

Interim indications for the use of UV germicidal irradiation in the conjuncture of covid-19 pandemic

Indicazioni a interim per l'uso dell'irradiazione UV germicida nel contesto della pandemia covid-19

Francesco Frigerio^{1*}, Massimo Borra², Danilo Cottica¹, Elena Grignani¹, Andrea Militello², Antonella Mansi², Angelo Tirabasso², Giovanna Tranfo², Renata Sisto²

¹ ICS Maugeri Spa SB, Centro Ricerche Ambientali

² INAIL, Istituto Nazionale per l'Assicurazione contro gli Infortuni sul Lavoro)

*Corresponding author: Francesco Frigerio, ICS Maugeri Spa, Environmental Research Centre, Via Salvatore Maugeri, 10 - 27100 Pavia, Italy; Ph. + + 39 0382 592318; Fax. + + 39 0382 592072, e-mail: francesco.frigerio@icsmaugeri.it

DOI: 10.36125/ijohy.v11i1.370

The ultraviolet radiation in the range 100 -280 nm (UV-C) has a well-known germicidal efficiency due to the disruptive mechanism on the nucleic acids, RNA and DNA, of microorganisms. The UV-C based disinfecting technology is commonly used, for example, in biosafety cabinets in hospitals and laboratories.

Although the UV-C would be useful for its germicidal action, caution must be used when the UV-C use could imply human exposure. The phototoxicity of the UV-C radiation can induce damage to most external organs, eyes and skin and exposure limits for acute effects must be respected in order to protect the human health and safety. In addition, the UV-C radiation is known to have stochastic effects and for this reason has been classified by the IARC (International Agency for Research on Cancer) as a class I carcinogenic agent.

The COVID-19 pandemic outbreak raised the question of disinfecting living and working environments especially when they are shared by many people, this issue being particularly urgent in hospitals where the viral concentration due to patients affected by Covid-19 can be very high. Although the hospitals are the environments that most need disinfection, also transport means, markets, schools, commercial centers have to be disinfected in order to control the spreading of the infection. The effectiveness of the UV-C against microorganisms aroused a great interest during the pandemic outbreak, and several new devices for disinfection based on this technology have been proposed in the market with different use. Although there is lack of studies determining precisely the lethal UV-C dose in the case of COVID-19, many studies have been carried out in the recent past regarding the UV-C inactivation efficiency against very similar microorganisms, such as those causing the SARS and the MERS belonging to the same family Coronaviridae. The effectiveness of UV-C radiation in killing microorganisms, including respiratory viruses that were found relatively highly susceptible, is well assessed, but caution must be used when the use of UV-C based technology implies human exposure. The right compromise between effective disinfection objective and human health protection must be found, quantitatively evaluating each specific situation. The limit of human exposure must be respected and an accurate cost/benefit ratio must be evaluated in the case of doses well below the exposure limits for acute effects. In this work, the concepts of lethal dose in terms of irradiance and exposure time are discussed in the light of the human exposure limits with respect to different UV-C radiation practical applications.

Examples are drawn by the literature and by the direct experience of the authors.

This work is addressed, in particular, to medical physicists and biomedical engineers. Technical personnel with adequate expertise could use these indications for developing and maybe sharing specific experiences. Further research is recommended at the aim of improving the disinfection techniques based on optical radiation. Beyond the epidemic conjuncture, this work could be useful also in fighting the increasing spread of multiresistant bacteria in hospitals reducing healthcare personnel exposure to complex mixtures of disinfectants

La radiazione ultravioletta nell'intervallo 100-280 nm (UV-C) ha una ben documentata efficacia germicida dovuta al meccanismo di rottura degli acidi nucleici, RNA e DNA, dei microorganismi. La tecnologia di disinfezione mediante UV-C è usata comunemente, ad esempio, nelle cappe biologiche di ospedali e laboratori. Per quanto l'azione germicida degli UV-C possa renderli utili, è necessario usare cautela quando il loro uso può implicare l'esposizione umana. La fototossicità della radiazione UV-C può provocare danno alla maggior parte degli organi esterni, come occhi e pelle, e i limiti di esposizione per effetti acuti devono essere rispettati per salvaguardare salute e sicurezza delle persone. Inoltre, è noto come la radiazione UV-C abbia effetti stocastici e per questa ragione è stata classificata dalla IARC (Agenzia

Internazionale per la Ricerca sul Cancro) come agente cancerogeno di classe I.

Lo scoppio della pandemia COVID-19 ha sollevato la questione della disinfezione di ambienti domestici e lavorativi, in particolare se condivisi da più persone. Tale problema è particolarmente urgente negli ospedali dove la concentrazione virale può essere molto elevata per la presenza di pazienti COVID-19. Sebbene gli ospedali siano gli ambienti che maggiormente necessitano disinfezione, anche mezzi di trasporto, mercati, scuole e centri commerciali devono essere disinfettati per controllare il diffondersi della malattia.

L'efficacia degli UV-C contro i microorganismi ha suscitato un grande interesse durante l'insorgere della pandemia, facendo comparire sul mercato diversi nuovi strumenti per la disinfezione basati su questa tecnologia, con differenti applicazioni. Nonostante la mancanza di uno studio che determini precisamente la dose letale degli UV-C per il COVID-19, diversi studi negli ultimi anni hanno riguardato l'efficienza dell'inattivazione da parte degli UV-C di microorganismi molto simili, come quelli, appartenenti alla stessa famiglia, Coronaviridae, che causano SARS e MERS. L'efficacia della radiazione UV-C nell'uccisione di microrganismi, inclusi i virus respiratori, particolarmente suscettibili, è ben documentata, ma bisogna usare cautela quando l'uso di tecnologia basata sugli UV-C comporta la possibile esposizione di persone. Bisogna trovare il giusto compromesso tra l'obiettivo di disinfezione efficace e la protezione della salute umana, valutando quantitativamente ogni specifica situazione. Il limite di esposizione umana deve essere rispettato e nel caso di dosi ben al di sotto del limite per esposizioni acute è necessario operare un'accurata valutazione costo/beneficio. In questo lavoro si discutono i concetti di dose letale in termini di irradianza e tempo di esposizione alla luce dei limiti di esposizione umana, rispetto a diverse applicazioni pratiche della radiazione UV-C.

Gli esempi sono stati tratti dalla letteratura e dalla diretta esperienza degli autori.

Questo lavoro è rivolto, in particolare, a fisici medici e ingegneri biomedici. Personale tecnico con adeguata preparazione potrebbe usare queste indicazioni per sviluppare e magari condividere specifiche sperimentazioni. Si raccomandano ulteriori ricerche allo scopo di migliorare tali tecniche di disinfezione basate su radiazioni ottiche. Al di là della situazione di epidemia, questo lavoro può trovare applicazione nella lotta alla diffusione di batteri multiresistenti negli ospedali, contribuendo così a ridurre l'esposizione del personale sanitario a miscele complesse di disinfettanti.

Keywords: UV-C, COVID-19, healthcare personnel exposure

Introduzione

Nel maggio 2020, l'Istituto Superiore di Sanità (ISS) ha emesso il Rapporto COVID-19 n. 25/2020 [ISS, 2020 a], contenente raccomandazioni ad interim sulla sanificazione di strutture non sanitarie nell'attuale emergenza. In questo rapporto, è affermato chiaramente che la radiazione UV-C può essere usata in sicurezza in ambienti chiusi per disinfettare superfici o oggetti se non vi è rischio di esposizione umana.

Prima dell'emergenza sanitaria COVID-19 l'uso di radiazione UV-C, sebbene la sua efficacia germicida fosse ben conosciuta e ampiamente descritta in letteratura, era essenzialmente limitato ad ambienti di lavoro sanitari o di ricerca per mantenere la sterilità del piano di lavoro in cappe biologiche. Il rischio derivante dall'esposizione umana, infatti, scoraggiava l'uso di lampade UV-C, anche quando semplici precauzioni tecniche avrebbero potuto minimizzare tale esposizione.

Anche se l'uso di sorgenti UV-C non si è diffuso molto in Italia in ambienti domestici e di lavoro, applicazioni di UV-C sono state proposte in gran numero e varietà, alcune con possibile esposizione umana, altre senza nessuna possibilità di esposizione. In effetti, il problema di migliorare la qualità dell'aria di interni in presenza di possibili contaminanti microbiologici è stato solle-

vato ben prima dell'epidemia COVID-19. La questione di migliorare la qualità dell'aria di interni inattivando batteri, funghi, virus allo scopo di proteggere lavoratori e abitanti, specialmente i più suscettibili in quanto immunodepressi, è oggetto di molta letteratura scientifica e vengono proposte continuamente nuove soluzioni tecniche. La selezione di ceppi, particolarmente dannosi, di batteri antibiotico-resistenti è causa di molti decessi in ambiente ospedaliero, motivo per cui l'inattivazione batterica nell'aria respirata da pazienti fragili è particolarmente cruciale.

Sono state altresì studiate soluzioni per scenari di attacchi bioterroristici in grandi edifici, in cui un grande numero di persone viene esposto simultaneamente ad agenti patogeni circolanti attraverso i sistemi di ventilazione e aria condizionata.

Benché le UTA (Unità di Trattamento Aria) possano contribuire a diffondere infezioni se non vengono tenuti in considerazione specifici requisiti, impedire semplicemente il ricircolo di aria, come suggerito per il contrasto del coronavirus [ISS, 2020 b], potrebbe non essere sostenibile a lungo termine.

La società americana degli ingegneri esperti di riscaldamento, condizionamento e refrigerazione (ASHRAE),

un importante punto di riferimento per le buone prassi riguardanti i sistemi aeraulici, in un position paper del 2019 [ASHRAE, 2019] considera l'uso di radiazione UV-C come germicida una soluzione appropriata e affidabile.

La tecnologia a UV-C potrebbe rivelarsi particolarmente utile per disinfettare il flusso d'aria in sistemi di ventilazione e aria condizionata.

In questa applicazione, l'UV-C irradia il flusso d'aria in condotti chiusi in modo tale che l'esposizione umana non può verificarsi. Una revisione completa e aggiornata sull'argomento è riportata in [ASHRAE, 2020]. In seguito all'epidemia COVID-19, e ancor di più in vista della riapertura delle normali attività con requisiti di sanificazione da rispettare, è stato proposto sul mercato un numero molto consistente di dispositivi basati sugli UV-C. In questo documento, le problematiche concernenti la sicurezza del Rapporto ISS [ISS, 2020 a] sono ulteriormente dettagliate, con brevi riferimenti e considerazioni riguardanti le diverse tecnologie proposte sinora.

Sono riportati valori di riferimento ed esempi di calcolo, presi dalla letteratura e dall'esperienza degli autori, al fine di aiutare il personale competente in fisica medica e ingegneria clinica, sia in Italia che in altri Paesi toccati da una pandemia tuttora persistente a livello globale, a sviluppare soluzioni sicure ed efficaci. Il possibile uso sicuro di radiazioni UV-C è inoltre discusso per i casi in cui si rende necessario un metodo disinfettante rapido, semplice ed efficace in ambienti altamente contaminati. Viene anche preso in considerazione il possibile uso di UV-C per disinfettare dispositivi di protezione individuale (DPI) in caso di scorte ridotte, con tutte le necessarie precauzioni.

D_{90} e parametri per quantificare l'inattivazione di microrganismi

Le proprietà germicide della radiazione UV-C sono ben conosciute e descritte in letteratura.

Quando una popolazione di N_0 microrganismi viene irradiata con una densità di potenza (più precisamente, irradianza, in W/m^2) costante, il numero di microrganismi sopravvissuti N_s decresce esponenzialmente con il tempo.

L'integrale dell'irradianza nel tempo è chiamato esposizione radiante, o H_0 , ed è espresso in J/m^2 . In letteratura, l'esposizione radiante è spesso definita anche fluenza o dose, in quanto si tratta della densità totale di energia che colpisce il bersaglio.

Seguendo la norma tecnica della Commissione Interna-

zionale per l'Illuminazione CIE 155:2003, [CIE, 2003], è valida la seguente relazione:

$$\frac{N_s}{N_0} = e^{-k \cdot H_0} \quad (1)$$

Se definiamo D_{90} la dose di UV necessaria per inattivare il 90% dei microrganismi, $N_s/N_0 = 0,1$ e la costante di decadimento k , ovvero l'inverso della dose a cui la popolazione è ridotta di $1/e$, derivata dall'equazione (1) è:

$$k = \left| \frac{\ln(0.1)}{D_{90}} \right| \quad (2)$$

Molte pubblicazioni riportano D_{90} espressa come esposizione radiante; in altri casi, il logaritmo in base 10 di N_0/N_s è riportato rispetto alla dose in J/m^2 .

Una inattivazione logaritmica di $n=4$, ad esempio, significa che una frazione pari a 10^{-4} della popolazione iniziale è sopravvissuta all'effetto germicida o, in altri termini, che il 99,99% dei microrganismi è stato inattivato.

Per un determinato D_{90} , dall'equazione (1) è possibile calcolare la dose necessaria per ottenere una inattivazione logaritmica pari a n , semplicemente moltiplicando D_{90} per n .

$$D_n = D_{90} \frac{\ln(10^{-n})}{\ln(0.1)} = n D_{90} \quad (3)$$

Dipendenza dalla lunghezza d'onda

L'inattivazione logaritmica dipende dalla lunghezza d'onda della radiazione, ma ricerche approfondite su questo argomento sono state limitate finora dalla disponibilità di sorgenti capaci di emettere un'adeguata quantità di radiazioni non ionizzanti nella gamma UV-C.

Nel 2014, Beck et al. [Beck et al., 2014] hanno studiato l'inattivazione di una varietà di diverse specie microbiche confrontando l'effetto dell'irradiazione con un laser a lunghezza d'onda regolabile con quella della sorgente più usata fino ad allora, la lampada UV a scarica in vapori di mercurio. In effetti, la maggior parte dei microrganismi mostra una certa sensibilità intorno ai 260 nm, anche se sotto i 240 nm è stato mostrato che la suscettibilità aumenta al decrescere della lunghezza d'onda.

La Figura 1 mostra lo spettro di una lampada UV montata in una cappa biologica: il picco di lunghezze d'onda è a 253,7 nm.

Altri picchi UV sono a 311 e 365 nm ma sono confrontabili in intensità all'emissione di luce visibile, mentre il picco UV-C è così intenso che, in scala lineare, è distinguibile soltanto l'emissione visibile a 434 nm.

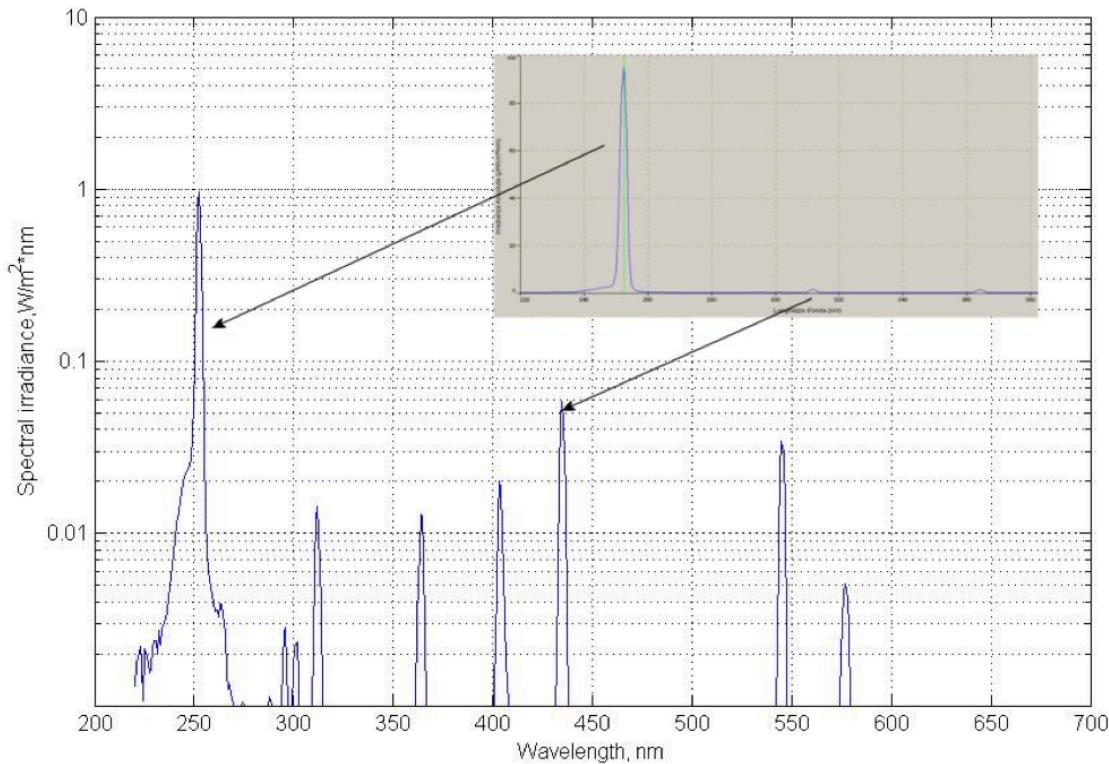


Figura 1: spettro di una lampada germicida montata in una cappa biologica, in scala logaritmica e lineare

Problemi di sicurezza fotobiologica

Gli effetti sulla salute umana dell’esposizione alla radiazione UV sono affrontati nelle linee guida della Commissione Internazionale per la Protezione dalle Radiazioni Non Ionizzanti [ICNIRP, 2004].

I valori limite di esposizione (VLE) riportati nelle linee guida ICNIRP sono stati recepiti per i lavoratori nella Direttiva dell’Unione Europea 2006/25/EC. In Italia, altre nazioni UE e Regno Unito, la Direttiva ha valore di legge per la protezione dei lavoratori contro i rischi derivati da radiazioni ottiche artificiali.

L’esposizione di pelle e occhi non protetti a radiazioni UV-C e UV-B non deve superare, in un turno lavorativo di 8 ore (Texp8h), la dose di 30 J/m².

Questa è calcolata come esposizione radiante efficace *H_{eff}*, data da:

$$H_{eff} = \int_0^{T_{exp8h}} E_{eff} \cdot dt \quad (4)$$

dove *E_{eff}* è l’irradianza spettrale pesata sullo spettro d’azione per la valutazione del rischio *S_λ*, derivato dalla composizione degli spettri d’azione che considerano effetti sia oculari che epidermici, e integrato sulla lunghezza d’onda:

$$E_{eff} = \sum_{\lambda=180\text{ nm}}^{\lambda=400\text{ nm}} E_{\lambda} \cdot S_{\lambda} \cdot \Delta\lambda \quad (5)$$

Lo spettro di radiazione efficace *S_λ*, tabulato da ICNIRP, è mostrato in Figura 2.

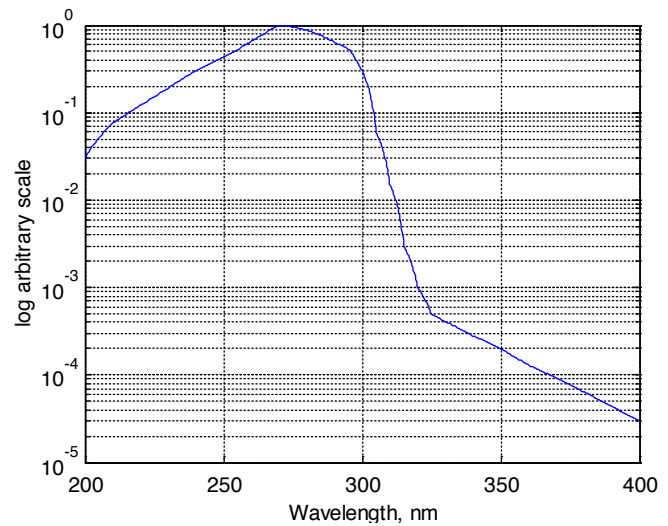


Figura 2: spettro d’azione efficace *S_λ*, per la protezione di occhi e pelle, ICNIRP 2004 [Health Physics, 2004]

Il limite descritto nella (4) dovrebbe essere considerato come assoluto per l’esposizione oculare.

In effetti, i VLE di ICNIRP sono stati sviluppati considerando popolazioni dalla pigmentazione chiara (ovvero bianchi caucasici) con la maggiore sensibilità e suscettibilità genetica a tumori della pelle. ICNIRP dichiara che *esposizioni occasionali a pelle condizionata potrebbero non risultare in effetti avversi*. Nella Direttiva Europea 2006/25/EC, il limite è stato fissato per la protezione di occhi e pelle contro alcuni degli effetti che possono verificarsi per

eccessiva esposizione UV: “fotocheratite, congiuntivite, catarattogenesi, eritema, elastosi, tumori della pelle”. Per la protezione dell’occhio dal rischio di cataratta fotochimica, l’irradianza UVA

$$E_{UVA} = \sum_{\lambda=315\text{ nm}}^{\lambda=400\text{ nm}} E_{\lambda} \cdot \Delta\lambda \quad (6)$$

deve essere anch’essa limitata in modo che, in un turno di 8 ore, sia $H_{UVA} < 10 \text{ kJ/m}^2$.

È importante notare che, in letteratura, quando si considera la dose di inattivazione dei microorganismi, H_0 è normalmente riferito all’integrale nel tempo dell’irradianza intorno al picco di 254 nm, il più efficace come germicida. Il flusso di energia in altri intervalli non è tenuto in considerazione nel calcolo di D_{90} . Quando si considerano problemi di sicurezza, l’irradianza di interesse E_{eff} è derivata dalla convoluzione dello spettro di irradianza con la curva di efficacia biologica relativa tracciata in Figura 2. Tuttavia, quando si considerano le lampade disinfettanti, poichè quasi tutta l’azione germicida dello spettro è concentrata nelle emissioni centrate a 254 nm, in pratica H_{eff} può essere facilmente derivato moltiplicando H_0 per 0,5 che è il valore di S_{λ} a 254 nm.

Sorgenti alternative alle lampade a vapori di mercurio

Sono state proposte diverse sorgenti, come i diodi a emissione di luce (LED), e con diverse caratteristiche spettrali. Teoricamente, i LED potrebbero essere fabbricati con un picco di emissione alla lunghezza d’onda desiderata, e il problema ambientale dovuto al mercurio nelle lampade germicide sarebbe evitato. Tuttavia, la tecnologia LED a UV non è ancora sviluppata quanto quella dei LED a luce visibile e non può ancora competere con le più comuni lampade a mercurio a bassa pressione [Bowker et al., 2011], limitando così, fino a oggi, l’effettiva praticità di dispositivi a LED alla sanificazione di piccoli oggetti, ad esempio gli smartphone. Sul mercato sono continuamente proposte un gran numero di applicazioni di questo tipo; considerando la grande varietà delle prestazioni dei LED e la consistente domanda causata dalla pandemia, non è semplice verificare efficacia e sicurezza di questi dispositivi. In effetti, i produttori di dispositivi che utilizzano sorgenti UV per la disinfezione di oggetti dovrebbero fornire chiare informazioni spettroradiometriche, oltre che sull’effettiva capacità germicida dei prodotti. Bisogna notare che, a causa della scala logaritmica della Figura 2, un piccolo spostamento nella lunghezza d’onda potrebbe comportare una diversa efficacia germicida della radiazione; va notato altresì che i valori di D_{90} si riferiscono generalmente alla radiazione a 254 nm delle comuni lampade a vapori di mercurio. Come alternativa alle lampade contenenti mercurio, sono stati proposti sistemi basati su lampade pulsate allo xeno [Chetan et al., 2015]. Le lam-

pade allo xeno hanno uno spettro continuo di emissione che si estende dai raggi UV agli infrarossi, quindi, per raggiungere una sufficiente efficacia germicida senza rischi per l’operatore, devono essere usate in modo pulsato e la radiazione emessa deve essere adeguatamente filtrata. Ancora una volta, i risultati sono fortemente dipendenti dallo spettro effettivo e dall’irradianza media, pertanto l’efficacia di questi sistemi è ancora in discussione nella letteratura [Health Quality Ontario, 2018]. In ogni caso, sistemi UV pulsati allo xeno sono normalmente ideati per operare in assenza di persone. Bisogna sottolineare, tuttavia, che la maggior parte delle finestre trasparenti nei posti di lavoro sono efficaci nello schermare dagli UV-C, così che le lampade a mercurio, avendo una debole emissione visibile, sono ampiamente utilizzate nelle cappe biologiche. Lo spettro UV delle lampade pulsate allo xeno, invece, è tendenzialmente accompagnato da una forte luce visibile. Rapidi impulsi di luce visibile intensa possono causare fastidio e persino rappresentare un fattore di rischio per soggetti sensibilizzati [Veitch, et al., 1995]. Tutte le sorgenti di radiazioni ottiche possono rappresentare, in grado variabile, un rischio potenziale per soggetti esposti in maniera dipendente dal loro spettro di emissione, dalla loro efficacia biologica e dall’intensità dell’emissione nelle differenti bande spettrali. Raggi ultravioletti nella banda UV-C, che possiedono la maggior efficacia germicida, pur essendo la componente dello spettro a energia più alta sono meno pericolose per l’uomo dei loro “cugini” UV-B e UV-A, almeno dal punto di vista degli effetti deterministici conosciuti. Per questo, le lampade a vapori di mercurio a bassa pressione, che concentrano la maggior parte del loro flusso radiante nella banda UV-C, sono relativamente meno pericolose per lo stesso livello di potenza totale emessa delle loro controparti allo xeno con significative emissioni UV-B, UV-A e visibili. Come riportato in letteratura, l’irradiazione UV è efficace solo sulla superficie degli oggetti direttamente in linea di vista rispetto alla sorgente, motivo per il quale non si raccomanda il suo utilizzo nella sanificazione di tessuti spessi o di qualunque oggetto con superfici in ombra. Un altro problema rilevante della sanificazione di oggetti con raggi UV è che questi sono una importante causa di invecchiamento di molti materiali; diversi metodi di prova sono stati stabiliti [ASTM, 2018; ISO, 2016] per testare l’effetto della radiazione solare su prodotti di consumo. Siccome la radiazione UV germicida ha uno spettro molto diverso, in assenza di prove specifiche è impossibile prevedere gli effetti di trattamenti ripetuti. Anche l’uso del cosiddetto UV-C lontano potrebbe rivelarsi promettente, dal momento che è stata dimostrata una sensibilità dei virus [Welch et al., 2017] intorno ai 220 nm, confrontabile con quella per i 254 nm. In questo intervallo, tuttavia, lo spettro d’azione visto in Figura 2 si ferma intorno a 0,12 contro 0,5 dei 254 nm. Per questo, in confronto alle

comuni lampade a mercurio, è possibile incrementare la dose germicida, e di conseguenza il valore di inattivazione logaritmica, rimanendo nei limiti di esposizione per occhi e pelle, senza considerare però i possibili effetti stocastici. Lo studio è stato condotto su aerosol generati in laboratorio, esposti a radiazioni emesse da lampade a eccimeri (Kr-Cl). Queste lampade hanno uno spettro di emissione più ampio rispetto alle lampade a mercurio e hanno dovuto essere filtrate per l'esperimento. Sono necessarie ulteriori ricerche in quanto, una delle motivazioni principali per cui la radiazione a 220 nm è poco nociva per la pelle è il forte assorbimento da parte dell'acqua; l'efficacia di questa lunghezza d'onda nei confronti di virus all'interno di goccioline andrebbe quindi confermata. Inoltre, sotto i 250 nm la quantità di ozono, generato da processi fotochimici, cresce, in quanto la produzione di ozono è una funzione incrementale dell'energia dei fotoni. Nel Rapporto 155:2003, la CIE ha sottolineato i rischi della produzione di ozono da parte delle sorgenti delle lunghezze d'onda corte dell'UV-C lontano, nonostante le interessanti proprietà disinfettanti; gli autori dello studio [Welch et al., 2017] hanno riferito in effetti una concentrazione di ozono molto bassa (<0,005 ppm). Uno studio molto recente [Szeto et al., 2020] ha mostrato che la combinazione di luce ultravioletta da vuoto (VUV) a 185 nm e UV-C a 254 nm, entrambe emesse dalle lampade a vapori di mercurio a bassa pressione, aumenta l'efficacia germicida della sola emissione a 254 nm. Questo fenomeno può essere spiegato sia dal maggiore potere ionizzante del VUV rispetto agli UV-C, sia dalla produzione di ozono, che potrebbe interagire sinergicamente con l'effetto germicida della radiazione UV. Gli autori hanno mostrato l'efficacia disinfettante di VUV e UV-C combinati nei confronti di microrganismi molto diversi come il virus dell'influenza e il *Mycobacterium tuberculosis* (MTB). L'efficienza dell'inattivazione microbica di UV-A (365 nm), UV-C (254 nm) e UV-D (180 nm) è stata confrontata da Wang [Wang et al., 2019]. Gli autori hanno studiato sia l'inattivazione di *Escherichia coli* aerotrasportato sia la rimozione di endotossine. UV-C e UV-D si sono rivelati molto più efficaci degli UV-A nei confronti dell'inattivazione di *Escherichia coli* aerotrasportato e solo gli UV-D sono stati in grado di degradare e rimuovere l'endotossina, molto probabilmente grazie alla produzione di ozono. I vantaggi e svantaggi dell'uso di ozono vanno oltre lo scopo di questo lavoro. Nei seguenti paragrafi, verrà trattato soltanto l'uso di lampade germicide UV-C con picco a 254 nm.

Utilizzi pratici degli UV nell'emergenza COVID-19

Molti ricercatori si sono impegnati nel realizzare dispositivi per la disinfezione di attrezzature o posti di lavoro; in questo lavoro si riportano alcuni riferimenti presenti in letteratura in particolare sulle dosi germicide. Kowal-

sky [Kowalsky et al., 2020] ha riportato una D_{90} media per i coronavirus di 67 J/m² (7 – 241 J/m²); per ottenere una inattivazione logaritmica pari a 4 è necessaria, secondo l'equazione (3), un'esposizione radiante di 268 J/m². Meechan e Wilson [Meechan e Wilson, 2006] usano una dose di riferimento di 300 J/m², come riportato dal produttore della loro cappa biologica, per organismi formanti spore, meno sensibili dei virus. Riportano anche una serie di misurazioni dell'irradianza in varie posizioni vicino alle lampade germicide, considerando anche gli effetti dei dispositivi di protezione individuale (DPI). I tessuti degli indumenti comuni possiedono gradi di attenuazione della radiazione UV molto differenti, in base alla composizione e alla massa specifica. Esperimenti condotti a Pavia hanno evidenziato i valori di frazione trasmessa riportati in Tabella 1.

Tabella 1: Frazione di irradianza a 254 nm trasmessa attraverso abbigliamento e DPI differenti

	Frazione di irradianza a 254 nm trasmessa
Camice di laboratorio sterile monouso	0,051
Visiera	0,003
Guanti in nitrile (doppi)	0,003
Uniforme infermieristica standard	0,003

Le frazioni minori riportate in Tabella 1 (0,003) sono coerenti con il valore ottenuto da Meechan e Wilson che, usando un'irradianza di 2,82 W/m², hanno misurato la frazione trasmessa attraverso una tuta Tyvek; l'irradianza trasmessa attraverso la tuta Tyvek era di circa 10⁻² W/m², che coincide con la sensibilità dello strumento (Ocean Optics HR 4000). Altre misurazioni sono tratte da un documento presente sul Portale Agenti Fisici, gestito da INAIL e dalla USL Toscana Sud Est [Pinto et al., 2015]. In questo lavoro, si è calcolato il limite inferiore del tempo di esposizione necessario a raggiungere il VLE (il massimo tempo di esposizione consentito) con e senza dispositivi di protezione, riportato in Tabella 2 in secondi e in minuti, come funzione di diversi valori di irradianza tipica, anch'essi riportate in Tabella 2. Tali valori massimi dei tempi di esposizione, permessi ai fini della radioprotezione, sono confrontati con i tempi minimi per l'inattivazione microbica (per i coronavirus, nel nostro report). Il tempo minimo di esposizione è stato calcolato rispetto a una dose germicida di 300 J/m² (uguale a una inattivazione 4-logaritmica); i massimi tempi di esposizione permessi sono stati calcolati per una dose limite di 30 J/m² come *Heff*. I tempi massimi di esposizione consentiti sono stati calcolati assumendo una attenuazione lineare di 0,003 per la radiazione UV-C che raggiunge la pelle, a causa dei DPI indossati.

Tabella 2: tempo minimo per ottenere una inattivazione 4-logaritmica e tempi massimi di esposizione consentiti per diverse irradiazioni germicide. I tempi massimi di esposizione consentiti sono riportati assumendo una attenuazione di $3 \cdot 10^{-3}$ dovuta ai DPI indossati. Il tempo minimo di inattivazione è dell'ordine di 1-2 minuti mentre i tempi massimi di esposizione consentiti sono maggiori di mezz'ora.

Sorgente e condizioni di esposizione	E W/m ²	E _{eff} W/m ²	t minimo (s) per inattivazione 4-logaritmica	t max (s) per VLE senza DPI	t max (min) per VLE con DPI
Sistema a parete a parete, 55 cm [Pinto et al., 2015]	3.60	1.80	83	17	93
Cappa biologica, 20 cm dall'apertura [Pinto et al., 2015]	1.60	0.80	188	38	208
Piano di lavoro di cappa biologica, braccia esposte [Meechan e Wilson, 2006]	2.82	1.41	106	21	118

Considerando che i tempi nell'ultima colonna sono espressi in minuti mentre i tempi minimi di inattivazione sono espressi in secondi, lavorare sotto diretta esposizione a UVC germicidi, per quanto sconsigliabile in condizioni normali, può essere un'opzione in condizioni di emergenza quando i DPI sono indossati per tutto il turno di lavoro. Anche considerando la maggiore trasmittanza dei camici di laboratorio sterili monouso (0,051), posto come unico indumento indossato dall'operatore, il tempo di superamento del VLE sarebbe comunque dell'ordine di alcuni minuti, comunque confrontabile con il tempo minimo per una inattivazione 4-logaritmica. Queste potrebbero essere le condizioni all'interno degli ospedali COVID-19, ad esempio nelle aree comuni. Dal momento che il personale della terapia intensiva e sub-intensiva non può rimuovere i propri dispositivi di protezione durante la permanenza in aree comuni, essendo queste altamente contaminate ed essendo la rimozione dei dispositivi di protezione un'operazione molto delicata che non andrebbe ripetuta durante il turno lavorativo, indossare i DPI per l'intera durata del turno può essere una condizione normale.

Vale la pena notare che, anche con i DPI, non si possono consentire più di 30 minuti di esposizione a irradiazioni germicide efficaci. In un case report del 2012 [Zaffina et al., 2012] è stato descritto un incidente che ha riguardato due infermiere che hanno lavorato per circa 1 ora sotto la diretta esposizione della lampada germicida di una cappa biologica, per la preparazione di farmaci. La verifica successiva all'incidente ha evidenziato un superamento dei VLE di 126 volte per gli occhi e di 194 volte per la pelle del volto. In effetti, nello svolgimento di un normale compito lavorativo, l'osservazione diretta della lampada avviene solo per una frazione del tempo. Sintomi gravi sono stati rilevati a carico di occhi e pelle del viso, nulla invece ai danni degli avambracci che erano protetti dal vestiario. L'esposizione con DPI è calcolata in Tabella 2 assumendo un'attenuazione di un fattore $3 \cdot 10^{-3}$,

che potrebbe essere sovrastimato per la sensibilità delle misure. Tuttavia, la Tabella 1 mostra che tra differenti materiali possono esistere grandi differenze nell'attenuazione di UV e i produttori al momento non forniscono certificazioni a riguardo. In ogni caso, le misurazioni riportate sono state eseguite a distanze ben inferiori a 1 metro, mentre gli spazi di lavoro sono generalmente più ampi. Per questo motivo, il personale che indossa DPI e si muova per le stanze, a distanza variabile dalle sorgenti, potrebbe essere idoneamente protetto dagli UV-C, nonostante in aree altamente contaminate le lampade germicide siano tenute accese continuamente.

Quello discusso finora è uno scenario di emergenza; quello che è importante considerare è che, essendo l'esposizione a radiazioni efficaci nell'uccisione di microrganismi potenzialmente molto dannosa per l'uomo, l'uso di lampade germicide in presenza di persone andrebbe sempre evitato. Se la disinfezione di superfici e oggetti si rende necessaria è bene, piuttosto che installare lampade in posizioni fisse, orientarsi su soluzioni più sofisticate rese disponibili dalle moderne tecnologie, come lampade installate a bordo di droni, capaci di trattare stanze specifiche obbedendo a protocolli predefiniti.

Irradiazione di DPI

In generale, i DPI possono essere riutilizzati solo se espressamente previsto dal produttore e con specifico protocollo di sanificazione dallo stesso previsto. L'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS) considera tra gli altri [WHO, 2020] l'uso di UV-C nel ritrattamento di DPI in caso di grave penuria. Nella progettazione di metodi e dispositivi per unità di ritrattamento con UV-C vanno affrontati gli stessi problemi di cui si è discusso riguardo la disinfezione di piccoli oggetti, considerando che alcune superfici potrebbero non ricevere la dose germicida necessaria. Tuttavia, con l'irradiazione UV-C, non sarebbero necessari agenti chimici i cui residui richiederebbero un controllo; inoltre, in linea di principio, la dose germicida

può essere raggiunta in tempi molto brevi. L'uso di radiazione ultravioletta nella sterilizzazione di DPI (guanti, occhiali, visiere di protezione, camici, mascherine filtranti) è un argomento ancora da esaminare. I produttori di DPI riutilizzabili devono fornire procedure precise e sicure per la sanificazione dei loro prodotti, che può includere oppure no l'uso di UV. Riguardo i DPI monouso, invece, pur essendo in molti casi l'uso di UV il metodo di decontaminazione più promettente, esso è ancora altamente dipendente dalla dose e, va da sé, dalla lunghezza d'onda utilizzata. Si riporta di seguito una breve panoramica dei problemi che interessano ciascun dispositivo.

Guanti

I guanti sono tra i DPI più comuni ed economici. L'utilità dei guanti è data dalla funzione di barriera svolta dal materiale che li costituisce. Per questo motivo, i metodi di sterilizzazione usati per i guanti dovrebbero sempre garantire l'integrità di questi materiali. I guanti monouso utilizzati negli ambienti sanitari possono essere di vari materiali (nitrile, lattice, polietilene); queste sostanze sono di norma degradate facilmente dagli UV [Lambert et al., 2013; Noriman et al., 2010; Yousif et al., 2013], causando la perdita in elasticità e forza tensiva dei guanti stessi [Handke, 2019]. Sarebbe tuttavia interessante investigare più a fondo sull'esposizione agli UV non solo in termini di dose (J/m^2) ma anche in termini di caratteristiche spettrali della radiazione UV, per valutare gli effetti di differenti lunghezze d'onda su diversi materiali. I dati di letteratura mostrano che la degradazione dei materiali avviene più velocemente quando il materiale è esposto a UV per scopi di disinfezione, che nel caso del semplice uso degli stessi guanti.

Occhiali e visiere protettivi

Goccioline di liquido e schizzi potenzialmente infetti diretti verso gli occhi possono essere bloccati da specifici occhiali di protezione o da visiere che coprono la faccia fino al mento. La parte ottica, ovvero le lenti degli occhiali, è normalmente in policarbonato per le sue ottimali caratteristiche ottiche e meccaniche. Come altri materiali plastici anche il policarbonato, se esposto a radiazione UV, può subire processi di fotodegradazione [Rivaton, 1986; Factor, 1996] che causano ingiallimento, perdita di durezza, infragilimento e rottura [Tjandraatmadja, 1999]. Anche in questo caso, come per i guanti, è ancora da stabilire per quali dosi gli effetti di fotodegradazione raggiungono livelli di alterazione delle caratteristiche ottiche e meccaniche tali da ridurre l'efficacia dei dispositivi di protezione a livelli inaccettabili. A questo riguardo, la certificazione Europea standard per i dispositivi di protezione degli occhi (EN 166:2000) garantisce, per i dispositivi certificati, una certa resistenza UV, senza specificare le dosi. Lo standard richiede l'irradiazione UV del dispo-

sitivo con una lampada allo xeno ad alta pressione con una potenza tra i 400 e i 500 W e una trasmissione spettrale che garantisca almeno il 30% della potenza nella gamma UV-C, per una durata di 50 ore e a una distanza di 30 cm. Il fattore di trasmissione della luce del dispositivo irradiato non deve differire di più del 5% dal valore iniziale. Secondo questo standard, i DPI oculari certificati sono garantiti per una dose UV-C di circa $2.39 \cdot 10^7 J/m^2$.

Mascherine monouso con filtro facciale

Le mascherine filtranti monouso sono progettate per ridurre l'esposizione all'inalazione di particolari contaminanti (come goccioline e aerosol). L'azione filtrante è garantita dal particolare tessuto non-tessuto (polietilene e/o polipropilene) di cui le mascherine sono composte. Tali mascherine sono tra i dispositivi maggiormente usati durante l'emergenza sanitaria COVID-19, da cui la grave penuria di scorte. Diversi studi hanno valutato la possibilità di riutilizzare le mascherine dopo diversi tipi decontaminazione, testandone l'efficienza dopo il processo. È stato osservato che l'uso di UV è tra i metodi di decontaminazione più promettenti, ma l'efficacia è molto dipendente dalla dose capace di penetrare il tessuto filtrante [Vo et al., 2009] e dalla forma della mascherina [Heimbuch et al., 2019]. Alcuni studi hanno irradiato a dosi di UV-C tra 10 e 18 kJ/m^2 mascherine contaminate con goccioline contenenti influenza H1N1, riscontrando una significativa riduzione della vitalità (inattivazione logaritmica >3) [Mills et al., 2018; Heimbuch et al., 2011]. Sono state registrate accettabili capacità di filtrazione e resistenza alla respirazione per differenti modelli di mascherina, esposte a varie dosi ($5 \cdot 10^3$ - $9.50 \cdot 10^2 J/m^2$) di UV-C [Heimbuch et al., 2019; Viscusi et al., 2009, Bergman et al., 2010; Viscusi et al., 2007, Lindsley et al., 2015; Bergman et al., 2011]. Uno studio [Vo et al., 2009] ha rivelato anche problemi di integrità delle bande elastiche. Come sostenuto anche dall'OMS, i differenti metodi e risultati trovati in letteratura non portano a definire un protocollo che tenga conto di tutti i parametri [Viscusi et al., 2007].

Camici

I camici medici possono essere fatti di diversi materiali in base alla loro riutilizzabilità. I camici riutilizzabili sono in cotone mentre quelli monouso sono generalmente in materiale plastico (propilene o polipropilene). Anche se l'uso di UV per la disinfezione di camici in cotone potrebbe essere efficace e non portare a un deterioramento apprezzabile delle fibre [Perincek et al., 2014], il loro trattamento disinfettante d'elezione rimane quello con acqua calda, sapone e disinfettanti, ad esempio cloro [WHO, 2020]. Inoltre, come nel caso delle mascherine, non è sicuro che gli UV sarebbero in grado di eliminare tutti i patogeni dai camici, a causa delle zone in ombra create dalle pieghe del tessuto.

Disinfezione con UV-C dei sistemi di riscaldamento, ventilazione e aria condizionata

Irradiazione UV-C del volume superiore

Questa è la soluzione più semplice per la disinfezione dell'aria con UV-C. Le lampade UV-C sono posizionate nella parte alta della stanza e l'irradiazione è diretta verso il soffitto. In questa condizione, occhi e pelle degli occupanti sono al di fuori della direzione di propagazione del flusso diretto di radiazioni e sono esposti solamente al campo di radiazione diffuso. Questa soluzione è stata proposta per ospedali e sale d'attesa di ambienti sanitari, ma anche per le scuole, allo scopo di ridurre la diffusione del morbillo. Recentemente, durante la pandemia COVID-19, lampade UV-C per il volume superiore sono state proposte per disinfettare l'aria all'interno di aeroplani, treni e bus. L'irradiazione UV-C del volume superiore per l'inattivazione dei microrganismi aerotrasportati è basata sul fenomeno fisico della convezione. Le correnti d'aria si muovono dal basso verso l'alto e viceversa e il rimescolamento d'aria assicura la disinfezione del volume totale. Spesso si aggiungono sistemi di ventilazione per assicurare la buona circolazione e il rimescolamento dell'aria. Le lampade UV-C per il volume superiore dovrebbero operare continuamente, rendendo questi sistemi molto dispendiosi in termini energetici.

In aggiunta, è necessario prevenire gli effetti sulla salute dall'esposizione alla radiazione UV-C. Nelle linee guida ASHRAE una irradianza massima $E_{\text{vol-sup}} = 4 \text{ mW/m}^2$ all'altezza dell'occhio è considerata uno standard di progetto accettabile e le linee guida riferiscono che a questi livelli di radiazioni non sono stati osservati effetti avversi sulla salute. Bisogna ricordare che con una $E_{\text{vol-sup}}$ di 4 mW/m^2 , la massima dose consentita di radiazione UV-C su occhi e pelle non protetti è raggiunta approssimativamente in 4 ore. Questo tempo di esposizione non deve essere superato. In conclusione, il sistema deve essere dimensionato in modo che la massima dose consentita di UV-C

di 30 J/m^2 non sia superata, tenendo in considerazione il tempo massimo di esposizione di uno o più occupanti. L'irradiazione UV-C del volume superiore è una buona soluzione quando il tempo di esposizione degli occupanti non è prolungato, ad esempio in treni, metropolitane, bus, aeroplani. Questa soluzione andrebbe evitata se i lavoratori sono presenti per tutto il turno di lavoro o una sua grossa frazione. L'esposizione cronica a radiazione UV-C deve essere evitata, anche se la dose massima di esposizione per effetti acuti non è superata, a causa degli effetti cancerogeni degli UV-C.

Disinfezione in condotto

Nella disinfezione in condotto non può avvenire alcuna esposizione umana agli UV-C se non durante la manutenzione. A causa della velocità dell'aria nel condotto, il tempo disponibile per la disinfezione è molto breve, nell'ordine di 1 s o meno. Come conseguenza, l'irradianza delle sorgenti dev'essere molto alta per raggiungere una disinfezione efficace. L'ASHRAE indica un intervallo per l'irradianza germicida dalle decine alle centinaia di W/m^2 . Per incrementare il livello di irradianza e l'uniformità nel condotto, è suggerito il rivestimento della superficie interna dei condotti con materiali caratterizzati da un'alta riflessione delle lunghezze d'onda UV-C, come l'alluminio. La ASHRAE assume una velocità dell'aria tipica di $2,5 \text{ m/s}$; a questa velocità, una zona di disinfezione della lunghezza di $2,5 \text{ m}$ consente un tempo di esposizione di 1 s. I sistemi in condotto sono progettati con tempi di esposizione superiori di $0,25 \text{ s}$. Se la lunghezza della zona di disinfezione è di 5 m , si arriva a 2 s di tempo di esposizione. In queste condizioni, assumendo una dose germicida di 400 J/m^2 , sarebbe necessaria un'irradianza di 200 W/m^2 . Studi di laboratorio, principalmente condotti su microrganismi inattivati, hanno mostrato l'efficacia dei sistemi disinfettanti per flussi d'aria in movimento. Il limite più importante per questi sistemi è che devono operare in continuo, fatto che li rende piuttosto costosi.

Bibliografia

ASHRAE, 2019. Handbook 62.2 —HVAC Applications Ultraviolet Air and Surface Treatment, 2.

ASHRAE, 2020. Position Document on Infectious Aerosols. approved on April 14 2020 expires on April 14, 2023.

ASTM, 2018. ASTM D1148 – 13. Standard Test Method for Rubber Deterioration—Discoloration from Ultraviolet (UV) or UV/Visible Radiation and Heat Exposure of Light-Colored Surfaces.

Beck et al., 2014. Action spectra for validation of pathogen disinfection in medium-pressure ultraviolet (UV) systems.

Water Research, Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.11.028>

Bergman, M., et al., 2010. Evaluation of Multiple (3-Cycle) Decontamination Processing for Filtering Facepiece Respirators. Journal of Engineered Fibers and Fabrics, 5 (4), 33 - 41.

Bergman, M., et al., 2011. Impact of Three Cycles of Decontamination Treatments on Filtering Facepiece Respirator Fit. Journal of the International Society for Respiratory Protection, 28 (1), 48 - 59.

- Bowker et al., 2011. Microbial UV fluence-response assessment using a novel UV-LED collimated beam system. *Water Research*, Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.12.005>
- Chetan et al., 2015. Can pulsed xenon ultraviolet light systems disinfect aerobic bacteria in the absence of manual disinfection? *American Journal of Infection Control*, 43, 415 – 417. [https://www.ajicjournal.org/article/S0196-6553\(14\)01398-4/fulltext](https://www.ajicjournal.org/article/S0196-6553(14)01398-4/fulltext)
- CIE, 2003. COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ÉCLAIRAGE Technical Report CIE 155:2003 Ultraviolet Air Disinfection. ISBN 978 3 901906 25 1
- Factor, A., 1996. Mechanisms of thermal and photodegradation of bisphenol A polycarbonate. In *Advanced Chemistry Series (Polymer Durability)*, 59 - 76.
- Handke, D.C., 2019. Examining the Effects of UV on Latex and Nitrile Glove Degradation. An undergraduate thesis presented to the Faculty of The Environmental Studies Program at the University of Nebraska – Lincoln.
- Health Quality Ontario, 2018. Portable ultraviolet light surface-disinfecting devices for prevention of hospital-acquired infections: a health technology assessment. *Ont. Health Technol. Assess. Ser.*, 18 (1), 1 - 73. Available from: <http://www.hqontario.ca/evidence-to-improve-care/journal-ontario-health-technology-assessment-series>
- Heimbuch, B.K., et al., 2011. A pandemic influenza preparedness study: use of energetic methods to decontaminate filtering facepiece respirators contaminated with H1N1 aerosols and droplets. *American Journal of Infection Control*, 39 (1), e1 - e9.
- Heimbuch, B.K., Harnish, D., 2019. Research to Mitigate a Shortage of Respiratory Protection Devices During Public Health Emergencies. (<https://www.ara.com/news/ara-research-mitigate-shortage-respiratory-protection-devices-during-public-health-emergencies>).
- ICNIRP, 2004. Guidelines on limits of exposure to ultraviolet radiation of wavelengths between 180 nm and 400 nm (incoherent optical radiation). *Health Physics*, Vol. 87, n° 2.
- ISO, 2016. ISO 4892-3:2016. *Plastics — Methods of exposure to laboratory light sources — Part 3: Fluorescent UV lamps*.
- ISS, 2020 a. Rapporto ISS COVID-19 n. 25/2020. Raccomandazioni ad interim sulla sanificazione di strutture non sanitarie nell'attuale emergenza COVID-19: superfici, ambienti interni e abbigliamento. Versione del 15 maggio 2020.
- ISS, 2020 b. Rapporto ISS COVID-19 n. 5/2020 Rev. 2 - Indicazioni ad interim per la prevenzione e gestione degli ambienti indoor in relazione alla trasmissione dell'infezione da virus SARS-CoV-2. Versione del 25 maggio 2020.
- Kowalski et al., 2020. COVID-19 Coronavirus Ultraviolet Susceptibility. https://www.researchgate.net/publication/284691618_SARS_Coronavirus_UV_Susceptibility
- Lambert, S., Sinclair, C.J., Bradley, E.L., Boxall, A.B.A., 2013. Effects of environmental conditions on latex degradation in aquatic systems *Science of The Total Environment* Vol. 447, 225 - 234.
- Lindsley, W.G., et al., 2015. Effects of ultraviolet germicidal irradiation (UVGI) on N95 respirator filtration performance and structural integrity. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 12 (8), 509 - 517.
- Meechan, P.J and Wilson, C., 2006. Use of Ultraviolet Lights in Biological Safety Cabinets: A Contrarian View. *Applied Biosafety*, 11 (4), 222 - 227. <https://doi.org/10.1177%2F153567600601100412>
- Mills D., et al., 2018. Ultraviolet germicidal irradiation of influenza-contaminated N95 filtering facepiece respirators. *American Journal of Infection Control*, 46 (7), e49 - e55.
- Noriman, N., Ismail, H., 2010. Natural Weathering test of styrene butadiene rubber and recycled acrylonitrile butadiene rubber blends. *Polymer Plastics-Technology and Engineering*.
- Perincek, S., Duran, K., Körlü, A.E., Elemen, S., Can, C., 2014. Disinfection of cellulosic material contaminated with *S. Aureus* and *K. Pneumoniae*. XIIIth International Izmir Textile and Apparel Symposium.
- Pinto, I., Bogi, A., Stacchini, N., 2015. Procedure operativa per la prevenzione del rischio da esposizione a Radiazioni Ottiche Artificiali: Cappe sterili e Lampade Germicide https://www.portaleagentifisici.it/filemanager/userfiles/DOCUMENTAZIONE/ROA_DOCUMENTAZIONE/report_paf_roa_2_04_2015_UVC.pdf?lg=IT
- Rivaton, A., et al., 1986. The photo-chemistry of bisphenol-A polycarbonate reconsidered: Part 3 – Influence of water on polycarbonate photochemistry. *Polymer Degradation and Stability*, Vol. 14, 23 - 40.
- Szeto, W., Yam, W.C., Huang, H., Leung, D.Y.C, 2020. The Efficacy of Vacuum-Ultraviolet Light Disinfection of Some Common Environmental Pathogens. *BMC Infect Dis.*, 20 (1), 127. doi: 10.1186/s12879-020-4847-9
- Tjandraatmadja, G.F., Burn, L.S., Jollands, M.J., 1999. The effects of ultraviolet radiation on polycarbonate glazing in *Durability of Building Materials and Components 8: Service life and durability of materials and components*. Michael A. Lacasse, Dana J. Vanier. NRC Research Press.
- Veitch, J.A., McColl, S.L., 1995. Modulation of fluorescent

- light: Flicker rate and light source effects on visual performance and visual comfort. *Lighting Research and Technology*, 27, 243 - 256.
- Viscusi, D.J., et al., 2009. Evaluation of five decontamination methods for filtering facepiece respirators. *Annals of occupational hygiene*, 53 (8), 815 - 827.
- Viscusi, D.J., et al., 2011. Impact of three biological decontamination methods on filtering facepiece respirator fit, odor, comfort, and donning ease. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 8 (7), 426 - 436.
- Viscusi, D.J., King, W.P., Shafer, R.E., 2007. Effect of decontamination on the filtration efficiency of two filtering facepiece respirator models. *Journal of the International Society for Respiratory Protection*, 24, 93 - 107.
- Vo, E., Rengasamy, S., Shaffer, R., 2009. Development of a Test System to Evaluate Procedures for Decontamination of Respirators Containing Viral Droplets. *Applied and Environmental Microbiology*, 75 (23), 7303 - 7309.
- Wang, C., Lu, S., Zhang, Z., 2019. Inactivation of Airborne Bacteria Using Different UV Sources: Performance Modeling, Energy Utilization, and Endotoxin Degradation. *Sci. Total Environ.*; 655, 787 - 795. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.11.266
- Welch et al., 2017. Far-UVC light: A new tool to control the spread of airborne-mediated microbial diseases. *Scientific Reports*. <https://www.nature.com/articles/s41598-018-21058-w#citeas>
- WHO, 2020. Rational use of personal protective equipment for coronavirus disease (COVID-19) and considerations during severe shortages Interim guidance 6 April 2020 WHO/2019-nCov/IPC_PPE_use/2020.3
- Yousif, E., Haddad, R., 2013. Photodegradation and photostabilization of polymers, especially polystyrene: review. *SpringerPlus*, 2, 398.
- Zaffina S., et al., 2012. Accidental Exposure to UV Radiation Produced by Germicidal Lamp: Case Report and Risk Assessment *Photochemistry and Photobiology*, 88, 1001 - 1004. doi: 10.1111/j.1751-1097.2012.01151.x