

AVANÇOS NA DESATIVAÇÃO DE PATÓGENOS COM RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA: UMA REVISÃO INTEGRATIVA

Máté Magyarósi^{1,2}

Alice Pereira da Silva²

Luiz Gustavo Nascimento Dorvigens²

Giovanna Gomes de Jesus²

Mickael Breno de Godoi Sousa²

João Pedro Ribeiro Afonso²

Universidade de Pécs, Pécs, Hungria¹

Universidade Evangélica de Goiás – UniEVANGÉLICA²

RESUMO

A radiação ultravioleta C (UV-C) é uma conhecida ferramenta germicida, porém sua aplicação em comprimentos de onda convencionais (254 nm) apresenta riscos à saúde humana, como carcinogenicidade e danos oculares. Esta revisão analisa o potencial da radiação Far-UVC (200-230 nm), especificamente em 222 nm, como uma tecnologia promissora para inativar patógenos aéreos de forma segura em ambientes ocupados. O objetivo foi comparar a eficácia da Far-UVC com a irradiação germicida UV convencional (UVGI) em estudos *in vitro* e *in vivo*, com base em uma revisão sistemática da literatura. Os resultados indicam que a Far-UVC desativa eficientemente vírus e bactérias em aerossol, alcançando reduções de até 99,8% em ambientes controlados. O seu principal diferencial é a segurança: devido à sua limitada profundidade de penetração, a radiação não consegue atravessar a camada externa da pele humana ou do filme lacrimal, evitando os danos associados à UVGI. Estudos com voluntários humanos confirmam que a exposição a doses germicidas não causa desconforto ocular ou outros efeitos adversos significativos. Conclui-se que a Far-UVC é uma tecnologia altamente eficaz para a desinfecção contínua do ar. No entanto, são necessários mais estudos para avaliar sua eficácia contra uma gama mais ampla de patógenos, a segurança da exposição crônica e a aplicação em condições reais não controladas, visando sua implementação em larga escala em ambientes de saúde pública como hospitais e escolas.

Palavras-chave: Radiação Far-UVC; Inativação de Patógenos; Segurança Humana

INTRODUÇÃO

A radiação UV é um espectro de radiação eletromagnética, composto por três bandas: UV-A (315–400 nm), UV-B (280–315 nm) e UV-C (100–280 nm). A UV-C, a banda que contém a luz Far-UVC, é formada por três sub-bandas: Vácuo-UV (VUV, 100–200 nm), irradiação UV germicida convencional (UVGI, 250–280 nm) e radiação Far-UVC (200–230 nm). Duas sub-bandas são coloquialmente conhecidas como irradiações ultravioleta germicidas, devido às suas propriedades únicas de inativação de patógenos (Kowalski, 2009).

A UVGI, amplamente empregada como desinfetante, é tanto carcinogênica quanto cataratogênica (ICNIRP, 2004; Kowalski, 2009). Estudos recentes na área, no entanto, mostram que a luz Far-UVC, embora equipada com capacidades antimicrobianas aéreas semelhantes, tem efeitos negativos reduzidos na saúde humana (Kousha et al., 2009; Buonanno et al., 2020). A irradiação pode ser criada com uma lâmpada de excímero de cloreto de criptônio (KrCl*) com uma emissão de 222 nm (Eadie et al. 2022). A emissão de ozônio da lâmpada pode ser facilmente controlada com sistemas de ventilação convencionais (Kowalski, 2009).

A tecnologia é estudada para criar uma alternativa eficiente, barata e segura à lâmpada germicida de 254 nm usada convencionalmente, a fim de reduzir a propagação de doenças (Buonanno et al., 2024; Eadie et al., 2022). O objetivo desta revisão é comparar a efetividade da radiação Far-UVC com os sistemas convencionais de UVGI amplamente aplicados até hoje, especificamente em ambientes *in vitro* e *in vivo*.

MATERIAIS E MÉTODOS

Foi realizada uma busca por artigos científicos em bases de dados eletrônicas, incluindo PubMed, Google Scholar e Scopus. Os termos de busca foram combinados para cobrir os principais aspectos da pesquisa, usando palavras-chave como: "Far-UVC," "222 nm radiation," "UVC germicidal," "pathogen inactivation," "aerosol disinfection," "human safety UVC," e "coronavirus." As buscas foram realizadas combinando esses termos com operadores booleanos (AND, OR) para refinar os resultados.

RESULTADOS

Mecanismos de ação

A UV-C desativa patógenos danificando seus ácidos nucleicos (RNA, DNA). A luz Far-UVC tem uma profundidade de penetração limitada, portanto, é incapaz de atravessar as camadas externas não vivas da pele. Como os patógenos, como bactérias e vírus, são geralmente medidos em dimensões de micrômetro ou menores, o limite de profundidade não afeta sua eficácia.

No entanto, a forte absorção de proteínas e o grande tamanho das células da pele humana diminuem os efeitos da irradiação em doses que ainda são eficazes contra patógenos, com os queratinócitos epiteliais mortos do estrato córneo e da córnea do olho fornecendo uma camada extra de proteção. Outros comprimentos de onda, como 254 nm, são capazes de atravessar essa barreira e podem causar a formação de eritema, juntamente com mutações carcinogênicas.

Embora as propriedades que permitem que a irradiação danifique os ácidos nucleicos tenham sido estudadas, existem especulações sobre outros efeitos atualmente desconhecidos que permitem que a radiação Far-UVC seja eficaz, mesmo com sua absorção mais fraca de DNA/RNA. Em relação aos fatores que limitam a potência da UVC, não há limites físicos ou químicos conhecidos.

Eficácia em Estudos *In Vitro*

Foram encontrados 2 estudos que testaram os seguintes patógenos em aerossol em ambientes *in vitro*: HCoV-OC43 e alfa HCoV-229E (Welch et al.); Murine Beta Coronavirus, MS2 e adenovírus (Walker et al.). O primeiro estudo usou uma câmara de irradiação de aerossol, enquanto o segundo utilizou um nebulizador Collison com impingeres líquidos AGI-30. Diferentes doses de exposição foram testadas. Para os coronavírus humanos, Welch descobriu que, com uma irradiância de 0.1 mW/cm², a inativação de 95% dos vírus exigiu 1.6 mJ/cm² por 16 segundos, enquanto a UVC convencional exigiu 1.1 mJ/cm² por 11 segundos para atingir a mesma porcentagem de desativação. Os resultados mostram que 254 nm usou 45% menos energia, com a desvantagem da citotoxicidade em caso de uso em tecido mamífero.

O Beta-Coronavirus Murino, alvo da UVC convencional, teve uma taxa de inativação de 88% a 0.599 mJ/cm² (Walker et al.), o que equivale a 0.85 mJ/cm² para uma redução de 95%. No caso de vírus com características semelhantes, os resultados parecem ser consistentes. No entanto, no caso do adenovírus e do MS2, uma dosagem de 2.608 mJ/cm² não foi suficiente para atingir uma taxa de inativação de 90%. Isso sugere que uma diretriz geral para níveis mínimos de dosagem não pode ser calculada a partir do conhecimento atual, devido à grande variação na eficácia

contra diferentes patógenos. O número de organismos testados também é muito limitado, e os vírus em aerossol não imitam perfeitamente os aerossóis gerados por humanos, como muco, saliva ou tosse, o que significa que os achados não refletem as condições da vida real.

Eficácia em Estudos *In Vivo*

Para esta seção, foram encontrados 5 artigos de valor notável. Os patógenos testados são os seguintes: Norovírus murino (Buonanno et al., 2024), *Staphylococcus aureus* (Eadie et al., 2022), coronavírus humanos (Buonanno et al., 2020), Vírus da Bronquite Infecciosa Atenuado (IBV) (Tucciarone et al., 2022). Um estudo, em vez de usar patógenos específicos, focou na amostragem microbiana e testou o conforto ocular por meio de voluntários humanos (Kousha et al.).

Observações importantes vieram de Kousha et al., onde voluntários foram expostos a até 50 mJ/cm² e foram utilizados questionários validados de conforto ocular (especificamente SPEED e OSDI) imediatamente e dias após a exposição. Após o ensaio, nenhum desconforto ocular clinicamente significativo ou outros efeitos adversos foram relatados, enquanto foi observada uma redução de aproximadamente 52% em bactérias e fungos.

Os outros estudos mostram uma redução substancial nos patógenos aéreos, de até 99% em ambientes controlados. Os principais valores D, que equivalem à taxa de inativação, vieram de Buonanno et al. (2020) e Welch et al., respectivamente, onde um D95 precisou de 1.6 mJ/cm² no primeiro estudo, e o segundo estudo conduzido em coronavírus humanos teve um D99 com dosagens de 1.7 mJ/cm² e 1.2 mJ/cm². Os outros estudos não fornecem valores D de dose única, dificultando os cálculos, embora resultados promissores tenham sido relatados, com perda de infectividade para o IBV (Tucciarone et al., 2022) e uma redução de patógenos de 99,8% (Buonanno et al., 2024).

Uma das principais ressalvas dos estudos mencionados é que eles não correspondem a ambientes do mundo real, onde fluxo de ar irregular, movimento de pessoas e sombreamento são variáveis importantes. O desempenho das lâmpadas também depende de seu posicionamento, ventilação e tempo de ativação para

exposição. Os estudos, no entanto, estão alinhados com os achados dos estudos *In Vitro*.

CONCLUSÃO

A luz Far-UVC (222 nm) demonstrou ser uma tecnologia altamente eficaz para eliminar patógenos de forma rápida e, crucialmente, segura para a saúde humana. No entanto, as evidências atuais vêm de estudos em ambientes controlados e com patógenos específicos. A sua eficácia em condições do mundo real e os efeitos da exposição a longo prazo ainda são pouco conhecidos. Portanto, são necessários estudos futuros em cenários práticos (como hospitais e escolas) para otimizar o uso da tecnologia e confirmar sua segurança a longo prazo, viabilizando assim sua aplicação em larga escala na saúde pública.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BLATCHLEY III, E. R. et al. Far UV-C radiation: An emerging tool for pandemic control. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 53, n. 6, p. 733–753, 2023.

BUONANNO, M. et al. 222 nm far-UVC light markedly reduces the level of infectious airborne virus in an occupied room. **Scientific Reports**, v. 14, n. 1, p. 6722, 20 mar. 2024.

BUONANNO, M. et al. Far-UVC light (222 nm) efficiently and safely inactivates airborne human coronaviruses. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, p. 10285, 24 jun. 2020.

EADIE, E. et al. Far-UVC (222 nm) efficiently inactivates an airborne pathogen in a room-sized chamber. **Scientific Reports**, v. 12, n. 1, p. 4373, 23 mar. 2022.

INTERNATIONAL COMMISSION ON NON-IONIZING RADIATION PROTECTION (ICNIRP). Guidelines on limits of exposure to ultraviolet radiation of wavelengths between 180 nm and 400 nm (incoherent optical radiation). **Health Physics**, v. 87, n. 2, p. 171-186, ago. 2004.

KOUSHA, O. et al. 222-nm Far-UVC exposure results in no clinically significant change in corneal or ocular surface health in humans: A randomized controlled trial in a simulated office environment. **Photochemistry and Photobiology**, v. 99, n. 1, p. 273–281, 2023.

KOUSHA, O. et al. 222 nm Far-UVC from filtered Krypton-Chloride excimer lamps does not cause eye irritation when deployed in a simulated office environment. **Photochemistry and Photobiology**, v. 100, n. 1, p. 137-145, jan./fev. 2024.

KOWALSKI, W. **Ultraviolet Germicidal Irradiation Handbook**. Berlin: Springer-Verlag, 2009.

TUCCIARONE, C. M. et al. Evaluation of UVC Excimer Lamp (222 nm) Efficacy for Coronavirus Inactivation in an Animal Model. **Viruses**, v. 14, n. 9, p. 2038, 14 set. 2022.

WELCH, D. et al. Far-UVC light: A new tool to control the spread of airborne-mediate microbial diseases. **Scientific Reports**, v. 8, p. 2752, 2018.

