipour y Mohseni, 2018).

En una segunda prueba, los autores utilizaron colonias coliformes totales en conjunto con *E. coli* en aguas residuales reales para examinar la eficiencia de desinfección de la irradiación pulsada y los efectos de diferentes patrones de pulso con una fluencia UV equivalente. Los resultados revelaron una inactivación comparable tanto para las colonias coliformes totales como para *E. coli* bajo irradiación pulsada con varias frecuencias y tasas de trabajo. El análisis estadístico no mostró diferencias significativas en términos de inactivación entre irradiación continua y pulsada con cada patrón de pulso (Song, Taghipour y Mohseni, 2018).

Finalmente, los autores concluyen que ambos tipos de irradiación, continua y pulsada tienen los mismos efectos biocidas, sin embargo, respecto a la eficiencia térmica, se puede decir que operar UV-LED en irradiación pulsada permite eliminar el disipador de calor de los

dispositivos UV-LED permitiendo diseñarlos más compactos, manteniendo la intensidad de radiación comparable junto con los efectos de inactivación de virus y bacterias. Esto se debe, a que el funcionamiento de LED-UV en modo pulsado proporciona una mejor gestión térmica, lo que lleva a un diseño de reactor más simple y menos complicado y a un mayor tiempo operativo del sistema UV-LED (Song, Taghipour y Mohseni, 2018).

## Referencias:

- Andrés, A. de, Prieto de Castro, C. y Usera, F. (2020) 'Informe sobre utilización de la radiación ultravioleta (UVC) para desinfección'. Disponible en: <https://digital.csic.es/handle/10261/216311> (Accessed: 28 December 2021).
- Aoyagi, Y. et al. (2011) 'Inactivation of Bacterial Viruses in Water Using Deep Ultraviolet Semiconductor Light-Emitting Diode', *Journal of Environmental Engineering*, 137(12), pp. 1215–1218. doi:10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000442.
- Bentancor, M. y Vidal, S. (2018) 'Programmable y low-cost ultraviolet room disinfection device', *HardwareX*, 4, p. e00046. doi:10.1016/j.ohx.2018.e00046.
- Bohrerova, Z. et al. (2008) 'Comparative disinfection efficiency of pulsed y continuous-wave UV irradiation technologies', *Water Research*, 42(12), pp. 2975–2982. doi:10.1016/j.watres.2008.04.001.
- Burgener, J. (2006) 'Position Paper on the Use of Ultraviolet Lights in Biological Safety Cabinets', *Applied Biosafety*, 11(4), pp. 228–230. doi:10.1177/153567600601100413.
- Correa, M. et al. (2020) 'Desinfección mediante el uso de luz UV-C germicida en diferentes medios como estrategia preventiva ante la COVID-19', *Minerva*, 1(2), pp. 46–53. doi:10.47460/minerva.v1i2.11.
- Luis Rossel. (2020) 'Radiation ultraviolet-c for bacterial disinfection (total y thermotolerant coliforms) in the water treatment', [http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2313-29572020000100068](http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2313-29572020000100068).
- Elio Pietrobon Tarrán (2002) 'Desinfección por luz ultravioleta', *Revista Agua Latinoamerica*. Disponible en: <https://acortar.link/AnCmLe>
- Gillespie, J.B. et al. (2017) 'Efficacy of Pulsed 405-nm Light-Emitting Diodes for Antimicrobial Photodynamic Inactivation: Effects of Intensity, Frequency, y Duty Cycle', *Photomedicine y Laser Surgery*, 35(3), pp. 150–156. doi:10.1089/pho.2016.4179.
- Green, C. et al. (2017) 'Pulsed-xenon ultraviolet light disinfection in a burn unit: Impact on environmental bioburden, multidrug-resistant organism acquisition y healthcare associated infections', *Burns*, 43(2), pp. 388–396. doi:10.1016/j.burns.2016.08.027.
- Shelly Miller, Mark Hernandez, Kevin Fernelly, John Martyn, Janet Macher, Elmira Kujundzic, Peng Xu, Patricia Fabian, Jordan Peccia, Cody Howard (2002) EFFICACY OF ULTRAVIOLET IRRADIATION IN CONTROLLING THE SPREAD OF TUBERCULOSIS, NIOSHTIC-2. Available at: <https://www.cdc.gov/niosh/nioshtic-2/20022472.html>.
- Kheyrandish, A., Mohseni, M. y Taghipour, F. (2017) 'Development of a method for the characterization y operation of UV-LED for water treatment', *Water Research*, 122, pp. 570–579. doi:10.1016/j.watres.2017.06.015.
- Kim, D.K., Kim, S.J. y Kang, D.H. (2017) 'Inactivation modeling of human enteric virus surrogates, MS2, Q $\beta$ , y  $\phi$ X174, in water using UVC-LEDs, a novel disinfecting system', *Food Research International*, 91, pp. 115–123. doi:10.1016/j.foodres.2016.11.042.
- Kim, S.-J., Kim, D.-K. y Kang, D.-H. (2016) 'Using UVC Light-Emitting Diodes at Wavelengths of 266 to 279 Nanometers To Inactivate Foodborne Pathogens y Pasteurize Sliced Cheese', *Applied y Environmental Microbiology*. Edited by J.L. Schottel, 82(1), pp. 11–17. doi:10.1128/AEM.02092-15.
- Knudson, L. (2013) 'Pulsed UV light disinfection system shows promise for OR decontamination', *AORN Journal*, 98(5), pp. C1–C10. doi:10.1016/s0001-2092(13)01039-9.
- Li, J. et al. (2010) 'Enhanced germicidal effects of pulsed UV-LED irradiation on biofilms', *Journal of Applied Microbiology*, 109(6), pp. 2183–2190. doi:10.1111/j.1365-2672.2010.04850.x.

- Memarzadeh, F., Olmsted, R.N. y Bartley, J.M. (2010) 'Applications of ultraviolet germicidal irradiation disinfection in health care facilities: Effective adjunct, but not stand-alone technology', *American Journal of Infection Control*, 38(5 SUPPL.), pp. S13–S24. doi:10.1016/j.ajic.2010.04.208.
- Menéndez López, B. (2021) 'Sobre la desinfección de superficies por radiación UVC: un análisis numérico y experimental'. Disponible en: <https://repositorio.unican.es/xmlui/handle/10902/22712> (Accessed: 28 December 2021).
- Napolitano, N.A., Mahapatra, T. y Tang, W. (2015) 'The effectiveness of UV-C radiation for facility-wide environmental disinfection to reduce health care-acquired infections', *American Journal of Infection Control*, 43(12), pp. 1342–1346. doi:10.1016/j.ajic.2015.07.006.
- Nerandzic, M.M. et al. (2015a) 'Evaluation of a Pulsed Xenon Ultraviolet Disinfection System for Reduction of Healthcare-Associated Pathogens in Hospital Rooms', *Infection Control & Hospital Epidemiology*, 36(2), pp. 192–197. doi:10.1017/ice.2014.36.
- Nerandzic, M.M. et al. (2015b) 'Evaluation of a Pulsed Xenon Ultraviolet Disinfection System for Reduction of Healthcare-Associated Pathogens in Hospital Rooms', *Infection Control & Hospital Epidemiology*, 36(2), pp. 192–197. doi:10.1017/ice.2014.36.
- Nerandzic, M.M., Fisher, C.W. y Donskey, C.J. (2014) 'Sorting through the Wealth of Options: Comparative Evaluation of Two Ultraviolet Disinfection Systems', PLoS ONE. Edited by P. Setlow, 9(9), p. e107444. doi:10.1371/journal.pone.0107444.
- Riley, R.L. y Permutt, S. (1971) 'Room Air Disinfection by Ultraviolet Irradiation of Upper Air', *Archives of Environmental Health: An International Journal*, 22(2), pp. 208–219. doi:10.1080/00039896.1971.10665834.
- Rutala, W.A., Gergen, M.F. y Weber, D.J. (2010) 'Room Decontamination with UV Radiation', *Infection Control & Hospital Epidemiology*, 31(10), pp. 1025–1029. doi:10.1086/656244.
- Rutala, W.A. y Weber, D.J. (2013) 'Disinfectants used for environmental disinfection y new room decontamination technology', *American Journal of Infection Control*, 41(5 SUPPL.), pp. S36–S41. doi:10.1016/j.ajic.2012.11.006.
- Rutala, W.A. y Weber, D.J. (2019) 'Best practices for disinfection of noncritical environmental surfaces y equipment in health care facilities: A bundle approach', *American Journal of Infection Control*, 47, pp. A96–A105. doi:10.1016/j.ajic.2019.01.014.
- Shin, J.-Y. et al. (2016) 'Fundamental Characteristics of Deep-UV Light-Emitting Diodes y Their Application To Control Foodborne Pathogens', *Applied y Environmental Microbiology*. Edited by C.A. Elkins, 82(1), pp. 2–10. doi:10.1128/AEM.01186-15.
- Song, K., Taghipour, F. y Mohseni, M. (2018) 'Microorganisms inactivation by continuous y pulsed irradiation of ultraviolet light-emitting diodes (UV-LEDs)', *Chemical Engineering Journal*, 343(March), pp. 362–370. doi:10.1016/j.cej.2018.03.020.
- Spencer, M. et al. (2017) 'A model for choosing an automated ultraviolet-C disinfection system y building a case for the C-suite: Two case reports', *American Journal of Infection Control*, 45(3), pp. 288–292. doi:10.1016/j.ajic.2016.11.016.
- Tran, T. et al. (2014) 'Comparison of continuous versus pulsed ultraviolet light emitting diode use for the inactivation of *Bacillus globigii* spores', *Water Science y Technology*, 70(9), pp. 1473–1480. doi:10.2166/wst.2014.395.
- Tseng, C.C. y Li, C.S. (2005) 'Inactivation of virus-containing aerosols by ultraviolet germicidal irradiation', *Aerosol Science y Technology*, 39(12), pp. 1136–1142. doi:10.1080/02786820500428575.
- Wengraitis, S. et al. (2013) 'Pulsed UV-C Disinfection of *Escherichia coli* With Light-Emitting Diodes, Emitted at Various Repetition Rates y Duty Cycles', *Photochemistry y Photobiology*, 89(1), pp. 127–131. doi:10.1111/j.1751-1097.2012.01203.x.
- Wong, T. et al. (2016) 'Postdischarge decontamination of MRSA, VRE, y *Clostridium difficile* isolation rooms using 2 commercially available automated ultraviolet-C-emitting devices', *American Journal of Infection Control*, 44(4), pp. 416–420. doi:10.1016/j.ajic.2015.10.016.