Atmosfree
una marca de LABERIT

Información técnica

La importancia de la desinfección del aire a pesar de instalar filtros HEPA

Normand Brais posee una licenciatura en ingeniería mecánica, un master en ciencias aplicadas y un doctorado en ingeniería nuclear por la Politécnica de Montreal. Fue nombrado profesor en el Instituto de Ingeniería de Energía de Montreal después de graduarse.

Ha fundado varias empresas tecnológicas en diversos campos, como la contaminación atmosférica debida a los equipos de combustión, biomasa, tratamiento de aguas, fotónica y desinfección por germicida UV de aire / superficie. En 1995 fundó Sanuvox Technologies, que ahora es líder tecnológico mundial en desinfección UV de aire y superficies en hospitales, laboratorios y edificios.

1. Introducción

Muchos asumen erróneamente que, al seguir las pautas del código de construcción aplicables, están proporcionando aire esterilizado. Y, aunque el filtro HEPA sigue siendo el mejor filtro disponible para los sistemas de ventilación, como todos los filtros, existe una zona de ineficiencia determinable que contradice el mito de que HEPA es la respuesta definitiva para la descontaminación del aire.

Para completar el proceso de desinfección del aire iniciado por filtración, se necesita agregar Irradiación Germicida Ultravioleta (UVGI). UVGI tiene una larga historia de uso para la desinfección del agua potable en las principales ciudades del mundo desde su primer uso en Marsella (Francia) en 1909. Durante casi dos décadas, UVGI se ha utilizado para desinfectar las corrientes de aire dentro de los conductos y bobinas de enfriamiento de aire acondicionado. Las agencias de salud pública como el CDC (Centro para el Control de Enfermedades) recomiendan el uso de UVGI como tecnología de control para interrumpir la transmisión de patógenos en los sistemas de ventilación de los edificios y para evitar la formación de biopelículas que pueden afectar gravemente la eficiencia de las bobinas de enfriamiento del aire acondicionado.

Este artículo proporciona una visión general de cómo la luz germicida UV esteriliza los microorganismos y la dosis que se requiere junto con la mejor práctica de filtración disponible para obtener un entorno aséptico adecuado para las clínicas de ART. El capítulo concluye con una breve revisión de las precauciones de seguridad comunes, así como los requisitos de mantenimiento del sistema ultravioleta.

1. Introducción

Varias pautas, códigos y estándares brindan abundantes detalles para el diseño de sistemas de ventilación de centros de salud [(1)(2)(3)(4)]. Sin embargo, muchos suponen erróneamente que los sistemas de ventilación diseñados e instalados de acuerdo con estos códigos suministrarán aire estéril.

A todos los efectos prácticos, la esterilidad a menudo se considera como una reducción de 6 Log o el 99.9999% de una población de microorganismos. En realidad, la reducción de 6 Log significa que uno en un millón sobrevivirá, mientras que la esterilidad absoluta implica que no hay microorganismos sobrevivientes. Según lo definido, la esterilidad de la corriente de aire puede ser bastante difícil de lograr y casi imposible de probar en la práctica actual.

La filtración de aire tradicional utilizando filtros HEPA (aire de partículas de alta eficiencia) ha sido el estándar en los sistemas de ventilación de hospitales y clínicas para controlar los patógenos en el aire durante más de cincuenta años. Múltiples estudios han demostrado que a pesar de la presencia de filtros HEPA, todavía se encuentra contaminación viral y bacteriana en los sistemas de ventilación [(5)(6)(7)].

Además de los demasiado comunes errores de filtración por deficiencias de bastidores de filtro, las fugas por punción del filtro y el mantenimiento típico (o la falta de ellas) y las preocupaciones sobre la eliminación, las deficiencias de la filtración HEPA cuando se relaciona con aplicaciones médicas se deben esencialmente al hecho de que todos los filtros muestran una caída significativa en su eficiencia de captura para tamaños de partículas de un cierto rango. Esto es inherente a los principios fundamentales subyacentes de la física de filtración[(8)].

Los filtros HEPA no son diferentes y también muestran una debilidad en un tamaño de partícula crítico entre 0.1 y 0.5 micras como se muestra en la figura 1. La eficiencia del filtro HEPA cae a un valor mínimo en un punto crítico llamado MPP (Partícula Más Penetrante) que es de alrededor de 0.2 micras.

Aunque la tasa de captura se reduce de un impresionante 99,94% a 99,95%, en dicho rango de tamaño como se observa en la figura 1, si un filtro HEPA es desafiado con una concentración de solo 10,000 partículas por pie cúbico dentro del rango de tamaño de 0.1 a 0.5 micras, lo que significa que, para **un flujo de 1,000 pies cúbicos por minuto, hasta 5,000 partículas por minuto pasarán a través del filtro HEPA.** Durante el transcurso de un solo día, un total de **7,2 millones de partículas penetrarán el filtro y contaminarán la zona aséptica**.

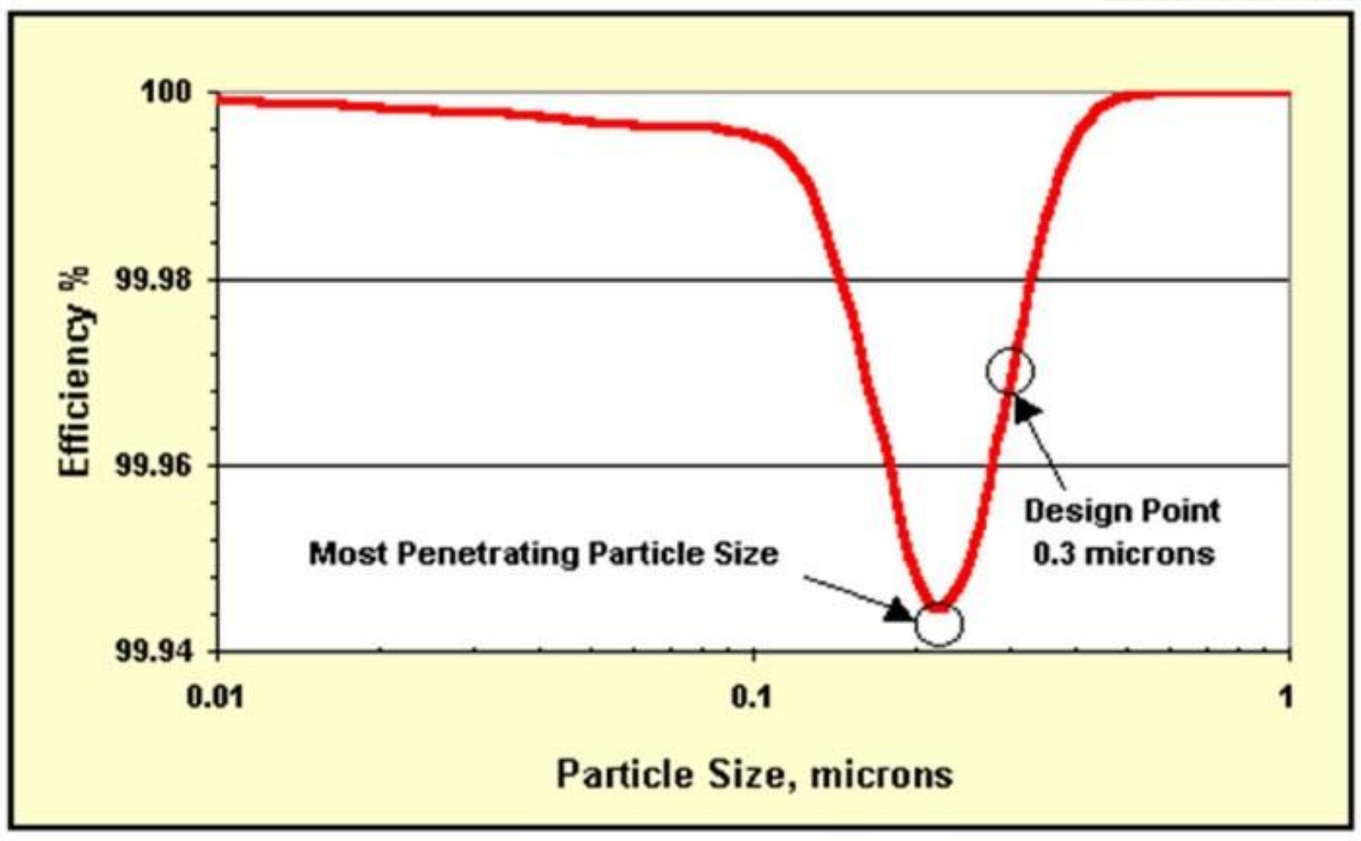


***Figura 1**. Rendimiento típico de filtros HEPA 99.97%*

Dentro del rango de tamaño vulnerable de 0.1 a 0.5 micras, los siguientes microorganismos típicamente encontrados y no deseados se recogen en la Tabla 1, comenzando desde el virus de *influenza* hasta la bacteria *legionella*.

Microorganismo	Tipo	Tamaño (Micras)	Notas
Influenza A Virus	virus	0,098	Causa gripe. Puede causar epidemia dentro de los edificios.
Vesicular stomatis Virus	virus	0,104	Se origina en animales de granja: causa enfermedades similares a los humos en humanos infectados
Coronavirus	virus	0,113	Resfriados comunes e infecciones pulmonares.
Mycoplasma pneumoniae	bacteria	0,177	Causa neumonía en el 20% de los casos.
Neisseria catarrhalis	bacteria	0,177	Segunda causa principal de Meningitis, también causa faringitis.
Francisella Tularensis	bacteria	0,200	Tularemia, neumonía, fiebre.
Virus enfermedad Newcastle	virus	0,212	Origen de las aves, puede causar conjuntivitis leve y síntomas similares a la gripe.
Coxiella burnetii	bacteria	0,283	Transmitido de animales a humanos. Fiebre Q: provoca escalofríos, dolor de cabeza, fatiga.
Haemophilus influenza	bacteria	0,285	Causa principal de meningitis. Afecta a bebés, otitis media, sinusitis.
Proteus vulgaris	bacteria	0,291	Neumonía, infecciones puntuales.
Vaccinia virus	virus	0,307	Constituyente de la vacuna contra la viruela. Resistente a los interferones.
Measle virus	virus	0,329	Rubeola, afecta a niños, nosocomiales. Transmisión aérea en ventilación escolar.
Pseudomonas aeruginosa	bacteria	0,494	Neumonía, nosocomial, crecimiento interior en polvo, agua, humificadores. HAI común
E. Coli	bacteria	0,500	Fuente: heces. Se encuentra en alimentos, carne y agua. Causa diarrea, a menudo mortal.
Legionella pneumophila	bacteria	0,520	Legionelosis. Fiebre de Pontiac, neumonía, mortal en el 15% de los casos.

Tabla 1. Tamaño de virus y bacterias dentro del rango de tamaño vulnerable de los filtros HEPA (0.1 a 0.5 micras)

Aunque el HEPA sigue siendo el mejor filtro disponible para los sistemas de ventilación, como todos los filtros, existe una zona de ineficiencia determinable que desmiente el mito del filtro HEPA como la respuesta final absoluta para la descontaminación del aire.

Para completar el proceso de desinfección del aire iniciado por la filtración HEPA, existe la irradiación germicida ultravioleta. A diferencia de la filtración, UVGI no captura ni retiene microorganismos vivos, los esteriliza a medida que pasan a través de la zona irradiada con UV. A diferencia del filtro que acumula partículas hasta que la caída de presión aumenta a un punto en el que debe eliminarse y reemplazarse, los sistemas UVGI tienen una caída de presión insignificante y requieren de un mantenimiento relativamente bajo. La tecnología UVGI tiene una larga historia exitosa y documentada para la desinfección en sistemas de ventilación y para poder beber agua en prácticamente todas las ciudades importantes del mundo desde su primer uso en Marsella (Francia) en 1909.

2. Fundamentos del proceso de desinfección fotoquímica ultravioleta

2.1 Revisión de luz UV

Al igual que nuestra conocida "luz visible", que se extiende desde una longitud de onda de 400 nm llamada "violeta" hasta los 700 nm que nuestros ojos humanos perciben como "roja", la luz ultravioleta también es una radiación electromagnética con una longitud de onda más corta. El espectro de luz UV no es visible para el ojo humano. El espectro UV se puede subdividir convenientemente en cuatro categorías:

- Banda UV-A (400–315 nm): la más abundante en luz solar que llega a la superficie de la Tierra.
- Banda UV-B (315–280 nm): principal responsable del enrojecimiento de la piel.
- Banda UV-C (280-200 nm): la más efectiva para el efecto germicida.
- UV lejano o vacío (200 - 30 nm): - Radiación ionizante y productora de ozono.

A medida que la longitud de onda de la luz se acorta, aumenta la cantidad de energía transportada por las partículas de luz llamadas fotones (figura 2)

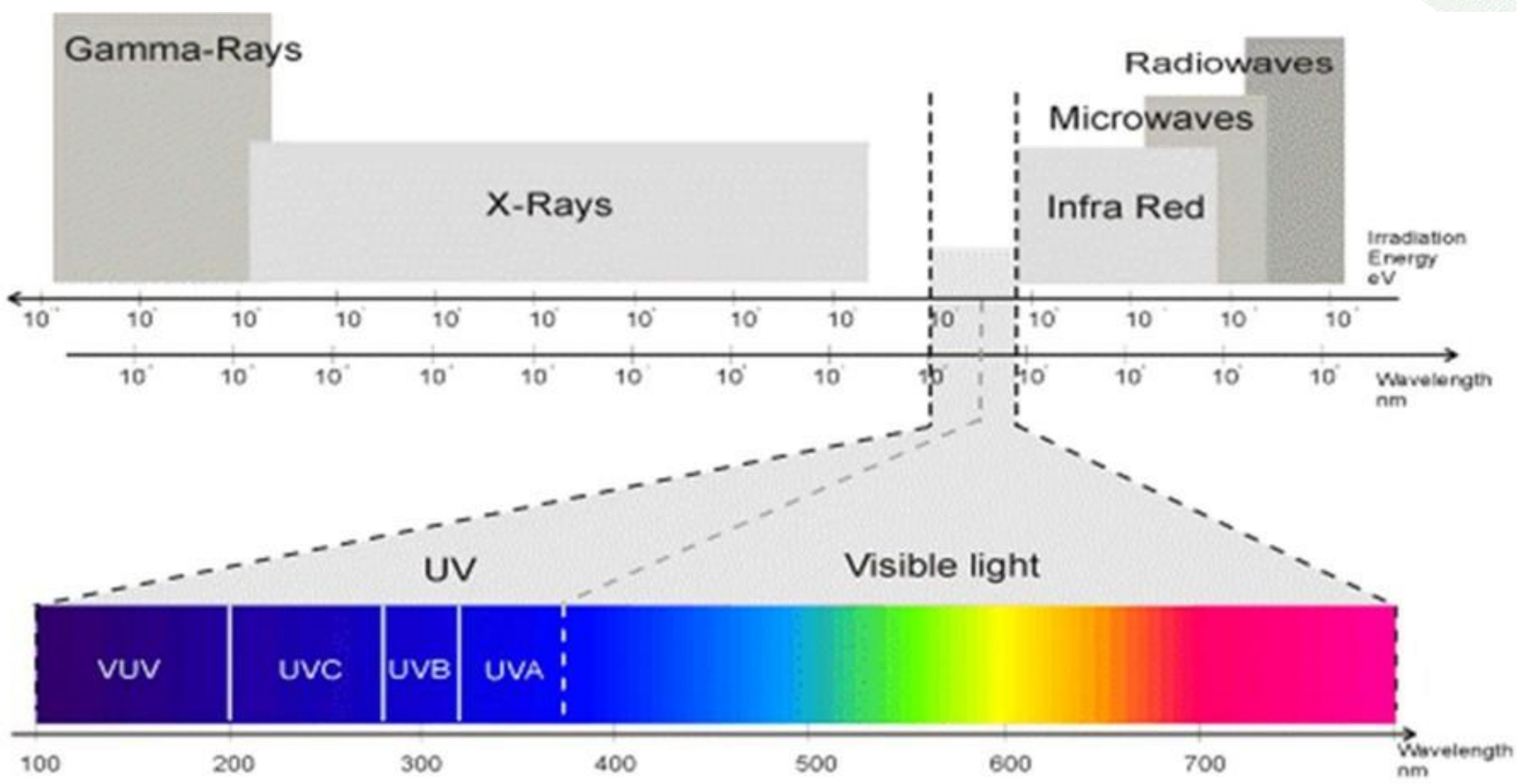


***Figura 2**.Espectro de luz*

2.2 Fotoquímica

La disociación del enlace químico inducida por la luz ocurre cuando la energía cuántica de un fotón es igual o mayor que la energía del enlace molecular. El daño fotoquímico a una estructura biomolecular que sustenta la vida puede ser inducido por irradiación con fotones que tienen niveles de energía correspondientes a la energía de los enlaces químicos. Tras la absorción de fotones UV, se crean estados excitados y especies reactivas que interactúan para formar nuevos productos bioquímicos no funcionales.

La historia de la inactivación microbiana fotoquímica se remonta al descubrimiento en 1877 por Downes y Blunt[9] de que la luz ultravioleta puede dañar los microorganismos. Más tarde, en 1928 F.L. Gates[10] hizo el descubrimiento formal de que las longitudes de onda monocromáticas específicas de la luz UV son responsables del efecto bactericida observado. Los mecanismos físicos fundamentales que explican la interacción de determinadas longitudes de onda de la luz con enlaces moleculares específicos finalmente fueron revelados por la mecánica cuántica, desarrollada por Planck, Bose, Einstein, Bohr, de Broglie, Heisenberg, Dirac, Pauli y otros durante la primera mitad del s. XX.

Posteriormente en la segunda mitad del S.XX la investigación bioquímica ha demostrado que la longitud de onda germicida más efectiva de 265nm coincide con el pico del espectro de absorción de los ácidos nucleicos[11]. Sobre la base de esta correlación, y la observación de que la mayoría del daño infligido a los microbios inactivados fue encontrado en su material genético, el mecanismo principal en la inactivación microbiana inducida por los rayos UV se sabe hoy en día que es el daño molecular a las cadenas de ADN y ARN. Dicha alteración de los ácidos nucleicos tiene la capacidad de afectar a una amplia gama de microorganismos, volviéndolos estériles y, en consecuencia, incapaces de infectar a un huésped. Dentro de los límites de precisión experimental, la acción letal del UV germicida parece ser independiente de la naturaleza del organismo y, a diferencia de los antibióticos, no se han encontrado signos de resistencia adaptativa después de un siglo de uso para la desinfección del agua.

La mayoría de las fuentes de luz germicidas disponibles en el mercado son lámparas de mercurio de baja presión que emiten entre el 30 y el 35% de su energía de entrada a 253,7 nm, una longitud de onda muy cercana al valor máximo como se muestra en la figura 3.

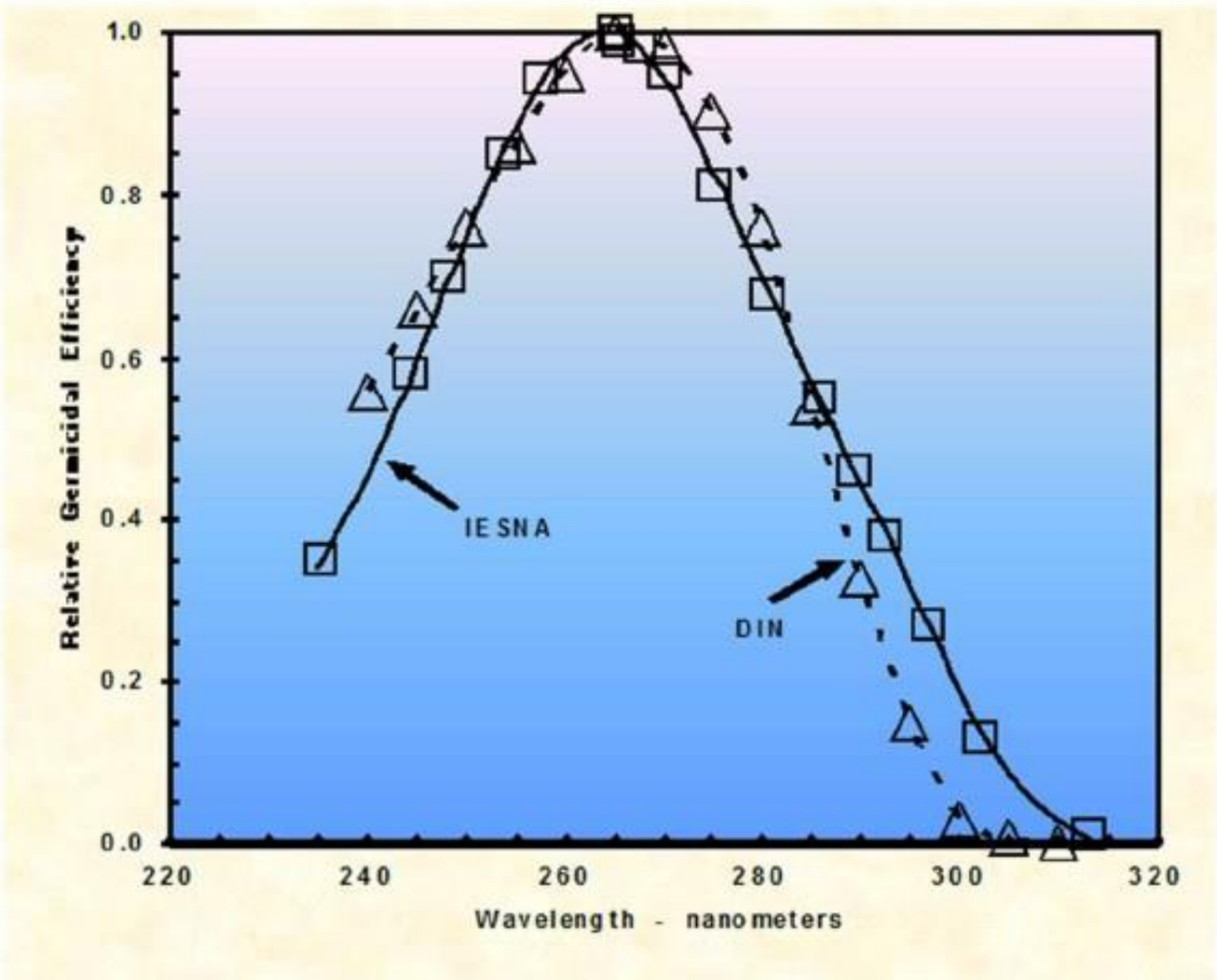


Figura 3.Eficiencia germicida relativa.

La esterilización fotoquímica de microorganismos se logra en la práctica con la longitud de onda ampliamente disponible de 253,7 nm. La energía cuántica transportada por esos fotones UV es lo suficientemente alta como para disociar los enlaces covalentes simples C, H, O y N, lo que resulta en un daño molecular irreversible en los ácidos nucleicos lo que conduce a un organismo no viable.

Entre los diversos daños de la radiación UV al ADN, la formación de dímeros ciclobutano pirimidina (CPD) y fotoproductos de pirimidina-pirimidona 6-4 (6-4 PP) [12]. Los CPD son causados por enlaces covalentes entre dos pirimidinas adyacentes. La irradiación UV generalmente genera dímeros de timina en la mayor cantidad, dímeros de citosina en baja cantidad y dímeros mixtos en un nivel intermedio [13]. En los virus de ARN irradiados con UV, el nucleótido uracilo forma fotoproductos de pirimidina.

Como se muestra en la figura 4, el movimiento de la ADN / ARN polimerasa se detiene al encontrar un dímero de timina. Con una dosis de irradiación de magnitud lo suficientemente alta como para abrumar los mecanismos de reparación del ácido nucleico causan daños que provocan alteraciones irreversibles en la replicación y la transcripción genética, y la eventual muerte del organismo.

Para una evaluación exhaustiva de los daños inducidos por los rayos UV a los ácidos nucleicos, y sobre los mecanismos de reparación, ver la descripción detallada de Kowalski [13].

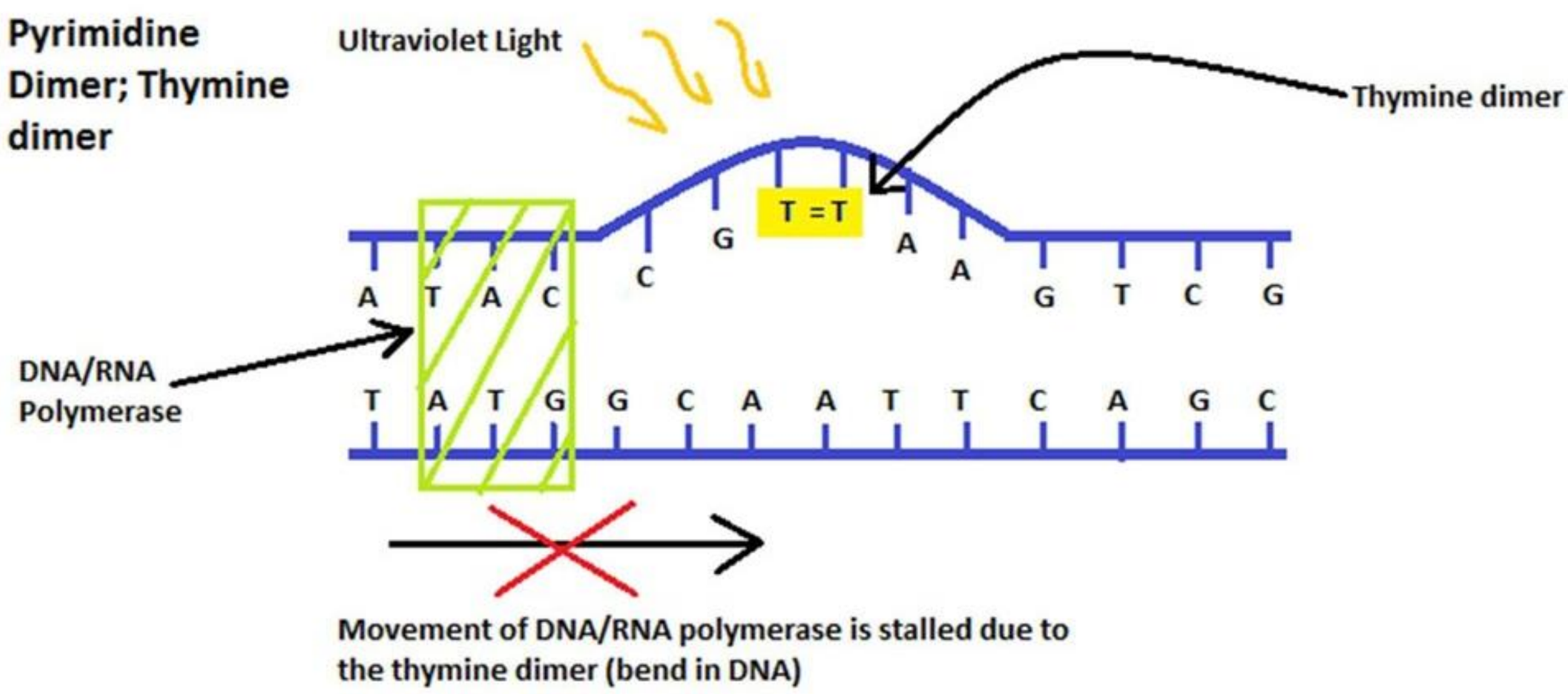


Figura 4. Daños en el ADN por la radiación UV.

2.3 Mecanismo de Dosis - respuesta UV

Para comprender el proceso de desinfección UV, es útil considerar los rayos UV como el análogo de un bombardeo de balas de fotones en un microbio. Cada fotón transporta una cantidad de energía denominada cuanto Eλ, de un valor conectado a la longitud de onda de la luz de acuerdo con la relación de Planck-Einstein:

$$E_\lambda = h\,c/\lambda \qquad \text{Eq.(1)}$$

Dónde:
h = constante de Planck, 6.626 x 10-34 Julios/seg
c = velocidad de la luz en el vacío, 2.998 x 10^8 m/seg.
λ = longitud de onda, m

Usando la relación de Planck-Einstein, la energía transportada por cada fotón UV-C a una longitud de onda de 253.7 nm es igual a 7.83 x 10^{-19} Julios. Por lo tanto, el número de fotones por Julio es el inverso, es decir, 1.28 x 10^{18} fotones por Julio. Recordando que un vatio de potencia se define como una tasa de un julio de energía por segundo, entonces una intensidad UV de 100 vatios/m^2 proporciona un flujo de 1,28 x 10^{20} fotones por segundo por metro cuadrado.

Ahora bien, considerando que un virus de 0.2 micras de diámetro tiene un área de sección transversal de 3,14 x 10^{-14} m^2, a pesar de su pequeño tamaño, este virus será bombardeado por 4 millones de fotones por segundo. Dado un tiempo de duración suficiente para este ataque de fotones UV, los daños fotoquímicos se acumularán lo suficiente como para que el organismo sea biológicamente disfuncional.

En realidad, independientemente del enorme número de fotones que se disparan a este virus, solo un número muy pequeño alcanza su objetivo con éxito para iniciar las reacciones fotoquímicas. El área de sección transversal de inactivación real efectiva de un microbio objetivo es función de muchos parámetros, entre ellos, el rendimiento químico cuántico, las capas protectoras externas de la cápside y la distribución particular de su secuencia de ADN.

Se ha publicado un método predictivo prometedor basado en el concepto de bombardeo de fotones descrito anteriormente y una probabilidad de impactos exitosos para predecir la susceptibilidad UV de los microorganismos en función de su genoma sin utilizar un procedimiento de laboratorio estándar[14].

En base a la analogía de bombardeo UV descrita anteriormente, se puede escribir una relación matemática para expresar la respuesta a la dosis UV de una población de microorganismos. Es razonable inferir que la tasa de descomposición de una población microbiana variará proporcionalmente al número de impactos exitosos durante un período de tiempo. Esta tasa de impactos exitosos puede describirse como el producto de la potencia UV por unidad de área I, el número de bio-organismos N, la sección transversal eficaz de inactivación UV de bio-organismos k, también llamada constante de susceptibilidad UV de bio-organismos, y el tiempo de exposición t:

$$\text{Tasa de acierto} = \frac{dN}{dt} = k\,N\,I\,t \qquad \text{Eq. (2)}$$

La integración de la ecuación anterior produce:

$$N(t) = N_0 e^{-kIt} \qquad \text{Eq (3)}$$

Donde:

N_0 = número inicial de microorganismos
Nt = número de microorganismos que sobreviven después de cualquier tiempo t
k = constante de susceptibilidad UV dependiente de microorganismos, en m^2/Julios
I = intensidad de radiación UV recibida por el microorganismo, en vatios/m^2
t = tiempo de exposición, en segundos

La fracción del número de microorganismos inicialmente presentes, que sobreviven en un momento dado, se denomina relación de supervivencia S y se puede expresar como:

$$S = \frac{N_t}{N_0}$$

La fracción esterilizada es lo que se llama tasa de desinfección, es simplemente 1 menos la tasa de supervivencia.

$$Desinfección = 1 - S = 1 - e^{-kIt} \qquad \text{Eq(5)}$$

Como se explicó anteriormente, podemos definir la dosis UV germicida por el número total de fotones UV emitidos por unidad de área durante un intervalo de tiempo, que puede escribirse como:

$$UVDose = I \times t \quad \text{in Joule/m}^2 \qquad \text{Eq (6)}$$

Al sustituir la ecuación 6 en la ecuación 5, finalmente obtenemos la relación germicida de dosis-respuesta UV:

$$\boldsymbol{Desinfección} = 1 - e^{-k\,\mathrm{UVDose}} \quad \text{Eq (7)}$$

Lo que ilustra ésta última ecuación es que una dosis dada aporta como resultado una tasa de desinfección dada, ya sea que la dosis UV sea de baja intensidad de UV para un tiempo de exposición prolongado, o una alta intensidad de UV para un tiempo más corto.
Una diferencia clave entre la descontaminación de la superficie y la inactivación de organismos en el aire es el tiempo de exposición. El tiempo de residencia para cualquier inducción la desinfección será del orden de unos segundos o una fracción de segundo dependiendo de las velocidades del flujo de aire.

Por lo tanto, las intensidades UV para la neutralización de un microorganismo en el aire deben ser órdenes de magnitud superior a la que se usa típicamente para la desinfección de superficies estacionarias, como paredes o serpentines de aire acondicionado. Las ecuaciones 3, 5 y 7 que se muestran en la figura 5 describen una disminución exponencial en el tiempo del número de organismos vivos como un nivel constante de intensidad de exposición UVGI aplicada.

El mismo tipo de ecuación se utiliza para describir el efecto de los desinfectantes químicos en una población de microorganismos, siendo la dosis en este ejemplo un químico con concentración multiplicada por el tiempo de contacto.

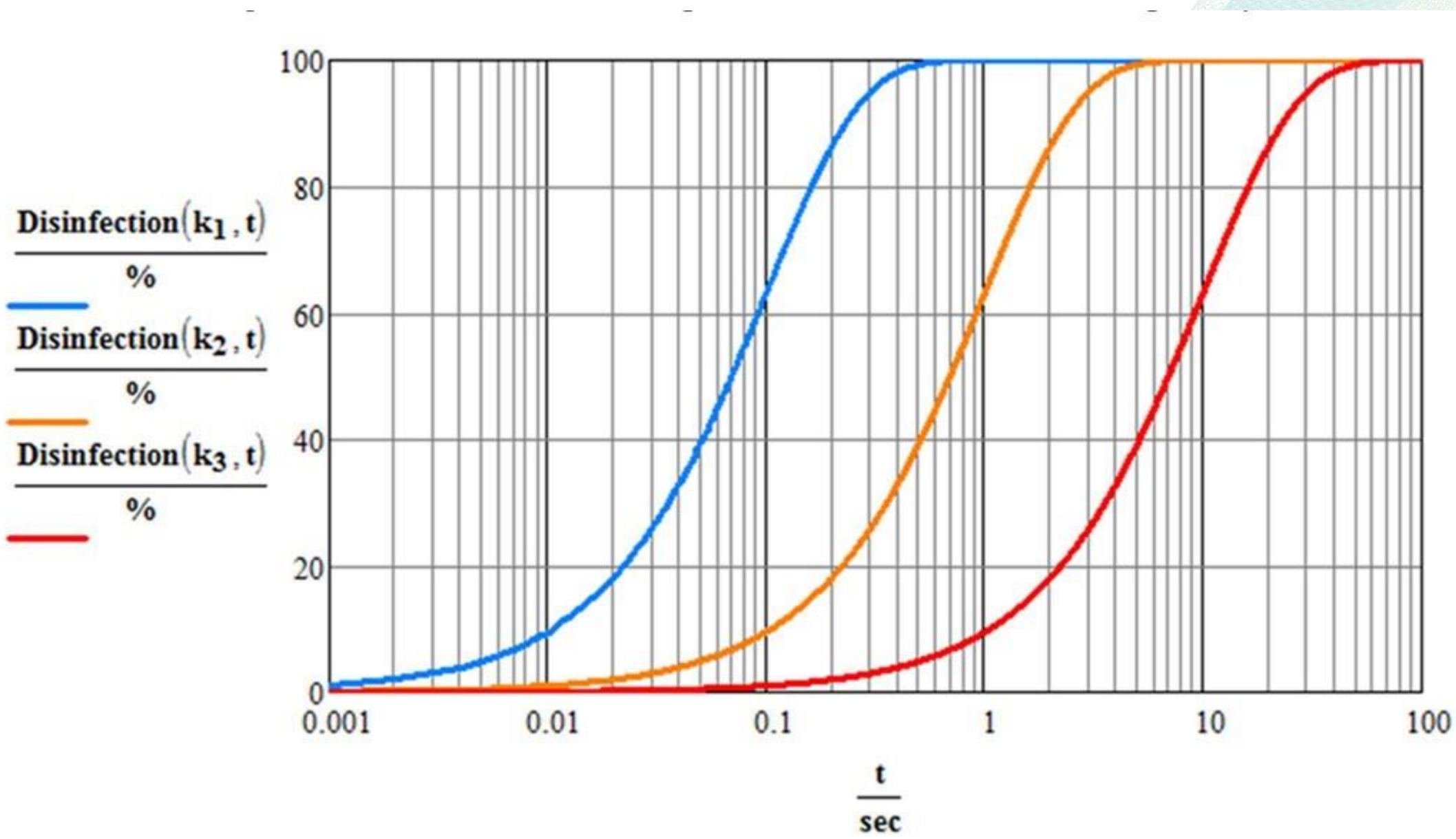


Figura 5. Tasa de desinfección vs Tiempo de exposición a UV para diferentes susceptibilidades a UV

2.4 Susceptibilidad de microorganismos a la energía UV

Los organismos difieren en su susceptibilidad a la inactivación UV. Algunos ejemplos de organismos patógenos familiares se incluyen en cada grupo como referencia. Es importante tener en cuenta que es imposible enumerar todos los organismos de interés en cada grupo. Dependiendo de la aplicación, se debe consultar a un profesional médico o de salud pública, a un microbiólogo u otra persona con conocimiento de la amenaza microbiana u organismos de interés.

En general, las bacterias vegetativas son las más susceptibles a los rayos UV, seguidas por las micobacterias, luego las esporas bacterianas y finalmente las esporas fúngicas que son las más resistentes a la energía UV. Dentro de cada grupo, una especie individual puede ser significativamente más resistente o susceptible, por lo que se debe tener cuidado y usar esta clasificación solo como una guía. Cabe señalar que las esporas que forman bacterias y hongos, también tienen formas vegetativas que son notablemente más susceptibles a la inactivación que las formas de esporas.

Los virus son particularmente problemáticos de clasificar ya que su susceptibilidad a la inactivación es aún más amplia que la de las bacterias u hongos.

Basado en la ecuación (5), está claro que los valores más grandes de k representan microorganismos más susceptibles y los valores más pequeños representan los menos susceptibles. Las unidades de k son m^2/Julios, que es el inverso de las unidades utilizadas en dosis UV.

Por ejemplo, el valor de la susceptibilidad a los rayos UV del virus de la Influenza-A fue medido experimentalmente por Jensen en 1964 y se encontró que era 0.0119 m2/Julios en el aire con una humedad relativa del 68%. En base a este valor, se puede determinar la dosis UV requerida que se aplicará para alcanzar el 90% de desinfección de una población de virus de influenza A usando la siguiente fórmula:

$$D90 = \frac{ln(10)}{k} = \frac{2.30}{k} \quad \text{in J/m}^2 \qquad \text{Eq.(8)}$$

El valor D90 para el virus de la influenza A es, por lo tanto, igual a 19,3 Julios/ m^2. El valor D90 tiene un alto interés práctico, ya que le permite al diseñador evaluar rápidamente la dosis UV requerida para alcanzar el nivel de desinfección deseado.

Por ejemplo, proporcionar una dosis de UV del doble de la D90 dará como resultado un nivel de desinfección del 99%. Administrar tres veces la dosis de D90 dará como resultado una tasa de desinfección del 99,9%, y así sucesivamente. Se fácilmente demostrable matemáticamente que el número de 9s, también llamado valor LOG de desinfección, es simplemente igual a la dosis de UV administrada dividida por el valor D90.

Para alcanzar la esterilidad, una condición que previamente hemos definido como un nivel de desinfección de 6 LOG o 99.9999%, se debe administrar al menos 6 veces el valor D90 del microorganismo más resistente. Se pueden encontrar extensas compilaciones de valores k publicados en varios lugares de la literatura, por ejemplo, Kowalski[13].

3. Dosis UVGI requerida para desinfección en clínicas

Dada la naturaleza de los procedimientos sensibles realizados en clínicas donde se están manipulando embriones extremadamente frágiles, el nivel de desinfección objetivo debe ser una esterilidad total, es decir, 99.9999% o superior.

Para determinar la dosis de UV requerida para las clínicas en ese caso primero debemos examinar la lista de microorganismos de interés enumerados en la tabla 2 que están dentro del rango de tamaño vulnerable de los filtros HEPA y comparar sus constantes de susceptibilidad a los rayos UV.

Microorganism	UV susceptibility			SIZE	Source
	k		*D 90%*		
	m2/J		J/m2	micron	
influenza A virus	0,119	m2/J	**19,3**	0,098	Jensen 1964-AIR at 68% RH.
Vesicular stomatis virus	0,1806	m2/J	**12,7**	0,104	Rauth 1965
Coronavirus	0,377	m2/J	**6,1**	0,113	Walker 2007
Mycoplasma pneumoniae	0,2791	m2/J	**8,2**	0,177	Furness 1977
Neisseria catarrhalis/meningitidis	0,05233	m2/J	**44,0**	0,177	Rentschler 1941-Surface
Francisella Tularensis	0,0147	m2/J	**156,0**	0,200	Beebe 1959
Newcastle disease	0,1440	m2/J	**16,0**	0,212	Rubin 1959
Coxiella burnetii	0,1535	m2/J	**15,0**	0,283	Little 1980-Water
Haemophilus influenza	0,0599	m2/J	**38,4**	0,285	Mongold 1992 -Surface
Proteus vulgaris/mirabilis	0,07675	m2/J	**30,0**	0,291	Rentschler 1941 -Surface
Vaccinia virus	0,153	m2/J	**15,0**	0,307	Jensen 1964-AIR at 65% RH.
Measle virus	0,1051	m2/J	**21,9**	0,329	Distefano 1976 -Water
Pseudomonas aeruginosa	0,1047	m2/J	**22,0**	0,494	Elasri 1999-Surface
E. Coli	0,15611	m2/J	**14,7**	0,500	Luckiesh 1949- AIR at low RH
Legionella pneumophila	0,44613	m2/J	**5,2**	0,520	Knudsen 1985- SURFACE

Tabla 2. Susceptibilidad a los rayos UV de microorganismos de alto riesgo (tamaño entre 0.1 y 0.5 micras).

Al examinar los valores de D90 que se muestran en la tabla 2, es obvio que el microorganismo más resistente es *Francisella Tularensis* que requiere una dosis UV de 156 J/m^2 para lograr una desinfección del 90%. Para llegar a 6 LOG de desinfección para este microorganismo, el sistema UV debe estar diseñado para asegurar que se aporta una dosis de al menos 6 veces 156 J/m^2, es decir, 936 J/m^2 a la corriente de aire antes de ingresar al espacio aséptico. Al hacer esta declaración, inferimos que no hay filtros de aire involucrados en la eliminación de este bio-contaminante. Por supuesto, este no es el caso como el HEPA que se estima que elimina al menos el 99.94% en este rango de tamaño, pero esta suposición proporciona un generoso margen de seguridad para cerciorar la esterilidad.

El nivel de desinfección obtenido si se aplica una dosis UV de 936 J/m2 se muestra en la tabla 3.

Microorganism	UV susceptibility			UV Dose (J/m2)	
	k		*D 90%*	936	
	m2/J		J/m2	% Disinfection	LOG
influenza A virus	0,119	m2/J	19,3	100,00000%	48
Vesicular stomatis virus	0,1806	m2/J	12,7	100,00000%	73
Coronavirus	0,377	m2/J	6,1	100,00000%	153
Mycoplasma pneumoniae	0,2791	m2/J	8,2	100,00000%	113
Neisseria catarrhalis/meningitidis	0,05233	m2/J	44,0	100,00000%	21
Francisella Tularensis	0,0147	m2/J	156,0	99,99990%	6
Newcastle disease	0,1440	m2/J	16,0	100,00000%	59
Coxiella burnetii	0,1535	m2/J	15,0	100,00000%	62
Haemophilus influenza	0,0599	m2/J	38,4	100,00000%	24
Proteus vulgaris/mirabilis	0,07675	m2/J	30,0	100,00000%	31
Vaccinia virus	0,153	m2/J	15,0	100,00000%	62
Measle virus	0,1051	m2/J	21,9	100,00000%	43
Pseudomonas aeruginosa	0,1047	m2/J	22,0	100,00000%	43
E. Coli	0,15611	m2/J	14,7	100,00000%	63
Legionella pneumophila	0,44613	m2/J	5,2	100,00000%	181

Tabla 3. Dosis de UV para niveles de desinfección de 936 J/m2.

Esta dosificación UV asegura una desinfección de 6 log o más para todos los microorganismos enumerados en la tabla 3, incluso en ausencia de un filtro.

Agregando los medios de filtro, se puede calcular una eficiencia de desinfección combinada usando la siguiente fórmula:

$$Disinfection_{overall} = 1 - (1 - Filter_{eff})(1 - U_{eff}) \qquad \text{Eq.(9)}$$

Por lo tanto, para lograr una desinfección general del 99.9999%, es decir, 6 LOG de esterilidad equivalente, se requiere la siguiente eficiencia de desinfección UV para una eficiencia de filtración dada:

$$UV_{eff} = 1 - \frac{10^{-6}}{1 - Filter_{eff}} \qquad \text{Eq.(10)}$$

De acuerdo con la ecuación 10, si la eficiencia mínima del filtro HEPA es del 99.94% para el tamaño de partícula más penetrante, entonces la eficiencia de desinfección UV debe estar diseñada para ser superior al 99.833%, para lograr una desinfección general por encima del 99.9999% o 6 LOG.

Usando la ecuación 7 con el valor de control de susceptibilidad a los rayos UV de *Francisella Tularensis* (0.0147 m^2/J), la dosis mínima de UV requerida para alcanzar el 99.833% de desinfección se calcula en 435 J/m^2.

Un diseño conservador de redundancia total requeriría la dosis máxima de UV, mientras que el valor mínimo que se basa en la contribución del filtro HEPA al proceso de desinfección realizaría el mismo trabajo general requiriendo aproximadamente la mitad de la potencia. En este punto, es una decisión de diseño basada en el factor de seguridad incorporado deseado. En la tabla 4 a continuación se enumera la eficiencia combinada resultante de la filtración y el sistema UV. Es interesante observar que la eficiencia LOG de cada dispositivo individual (filtro o UV) simplemente se suma a la desinfección combinada LOG total.

Microorganism	HEPA Filter		UV Dose		TOTAL	
	Efficiency	Filter	435	UV	Combined	
	%	LOG	J/m2	LOG	Disinfection	LOG
influenza A virus	99,99%	4,0	100,0000%	22,5	100,0000%	26,5
Vesicular stomatis virus	99,99%	4,0	100,0000%	34,1	100,0000%	38,1
Coronavirus	99,99%	4,0	100,0000%	71,2	100,0000%	75,2
Mycoplasma pneumoniae	99,95%	3,3	100,0000%	52,7	100,0000%	56,0
Neisseria catarrhalis/meningitidis	99,95%	3,3	100,0000%	9,9	100,0000%	13,2
Francisella Tularensis	99,94%	3,2	99,8358%	2,8	99,9999%	6,0
Newcastle disease	99,94%	3,2	100,0000%	27,2	100,0000%	30,4
Coxiella burnetii	99,97%	3,5	100,0000%	29,0	100,0000%	32,5
Haemophilus influenza	99,97%	3,5	100,0000%	11,3	100,0000%	14,8
Proteus vulgaris/mirabilis	99,97%	3,5	100,0000%	14,5	100,0000%	18,0
Vaccinia virus	99,97%	3,5	100,0000%	28,9	100,0000%	32,4
Measle virus	99,97%	3,5	100,0000%	19,9	100,0000%	23,4
Pseudomonas aeruginosa	99,99%	4,0	100,0000%	19,8	100,0000%	23,8
E. Coli	99,99%	4,0	100,0000%	29,5	100,0000%	33,5
Legionella pneumophila	99,99%	4,0	100,0000%	84,3	100,0000%	88,3

Tabla 4. Eficiencia combinada de filtro y desinfección UV cuando se aplica la dosis mínima adecuada de UV.

3.1 Guías de diseño de los sistemas UVGI

Antes de examinar los diversos requisitos de diseño para un sistema UV para alcanzar un nivel de irradiación homogéneo, es importante tener en cuenta que la ecuación 7 no sirve para determinar la dosis UV suministrada real por un conjunto dado de lámparas UV colocadas dentro de un conducto de aire. En cualquier conducto de aire, la física se complica por el movimiento de los microorganismos diana con la corriente de aire turbulento y por el hecho de que la irradiación UVGI está lejos de ser constante dentro del conducto, ya que varía significativamente con la distancia de las lámparas UV. Además, la geometría física del conducto, la distribución de la velocidad del flujo de aire, el número y las posiciones de las lámparas UV en el conducto tienen la posibilidad de afectar a la dosis total de UV administrada. Solo un programa computarizado que utiliza un método de integración y suma de la contribución de todas las lámparas UV permite calcular con precisión el campo de irradiación UV dentro de un conducto. Dicho cálculo también incorpora la importante contribución de las propiedades reflectantes de los rayos UV de las superficies de las paredes de los conductos en la mejora del rendimiento de la desinfección por rayos UV.

Las primeras pautas de diseño para los sistemas de desinfección de la corriente de aire UVGI se desarrollaron en la década de 1940[15]. Los sistemas aparecieron en catálogos comerciales que algunos fabricantes como Philips[16] siguen reproduciendo e incluso utilizando hoy en día. Estas pautas proponen cuadros y tablas para dimensionar lámparas y superficies reflectantes a fin de obtener la tasa de desinfección deseada. Estos métodos de dimensionamiento, aunque admirablemente detallados para ese momento, padecen varias deficiencias fundamentales, siendo la más importante:

- El campo real de intensidad tridimensional no está definido, sino que simplemente se evalúa en función de la potencia nominal de la lámpara o se basa en datos fotométricos básicos tomados en los puntos medios de la lámpara.
- Las lámparas se especifican independientemente de su posicionamiento.
- Los factores de corrección para la reflectividad ignoran las dimensiones y longitudes de los conductos.

Muchos fabricantes dimensionan los sistemas según las reglas generales, como llenar la sección transversal disponible de los conductos con una variedad de lámparas, o basar sus diseños en pruebas limitadas de propiedad.

El poder computacional disponible de los ordenadores modernos permite el dimensionamiento adecuado y personalizado de cualquier sistema de desinfección UV inducido.

El cálculo adecuado para predecir la dosis UV a aplicar debe tener en cuenta los parámetros de entrada relevantes que describen un sistema UVGI rectangular en términos de su geometría, características de la lámpara, ubicación y orientación de la lámpara y reflectividad de la superficie. El programa requiere los siguientes parámetros de entrada para cada cálculo:

- Rango del flujo de aire.
- Altura, anchura y longitud del conducto.
- % de reflectividad de las superficies internas.
- Potencia de salida UV de la lámpara (W), longitud y diámetro de la lámpara.
- Coordenadas de posición de cada lámpara (xi, yi, zi).
- Tasa de microorganismos diana constante k en m^2/J.

Kowalsk[17], utilizando el modelado computacional, teniendo en cuenta todas estas variables, ha propuesto un análisis dimensional para evaluar la sensibilidad de todos los parámetros de diseño anteriores sobre el rendimiento de desinfección contra la corriente de aire dentro del conducto. Un resultado interesante y muy útil del trabajo de Kowalski es una elegante y simplificada fórmula que correlaciona la relación de la dosis de UV administrada en función del flujo de aire, la potencia de salida de UV y la longitud del conducto. La fórmula es la siguiente:

$$UV\ dose = \frac{P}{Q} L \qquad \text{Eq.(11)}$$

Donde:
P = salida de UV en vatios
Q = flujo de aire en m^3/seg
L = longitud de exposición a UV

Con fines de escala, la ecuación 11 nos dice que, si la velocidad de flujo se duplica en un tamaño de conducto dado, entonces la potencia UV o el número de lámparas también deben duplicarse para mantener el mismo rendimiento de desinfección. Lo mismo puede decirse sobre la exposición a los rayos UV a lo largo del conducto (L), si se reduce a la mitad para hacer que el sistema sea más compacto, entonces la potencia de salida UV tendrá que duplicarse para compensar.

Al observar en la ecuación 11 que el flujo de aire Q es el producto de la sección transversal del conducto A en m^2 por la velocidad del aire V en m/seg y que el tiempo de exposición UV t es simplemente la relación de la longitud del conducto L con la velocidad del aire V, podemos reescribir la ecuación 11 de la siguiente manera:

$$UV\ dose = P \times t / A \qquad \text{Eq(12)}$$

Esta relación de escala expresa de manera concisa el hecho de que la dosis UV suministrada en J/m^2 es el producto de la potencia de salida de las lámparas UV en vatios con el tiempo de exposición en segundos dividido por el área de la sección transversal del conducto.

La Figura 6 muestra un ejemplo de la aplicación de un modelo informático de irradiación UV para un conducto de 0,75 m de altura x 1.5 m de ancho x 2 m de largo donde se instalan 2 juegos de 5 lámparas UV paralelas de 150 vatios cada una. El flujo de aire es de 6000 m^3/h y la reflectividad de la superficie interna es del 85%. Los iso-contornos numerados representan la distribución acumulativa de dosis UV en J/m^2 recibida por la corriente de aire a la salida de la sección transversal del conducto.

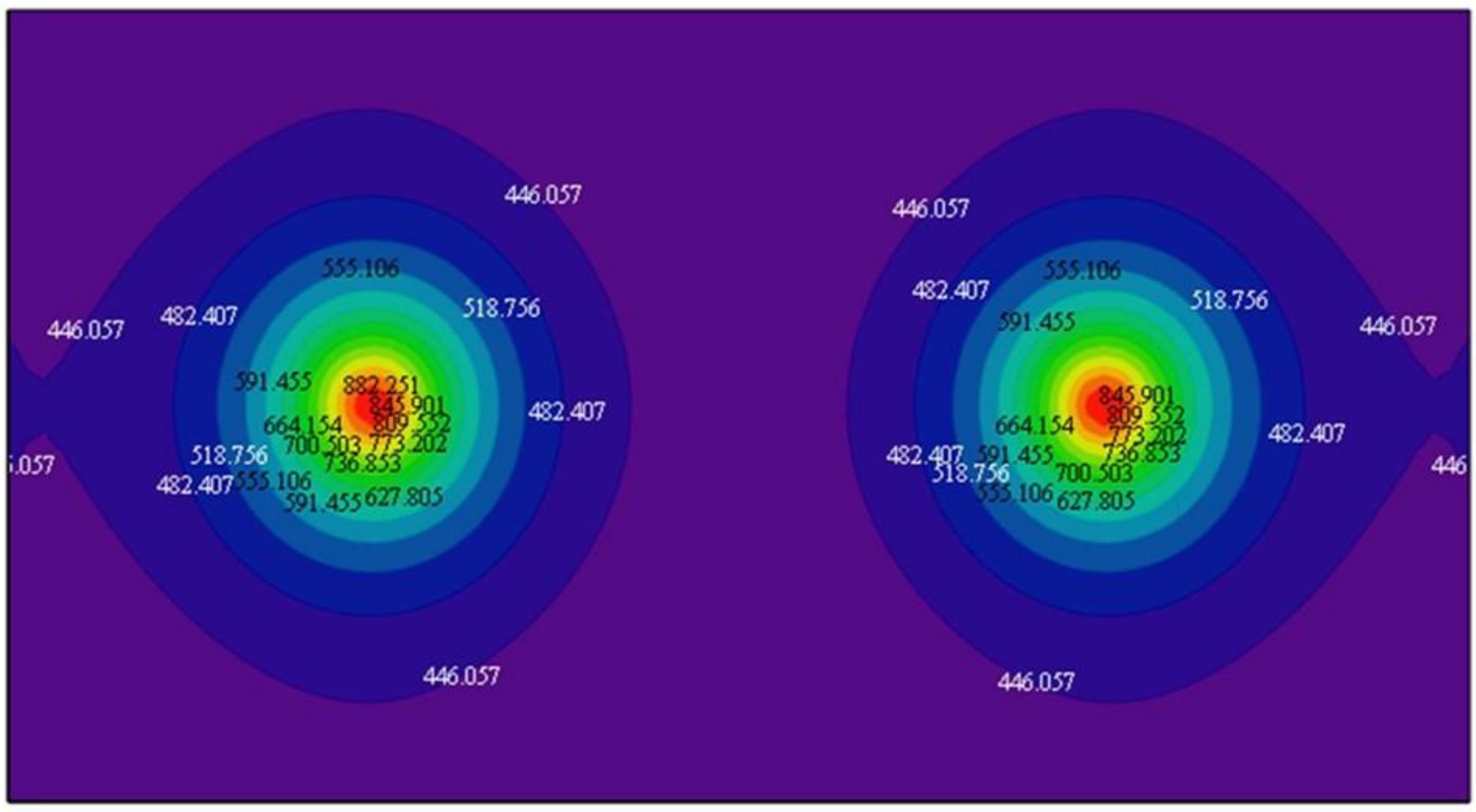


Figura 6. Calculo de la dosis UV liberada en una corriente de aire (aluminio con 85% reflectividad)

El sistema UV anterior proporciona una dosis promedio de 467 J/m2, que está ligeramente por encima de los 435 J/m2 requeridos para obtener 6 LOG de desinfección cuando se trabaja junto con la filtración como en la Tabla 4.

3.2 Influencia de lareflectividad de las superficies internas

Cuando la reflectividad es alta (75-85% para aluminio pulido) y las superficies reflectantes engloban la mayor parte del área de la cámara, los reflejos resultantes permiten una contribución significativa al campo UV total. Las reflexiones que hacen eco entre superficies se llaman interreflexiones. La intensidad resultante debido a las interreflexiones logrará un estado estable a la velocidad de la luz, convergiendo a un valor finito que depende de la geometría del conducto y las propiedades reflectantes de la superficie interna. El proceso físico de las interreflexiones se puede simular mediante el uso de un modelo computacional que realiza un número suficiente de iteraciones. Descuidar el uso altamente reflexivo de las superficies de revestimiento de los conductos, como el aluminio pulido, afectan gravemente al rendimiento del sistema UV en un factor de dos o más por la misma potencia de entrada. La eficiencia aumenta casi linealmente con la reflectividad de la superficie.

La Figura 7 muestra los resultados de dosificación UV para el mismo caso que se mostró en la Figura 6, pero con una pared interna con una reflectividad del 57%, característica del material del conducto de aire común: acero galvanizado.

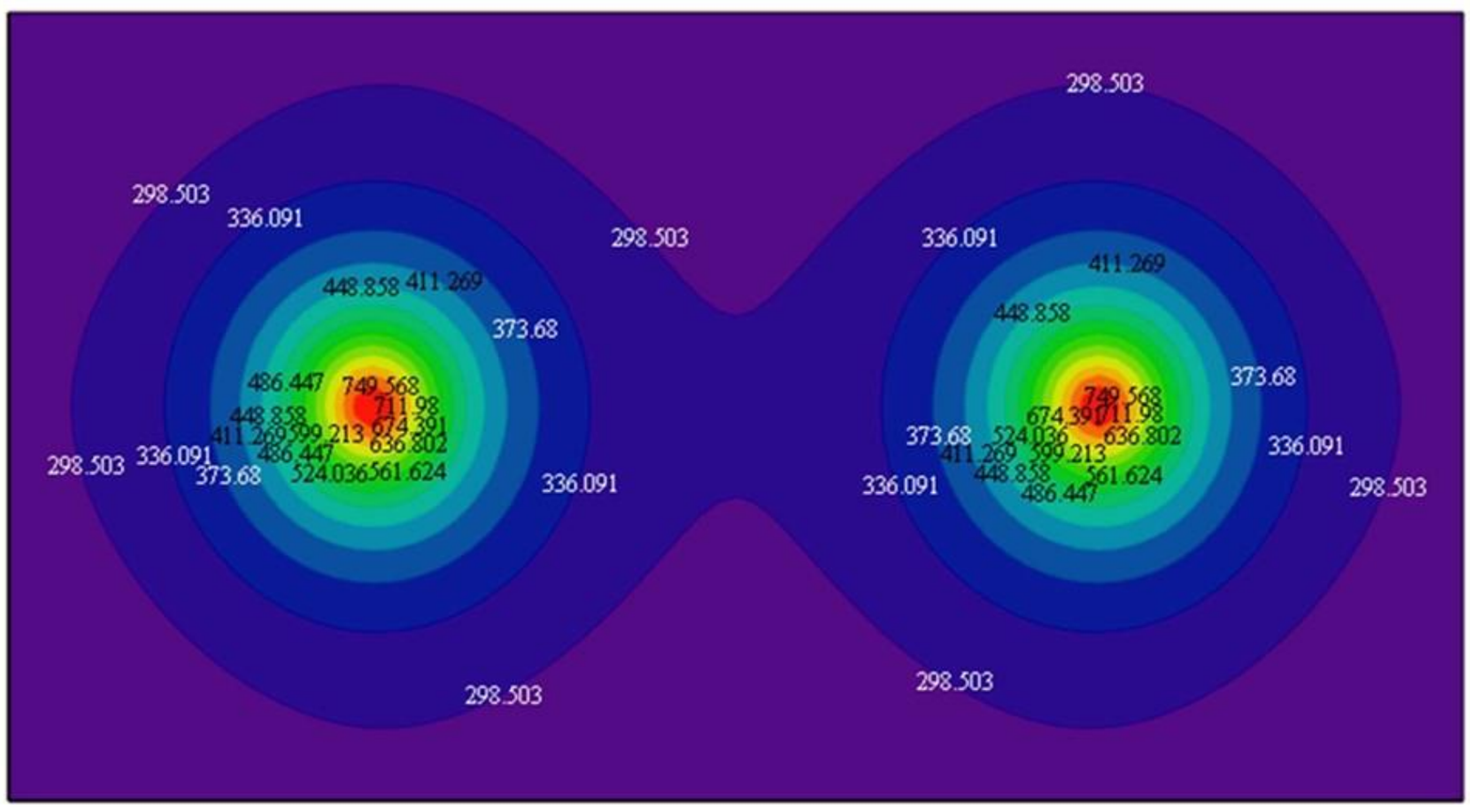


Figura 7. Cálculo de la dosis de UV suministrada una a corriente de aire (acero galvanizado con reflectividad del 57%)

Observando la figura 7, se puede ver que la dosis UV recibida para el vapor de aire que se mueve en la pared del conducto ha caído aproximadamente 150 J/m^2 para la misma ubicación en la figura 6. Esto representa una caída de casi el 30% para la misma potencia de la lámpara UV. En consecuencia, es muy ventajoso desde el punto de vista de eficiencia energética y coste usar un material altamente reflectante. Es importante señalar que las propiedades reflectantes de la longitud de onda UVC son muy diferentes en comparación con la reflectividad de la luz visible.

A pesar de sus características reflectantes aparentes para luz visible, el acero inoxidable pulido tiene una baja reflectividad UVC de solo el 20% como se puede ver en la figura 8, donde el campo de dosis de UV promedio ha disminuido más de la mitad en comparación con el ejemplo del 85% para aluminio. El aluminio pulido con una reflectividad que varía de 75 a 85%, es el material óptimo para revestir un conducto de aire para mejorar el rendimiento de desinfección UV. Los datos de reflectividad UVC están publicados y deben incluirse en los cálculos de dosificación para maximizar la eficiencia energética del sistema de los rayos UV de desinfección. La tabla 5 a continuación proporciona valores de reflectividad UVC típicos para diversos materiales.

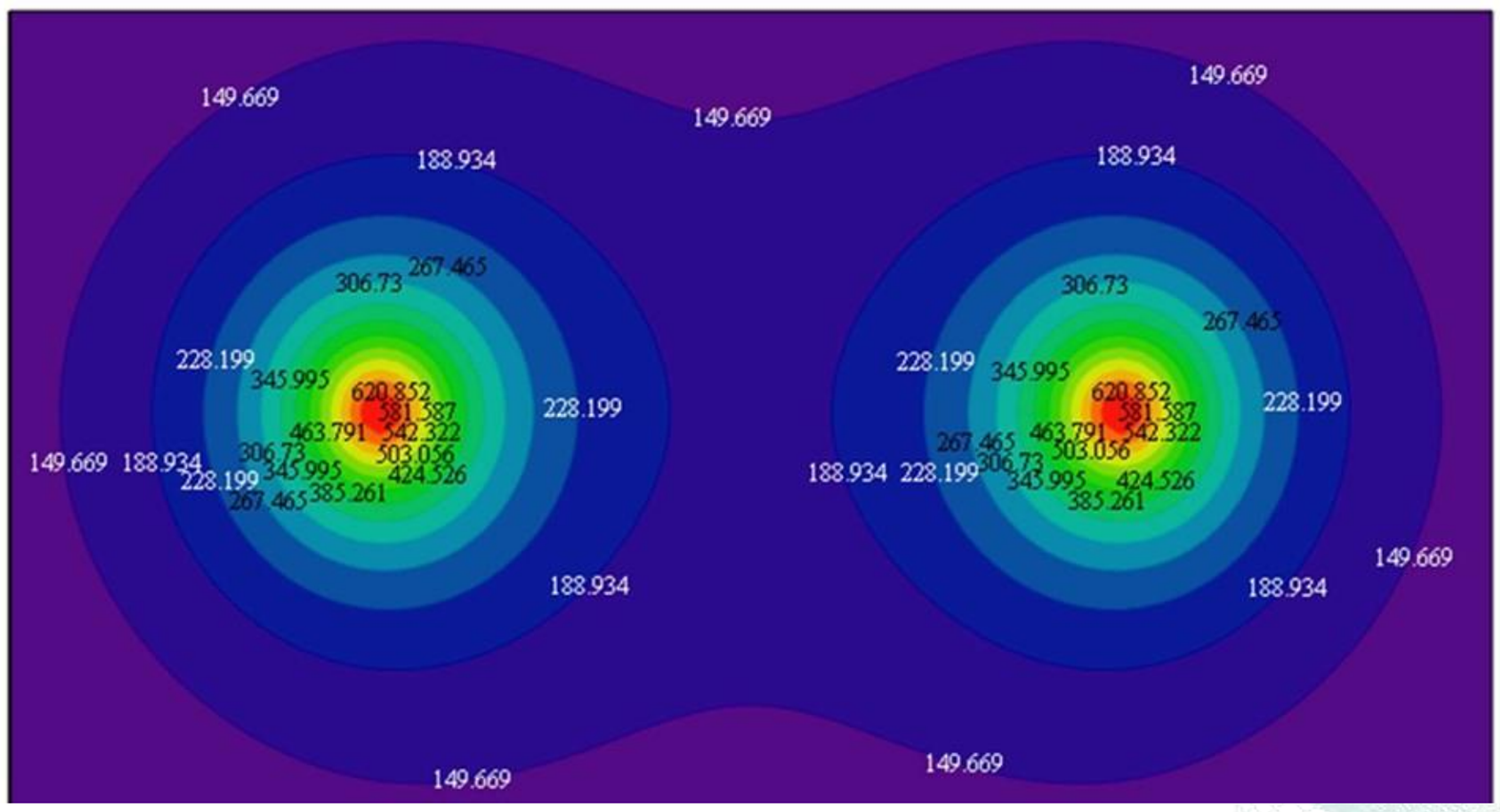


Figura 8. Cálculo de la dosis de UV suministrada a una corriente de aire (acero inoxidable de 20% de reflectividad

MATERIAL	REFLECTIVIDAD %	MATERIAL	REFLECTIVIDAD %
ePTFE	98.5	Molibdeno	25
Spectralon	95	Papel de botar blanco	25
Óxido de magnesio ahumado	93	Papel fotográfico AZO, no expuesto	24
Aluminio evaporado	87	Plata	23
Hoja de aluminio Alzak, iluminada	87	Pintura de agua blanca	23
Hoja de aluminio Alzak	84	Papel pintado blanco	22
Óxido de magnesio	81	Acero inoxidable	20
Aluminio - pulverizado sobre vidrio	80	Fondo de pantalla de color marrón	18
Carbonato de calcio prensado	78	Tungsteno	18
Óxido de magnesio prensado	77	Lino	17
Carbonato de calcio	75	Lámpara fluorescente de fósforo	17
Carbonato de magnesio	75	Duraluminio	16
Superficie tratada de aluminio	74	Pintura de agua blanca de kalsomina	12
Papel de aluminio	73	Cemento Medusa	11
Pintura de aluminio	65	Pintura de agua blanca de alabastina	10
Baritina	65	Esmalte blanco al horno	9
Yeso nuevo	58	Pintura al óleo blanca	8
Conducto galvanizado - liso	57	Pintura negra	7
Conducto galvanizado - rugoso	53	Latón	7
Aluminio - superficie no tratada	50	Papel de regalo marrón	7
Yeso de pared blanca	46	Óxido de titanio	6
Stellite	46	Papel fotográfico AZO, negro expuesto	6
Cromo	44	Celuloide	6
Papel fotográfico AZO, dorso blanco	39	Seda Pongee	6
Acero cromado	39	Esmalte al horno marrón	6
Rodio	38	Vehículo de caseína	6
Níquel	37	Lacado egipcio negro plano	5
SO. pintura blanca Decotint	33	Lithopone	5
Papel pintado de marfil	31	Óxido de zinc en laca transparente	5
Papel pintado rosado	31	Pintura de laca negra	5
Espéculo	30	Esmalte de porcelana blanca	5
Algodón blanqueado	30	Pintura de óxido de zinc	5
Acero estañado	28	Linterna de vidrio deslizante	4
Acero inoxidable	28	Arcilla china	4
Hojalata	28	Pintura de caseína de óxido de zinc	4
Papel pintado de marfil	26	Óxido de zinc prensado	3

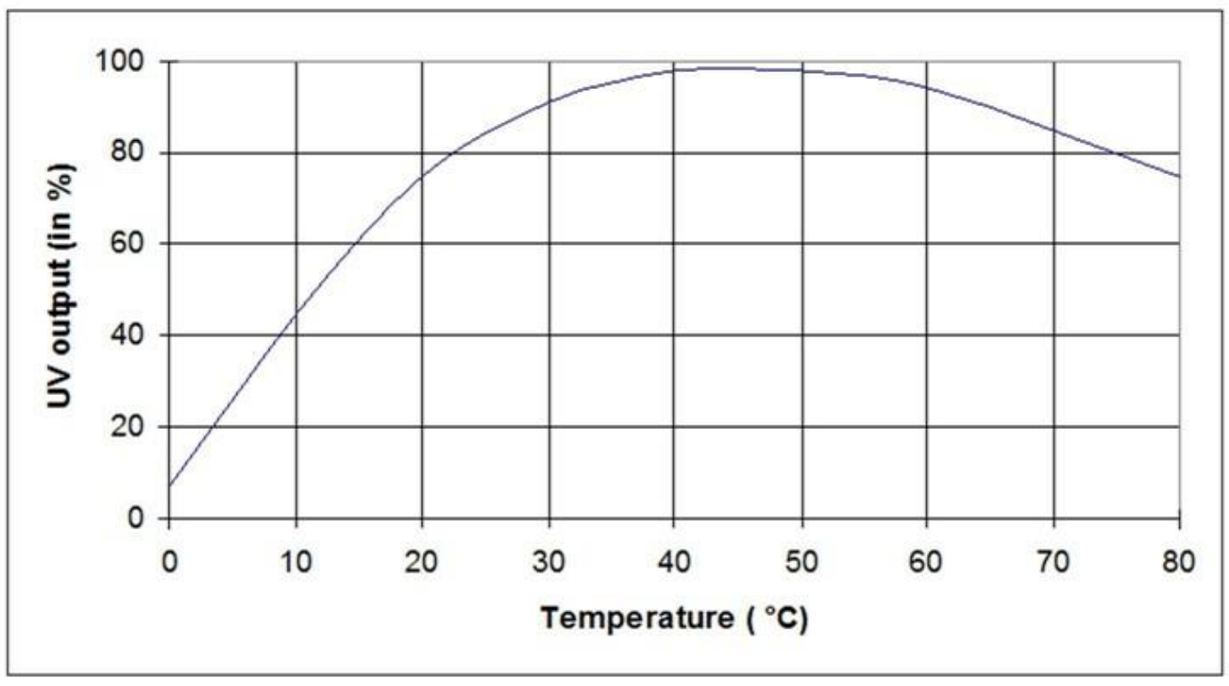
Tabla 5. Reflectividad UV-C de varios materiales

3.3 Efecto de la velocidad del aire, la temperatura y el envejecimiento de la lámpara

La temperatura y la velocidad del aire pueden variar en un amplio rango con un sistema de ventilación, causando enormes variaciones en la salida de la lámpara UV y deben tenerse en cuenta adecuadamente en el diseño y análisis del sistema.

Las lámparas UV están diseñadas de tal manera que, dependiendo del tipo de lámpara, la temperatura de la superficie de la lámpara de punto frío debe estar entre 38 ° C y 50 ° C para alcanzar la salida UV máxima (Figura 9).

En el aire en movimiento, la temperatura del punto frío de las lámparas UV podría ser demasiado baja y la salida de UV caería como se ve en la figura 10 y la figura 11. Para minimizar el efecto de enfriamiento y permitir una mayor eficiencia operativa en condiciones de flujo de aire frío, es preferible instalar las lámparas paralelas al flujo en lugar del flujo transversal perpendicular.



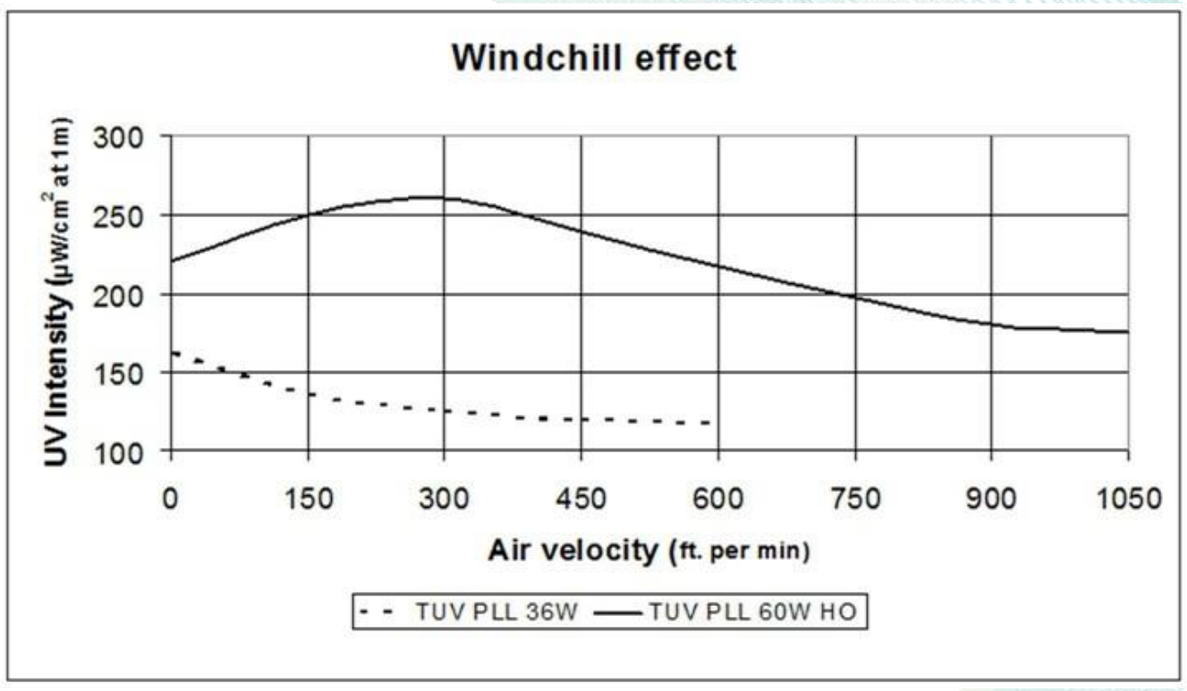


Figura 9. Ejemplo de eficiencia de la lámpara en función de la temperatura del punto frío.

Figura 10. Influencia del efecto de enfriamiento del aire en movimiento sobre la eficiencia de la lámpara UV para 2 tipos de lámpara.

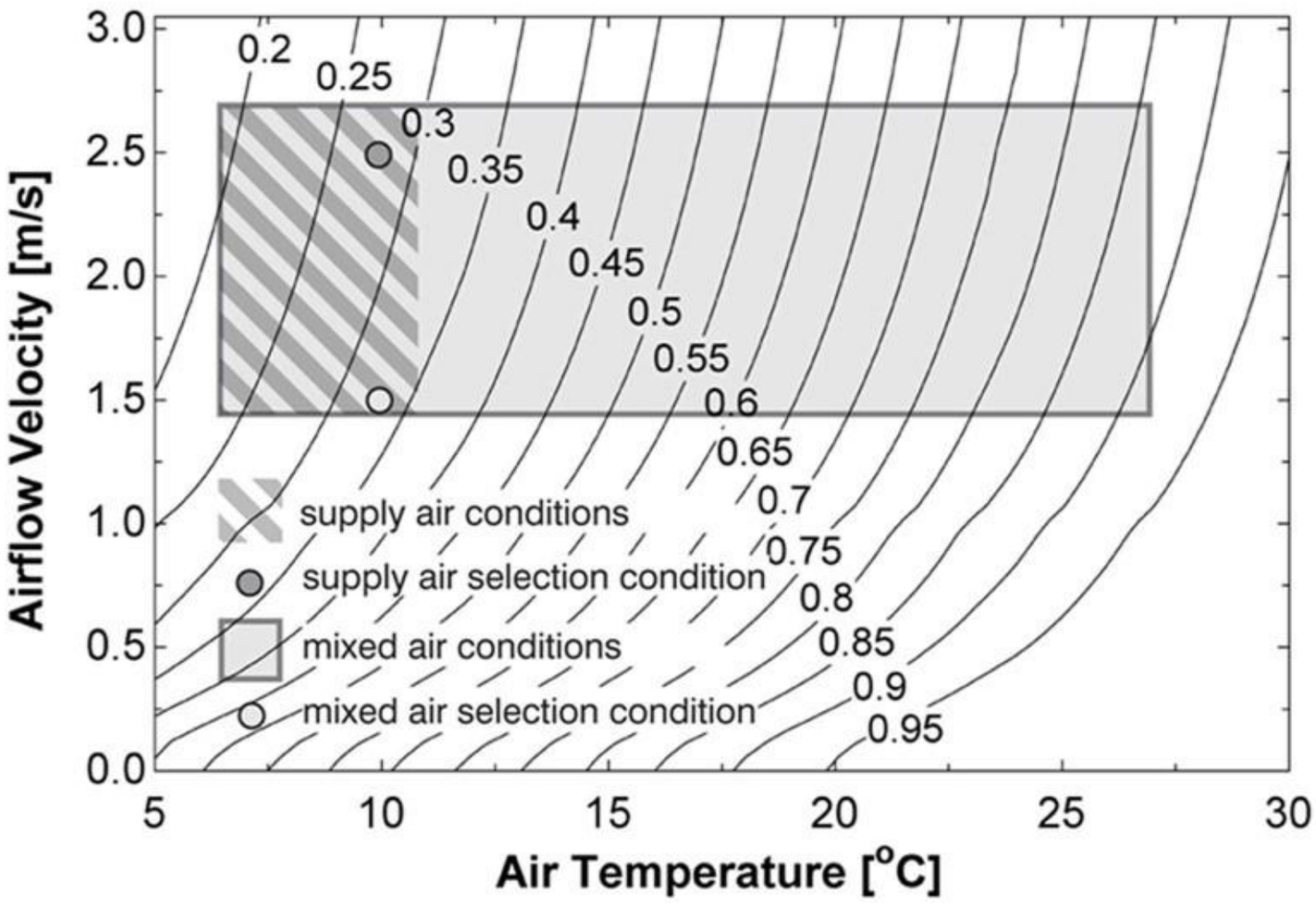


Figura 11. Efecto combinado de la temperatura y la velocidad del aire en la salida de la lámpara UV (15).

La salida de la lámpara UV disminuye con el tiempo. Las lámparas UV se clasifican en horas efectivas de emisión UV y no en horas de vida eléctrica. La mayoría de las lámparas UV emiten niveles de intensidad al final de su vida útil, es decir, 20.000 horas, que son 80% o más que las medidas a las 100 horas de funcionamiento. Los sistemas UVGI deben estar diseñados para la salida UV al final de la vida efectiva. Las lámparas UV modernas continuarán emitiendo luz azul mucho después de que hayan pasado su vida útil germicida.

Las variaciones en la salida de la lámpara UV debido al tipo de lámpara y las condiciones ambientales pueden ser de igual o mayor magnitud que la depreciación debido al envejecimiento. Estos cambios son acumulativos y pueden reducir el rendimiento de la lámpara hasta en un 50% en un rango de condiciones típicas que se encuentran en los sistemas de ventilación[18]. En consecuencia, los procedimientos de diseño deben tener en cuenta estas fuentes de variación de salida.

4.Pautas de mantenimiento de los sistemas UVGI

4.1. Remplazo de las lámparas

Las lámparas UV deben reemplazarse al final de su vida útil según las recomendaciones del fabricante del equipo. Aunque las lámparas pueden funcionar hasta dos años consecutivos, es recomendable cambiar las lámparas anualmente (8.760 horas bajo uso continuo) y, por lo tanto, para asegurar que siempre se suministre la dosis adecuada de UV. Las lámparas pueden funcionar mucho tiempo después de su vida útil, pero tendrán una producción muy reducida. Encender y apagar las lámparas con demasiada frecuencia puede provocar un fallo prematuro de la lámpara. Consulte al fabricante para obtener información específica sobre la vida útil esperada de la lámpara en horas y el impacto de encender y apagar la lámpara.

4.2 Eliminación de la lámpara

Las lámparas UV deben desecharse de la misma manera que otros dispositivos que contienen mercurio, como las bombillas fluorescentes comerciales convencionales. La mayoría de las lámparas deben tratarse como residuos peligrosos y no pueden desecharse con los residuos normales. Las bombillas con bajo contenido de mercurio generalmente se pueden desechar como residuos convencionales, sin embargo, algunas jurisdicciones estatales y locales clasifican estas lámparas como residuos peligrosos. La EPA de los Estados Unidos ha promulgado regulaciones de "Residuos universales" a varios tipos de residuos peligrosos, incluidas las bombillas de mercurio. Estas regulaciones permiten a los usuarios tratar las lámparas de mercurio como residuos regulares con el fin de transportarlas a una instalación de reciclaje. Este proceso simplificado fue desarrollado para promover el reciclaje.

4.3 Inspección

Los sistemas UVGI deben incluir un componente de retroalimentación para alertar al personal de mantenimiento de los fallos de la lámpara UVC. Cualquier lámpara averiada debe reemplazarse de inmediato.

En caso de que la lámpara se ensucie debido a una filtración previa inadecuada o a los aerosoles aerotransportados, debe limpiarse. Una lámpara UV se puede limpiar con un paño sin pelusa y un limpiacristales comercial o alcohol.

4.4 Guía de diseño de seguridad

Los sistemas UV en el conducto deben estar completamente cerrados para evitar fugas de luz UV hacia personas o materiales desprotegidos fuera del equipo HVAC.

Todos los paneles de acceso o puertas con acceso a la cámara de la lámpara donde los rayos UV pueden penetrar ya sea directamente o a través de la reflectancia se colocarán con etiquetas de advertencia en los idiomas apropiados. Las etiquetas se colocarán en el exterior de cada panel o puerta en un lugar altamente visible para las personas que acceden al sistema[19].

Las cámaras de la lámpara deberán estar equipadas con un dispositivo de desconexión eléctrica. Los dispositivos de desconexión positiva son preferibles a los interruptores.

Los dispositivos de desconexión deberán poder bloquearse o etiquetarse.

Los dispositivos de desconexión deben ubicarse fuera de la cámara de la lámpara y adyacentes al panel de acceso primario o puerta a la cámara de la lámpara. Los interruptores se cablearán en serie de manera que la apertura de cualquier acceso apague el sistema UV.

Los interruptores de encendido / apagado para lámparas UV no deben ubicarse en la misma ubicación que la iluminación general de la habitación. Los interruptores deben colocarse en una ubicación tal que solo las personas autorizadas tengan acceso a ellos y deben bloquearse para garantizar que no se enciendan o apaguen accidentalmente.

Bibliografía

1. Instituto Americano de Arquitectos. Pautas para el diseño y construcción de hospitales y centros de salud. Washington, DC: AIA, 2001.
2. Sociedad Americana de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado. Manual de diseño de climatización para hospitales y clínicas. Atlanta: ASHRAE, 2003.
3. Manual - Aplicaciones de climatización. Atlanta: s.n., 2003.
4. CDC. Pautas para el control de infecciones ambientales en establecimientos de salud. Atlanta: Centros de Control y Prevención de Enfermedades del Departamento de Salud y Servicios Humanos de EE. UU., 2003.
5. Shinsuke Kato, Minki Sung, -Universidad de Tokio. Usando UVGI para contrarrestar la dispersión de contaminantes. IFHE Digest. 2011
6. Menzies D, Popa J, Hanley JA, Rand T, Milton DK. Efecto de los rayos germicidas ultravioleta instalados en los sistemas de ventilación de la oficina sobre la salud y el bienestar de los trabajadores: prueba cruzada múltiple doble ciego.s.l. : The Lancet Medical Journal, 2003. págs. 1785-91. Vol. 362.
7. Eficacia de las medidas ambientales en la reducción de bioaerosolles potencialmente infecciosos durante la inducción de esputo. Menzies, D., Adhikari, N., Arietta, M., Loo, V. 7, s.l. : Control de infecciones y epidemiología hospitalaria, 2003, vol. 24)
8. Kowalski, W.J., Bahnfleth, W. "Modelos de filtros MERV para aplicaciones aerobiológicas. Air Media.Verano 13-17, 2002.
9. Investigación sobre el efecto de la luz sobre las bacterias y otros organismos. Downes, A., Blunt, T. London: Proceedings of the Royal Society, 1877. 26: 488.
10. Gates, F.L. Sobre derivados nucleares y la acción letal de la luz UV. 1928
11. Davidson, J.N. La bioquímica de los ácidos nucleicos. Londres: Metheun, quinta edición, 1965.
12. Setlow, R.B. Dimmers de pirimidina de tipo ciclobutano en polinucleótidos. Ciencias. 1966, vol. 153: 379-386.
13. Kowalski, W. Manual de irradiación germicida ultravioleta. Berlín: Springer-Verlag, 2009.
14. Kowalski, W. J., Bahnfleth, W. P., Hernández, M. T. Un modelo genómico para la predicción de las constantes de la tasa de inactivación ultravioleta para los virus de ARN y ADN.
15. Luckiesh, M. y Holladay, L. L. Diseño de instalaciones de lámparas germicidas para habitaciones ocupadas.s.l. : General Electric Review, 1942. Vol. 45 (6), 343-349.
16. Philips. Catálogo UVGI y guía de diseño,. No de catálogo U.D.C. 628.9, Países Bajos. 1985.
17. Kowalski, W. J. Diseño y optimización de sistemas de desinfección de aire UVGI. Una tesis en Ingeniería Arquitectónica. s.l. : Penn State, 2001.
18. Bruno Lee, William Bahnfleth, Katja Auer. Simulación del costo del ciclo de vida del sistema de irradiación germicida ultravioleta en conducto.
19. Ingenieros, Sociedad Americana de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado. Manual ASHRAE- Capítulo 16. 2008.

Vea el artículo original en www.sanuvox.com.