

Implementação e caracterização radiométrica de lâmpadas emissoras de UV-C como alternativa para inativação de microrganismos em ambientes públicos

Luciano Bachmann¹, Gilberto Ú. L. Braga²¹Depart. de Física/Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto/Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, Brasil²Depart. de Análises Clínicas Toxicológicas e Bromatológicas/Faculdade de Ciências Farmacêuticas de Ribeirão Preto/Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, Brasil

Resumo

O objetivo deste estudo é implantar e caracterizar radiometricamente um sistema de irradiação de ambientes empregando-se lâmpadas de radiação ultravioleta do tipo C (UV-C) como alternativa para o controle de microrganismos. A pandemia de Covid-19 (*Coronavirus disease 2019*) tornou necessário o emprego de medidas sanitárias para conter a propagação do SARS-CoV-2 (*Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus*) na população. Dar-se-á destaque, neste trabalho, ao sistema de segurança e à radiometria, visando à inativação dos microrganismos e o limite de exposição do público. Foram instaladas 3 lâmpadas de UV-C de 30 W numa sala de aula de 49 m². Os resultados mostram valores de densidade de potência superiores a 0,0129 (42) mW cm⁻² na sala. O tempo de exposição necessário para a inativação dependerá da resistência intrínseca de cada microrganismo e do percentual de inativação desejado. O sistema proposto é uma estratégia sanitária adicional para conter a dispersão, não apenas do coronavírus SARS-Cov-2, mas também de outros microrganismos patogênicos, demonstrando que a radiação UV-C pode ser utilizada como uma importante ferramenta para controle de epidemias.

Palavras-chave: Radiação Ultravioleta; Inativação de vírus; Inativação de bactérias; descontaminação de ambientes.

Abstract

We employ a lamp system with ultraviolet radiation (UV-C) and characterize it radiometrically as an alternative procedure to control microorganism spread in a scenario that the Covid-19 (Coronavirus disease 2019) pandemic calls for sanitary measures to avoid SARS-CoV-2 (Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus) proliferation. Here, we highlight the safety, radiometry and dosimetry to inactivate microorganisms, and we discuss the exposure limits for the public. To this end, we installed three 30-W UV-C lamps in a 49-m² classroom. We achieved power density above 0.0129 (42) mW cm⁻². The required exposure time for microorganism inactivation depended on the microorganism and on the desired percentage of inactivation. We can state that the evaluated system is an additional sanity barrier to avoid the dispersion of SARS-CoV-2 and other pathogens once we have obtained evidence that UV-C is an important tool to control pandemics.

Keywords: ultraviolet radiation; virus inactivation; bacteria inactivation; indoor decontamination.

1. Introdução

A pandemia da Covid-19 (*Coronavirus disease 2019*) tornou necessário o emprego de medidas sanitárias para conter a propagação do coronavírus SARS-CoV-2 (*Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus 2*) na população. O SARS-CoV-2 é um vírus de RNA fita simples, envelopado, membro da família Coronaviridae, da ordem Nidovirales. Os vírus dessa família apresentam características morfológicas similares. Todos têm uma forma esférica, com diâmetro variando entre 100 e 150 nm, apresentam espículas proteicas em sua superfície e têm um genoma com tamanho que varia entre 29.8 e 29.9 kb (1-4). Quatro desses coronavírus (HCoV-229E, HCoV-NL63, HCoV-OC43 e HCoV-HKU1) são agentes causais de resfriados comuns, mas dois deles, os coronavírus MERS-CoV (*Middle East Respiratory Syndrome*) e SARS-CoV e SARS-CoV-2, têm causado problemas respiratórios graves e potencialmente fatais.

A transmissão dos coronavírus, particularmente a do SARS-CoV-2, que se dá por meio de partículas suspensas no ar, tem sido apontada como a principal forma de propagação da COVID-19 (5, 6). Dessa

forma, intervenções na área de saúde pública para reduzir a propagação da doença devem ter como objetivo a interrupção ou a diminuição desse processo de transmissão. Dentre as diversas medidas sanitárias utilizadas, podem-se citar o distanciamento social, o uso de máscaras e a desinfecção das mãos e das superfícies de fômites com as quais entramos normalmente em contato. O uso da radiação ultravioleta C (UV-C) para fotoinativar vírus suspensos no ar ou depositados sobre superfícies é uma estratégia que reduz a sua transmissão.

A literatura recente apresenta diversos equipamentos e procedimentos que empregam radiação UV-C para irradiar superfícies, aerossóis e objetos contaminados, como, por exemplo, máscaras para uso pessoal (7-12). Entretanto, o uso da radiação UV-C para inativar microrganismos e controlar pandemias não é recente; na referência (13) o autor apresenta uma extensa revisão da literatura com uma breve história do advento da radiação UV neste último século como um agente para desinfecção de ambientes e superfícies. Mais recentemente, com o surgimento da SARS-CoV em 2002, um trabalho já apontou soluções para

inativação do agente infectante identificado como um novo coronavírus, pois a Organização Mundial da Saúde (*World Health Organization* - WHO) já havia declarado a severidade dessa doença e sua natureza contagiosa (14).

A região UV do espectro eletromagnético encontra-se entre a radiação visível e os raios X e foi convencionalmente dividida em UV-A, que apresenta comprimentos de onda entre 400-320 nm; UV-B, entre 320-280 nm, e UV-C entre 280-100 nm. A radiação UV-A e parte da radiação UV-B (com comprimentos de onda maiores do que 290 nm) atingem a superfície da Terra e a radiação UV-C é completamente absorvida pela camada de ozônio (15). A radiação UV-C também é emitida por lâmpadas de diversos tipos, como as de arco de xenônio, vapor de mercúrio, excimeros ou (LEDs - *light emitting diodes*). A radiação UV-C emitida por lâmpadas tem sido utilizada há décadas para a descontaminação de ambientes, como, por exemplo, as salas “estéreis” de hospitais, indústrias e laboratórios de pesquisa e equipamentos, como as cabines de segurança biológica (16, 17). A fonte mais comum de radiação UV-C tem sido, há muitas décadas, as lâmpadas de baixa pressão de vapor de mercúrio, que possuem um intenso pico de emissão em 254 nm. Novas aplicações da radiação UV-C para a descontaminação têm sido propostas continuamente (18-20) e recentes revisões da literatura têm apresentado uma ampla faixa de valores de densidade de energia capazes de inativar microrganismos (1-4). A literatura recente também aponta a evidente capacidade de inativação do Sars-CoV-2 pela radiação UV-C (9, 21). Entretanto, fatores ambientais, como temperatura e umidade relativa, e as características da superfície do material que está sendo irradiado são capazes de influenciar a efetividade da radiação UV-C para a inativação de microrganismos, incluindo o Sars-CoV-2 (22).

A atividade biocida da radiação UV-C deve-se ao fato de ela ser fortemente absorvida por proteínas e por ácidos nucleicos, como o DNA e o RNA. Proteínas em solução absorvem a radiação com uma absorvância máxima a 280 e a 200 nm. Os aminoácidos com anéis aromáticos são os principais responsáveis pelo pico de absorção a 280 nm, enquanto as ligações peptídicas são as principais responsáveis pelo pico de absorção a 200 nm (23,24). A absorção da radiação UV-C por proteínas leva à formação de diversos fotoprodutos que causam alterações estruturais e, conseqüentemente, o comprometimento de suas funções. Os ácidos nucleicos apresentam forte absorção na região entre 240 e 270 nm, com pico de absorvância próximo a 260 nm. Isso se deve à natureza aromática das bases nitrogenadas que compõem o DNA e o RNA. A absorção da radiação UV-C por ácidos nucleicos leva à formação de diversos fotoprodutos, como, por exemplo, os dímeros de pirimidina, que são os fotoprodutos majoritários induzidos pela radiação UV-C. Esses fotoprodutos incluem os predominantes dímeros de pirimidina do tipo ciclo butano, bem como menores quantidades de pirimidina pirimidona e os

seus isômeros secundários fotoinduzidos (25). Os danos induzidos pela radiação UV-C no material genético podem causar mutações e comprometem processos cruciais para o funcionamento celular, como a duplicação e a transcrição do DNA e a tradução do RNA, causando a morte das células (15).

A intensidade do dano às biomoléculas depende do binômio densidade de potência e tempo de exposição, i. e., densidades de potência maiores são capazes de inativar os microrganismos em um tempo menor. Estudos anteriores mostraram que diversas espécies de vírus, incluindo-se os causadores de doenças respiratórias, como o H1N1 e os coronavírus, são facilmente inativados pela radiação UV-C emitida por lâmpadas germicidas (1, 2, 9, 26, 27). De maneira geral, os vírus são muito menos resistentes à radiação UV-C do que outros microrganismos patogênicos, como fungos e bactérias (27). Equipamentos de desinfecção baseados em lâmpadas UV-C têm sido capazes de reduzir as infecções hospitalares causadas não só por patógenos suspensos no ar (26, 27), mas também pelos presentes na superfície de fômites (17).

Para mensurar a radiação UV de fontes emissoras, quantifica-se a sua irradiância (I) ou a densidade de potência, com unidades de potência por unidade de área ($W m^{-2}$). Para avaliar a energia entregue sob tempos de irradiação delimitados, emprega-se a fluência, ou a densidade de energia, com as unidades de energia por unidade de área ($J m^{-2}$). Considerando-se uma fonte emissora com densidade de potência estável ao longo do período de irradiação, o tempo (t) de exposição necessário para atingir o efeito desejado pode ser calculado conforme a equação 1:

$$D = I \cdot t \quad (1)$$

onde D é a densidade de energia (ou a fluência) necessária para a ação sobre os microrganismos e I a densidade de potência (ou irradiância) emitida pelo conjunto das lâmpadas. Para fontes com irradiância variável no tempo, ou em situações nas quais a absorção do substrato irradiado precisa ser considerada, é necessária uma dosimetria diferenciada que considere esses parâmetros (28).

Além dos efeitos deletérios nos microrganismos, também são esperados efeitos adversos nos tecidos das pessoas expostas à radiação UV. A Comissão Internacional de Proteção Radiológica para Radiação Não-Ionizante (*International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection* – ICNIRP) publicou um documento com orientações e determinações para os limites de exposição à radiação UV emitida por fontes não coerentes (24).

Em termos práticos, as orientações estabelecem o tempo em que a pele e os olhos podem ser expostos aos diferentes comprimentos de onda da radiação UV. A dependência ao comprimento de onda é resultado do processo de absorção da radiação pela matéria orgânica e está, dessa forma, correlacionado à fluência máxima que a pessoa pode ficar exposta à radiação sem sofrer danos importantes aos tecidos.

Na Tabela 1, observa-se os limites de exposição para diferentes comprimentos de onda; destaca-se o comprimento de onda de 254 nm, que foi o utilizado neste trabalho. Outros detalhes das orientações podem ser obtidos na referência utilizada (29).

Para a obtenção de uma extensa literatura sobre o uso de UV-C em microrganismos, sobre importantes parâmetros físicos acerca da radiação, ação em superfícies e aerossóis, incluindo simulações, dosimetria e aplicações, o livro publicado por W. Kowalski pode ser consultado (13).

Tabela 1. Limites de exposição dos tecidos biológicos (olho e pele) para alguns comprimentos de onda da radiação UV (29).

Comprimento de onda (nm)	Limite de exposição (mJ cm ⁻²)	Comprimento de onda (nm)	Limite de exposição (mJ cm ⁻²)
180	250	310	200
190	160	313	500
200	100	315	100
205	59	316	1300
210	40	317	1500
215	32	318	1900
220	25	319	2500
225	20	320	2900
230	16	322	4500
235	13	323	5600
240	10	325	6000
245	8,3	328	6800
250	7	330	7300
254	6	333	8100
255	5,8	335	8800
260	4,6	340	11000
265	3,7	345	13000
270	3,0	350	15000
275	3,1	355	19000
280	3,4	360	23000
285	3,9	365	27000
290	4,7	370	32000
295	5,6	375	39000
297	6,5	380	47000
300	10	385	57000
303	25	390	68000
305	50	395	83000
308	120	400	100000

Fonte: adaptado da referência (29).

Há a necessidade de se implementarem barreiras sanitárias e sistemas para reduzir a contaminação por microrganismos patogênicos em ambientes em que ocorram a aglomeração de pessoas, como, por exemplo, salas de aula, anfiteatros, teatros, cinemas, consultórios médicos e odontológicos, unidades básicas de saúde e hospitais. O emprego de sistemas de descontaminação baseados no uso da radiação UV-C tem se mostrado eficiente, tanto do ponto de vista microbiológico como energético, e factível para a inativação de microrganismos patogênicos, particularmente os vírus causadores de doenças respiratórias, como o SARS-CoV-2.

O objetivo deste estudo foi implantar um sistema de irradiação de ambientes, empregando-se lâmpadas de radiação ultravioleta do tipo C como uma barreira adicional para o controle da propagação de microrganismos. Deu-se destaque para o sistema de segurança, para a radiometria desse sistema, sua dosimetria para inativação de microrganismos e aos limites de exposição para pele e olhos.

2. Materiais e Métodos

2.1. Instalação do sistema

A implantação de um sistema baseado na emissão de radiação UV-C para reduzir a população de microrganismos patogênicos foi realizada numa sala de aula de 49 m², que, tipicamente, comporta turmas de 40 alunos. Foram instaladas 3 lâmpadas UV-C de 30 W em cada sala, (HNS 30W G13, Osram, Alemanha) dispostas de acordo com a Figura 1. As lâmpadas com 90 cm de comprimento e 2,8 cm de diâmetro, que ficaram suspensas a 3 metros acima do piso da sala, foram fixadas numa luminária de alumínio, com curvatura de 50 cm de raio, sem revestimento ou pintura para propiciar uma maior reflexão da radiação e para evitar a perda da radiação para o teto.

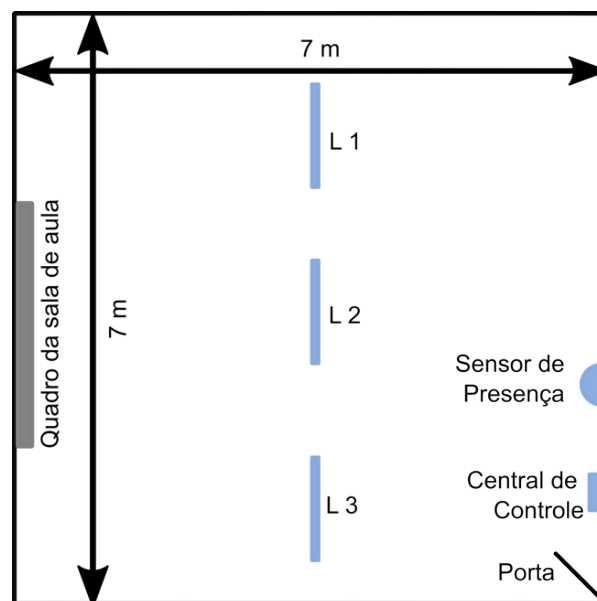


Figura 1. Posicionamento das 3 lâmpadas (L1, L2 e L3) emissoras de radiação ultravioleta (UV-C) numa sala de aula de 49 m². O controle de segurança das lâmpadas e o sensor de presença foram instalados ao lado da porta de entrada.

Esta configuração talvez não seja a mais adequada para maximizar a irradiância em todos os lugares no interior da sala. Entende-se que a disposição mais adequada seria a disposição que produza maior densidade de potência principalmente nos cantos mais distantes da sala, pois serão estes valores que determinarão o tempo mínimo de irradiação.

A caracterização radiométrica permitiu avaliar experimentalmente a distribuição da potência na sala; não sendo o objetivo deste trabalho, mas é possível proceder com simulações (13) e buscar a melhor distribuição das lâmpadas em qualquer ambiente de forma que se maximize a densidade de potência e uniformidade da irradiação.

2.2. Segurança

O controle para ligar as lâmpadas é de fundamental importância para se evitar a irradiação da sala quando ocupada pelo público, incluindo-se o operador do sistema. Assim, empregou-se um circuito elétrico independente, conforme apresentado

na Figura 2-A, com destaque para os diferentes sistemas de segurança que evitarão a exposição do público.

O primeiro sistema de segurança é o sensor de presença instalado na parede da sala, próximo à porta, que, ao detectar alguma movimentação na sala ou entrada de pessoas, interrompe a alimentação elétrica das lâmpadas. Esse sensor de presença foi adaptado de um sensor de presença comercial com sensibilidade para 360° e que possui um relé que se encontra geralmente aberto, mas que fecha o circuito ao detectar a presença de pessoas no ambiente. No presente projeto, trocou-se o relé do sensor para comportar um tipo de relé normalmente fechado, (AX1RC3, Metalex) de 24VCC e 15A/250VAC, que, ao detectar presença, abre-se e interrompe o circuito.

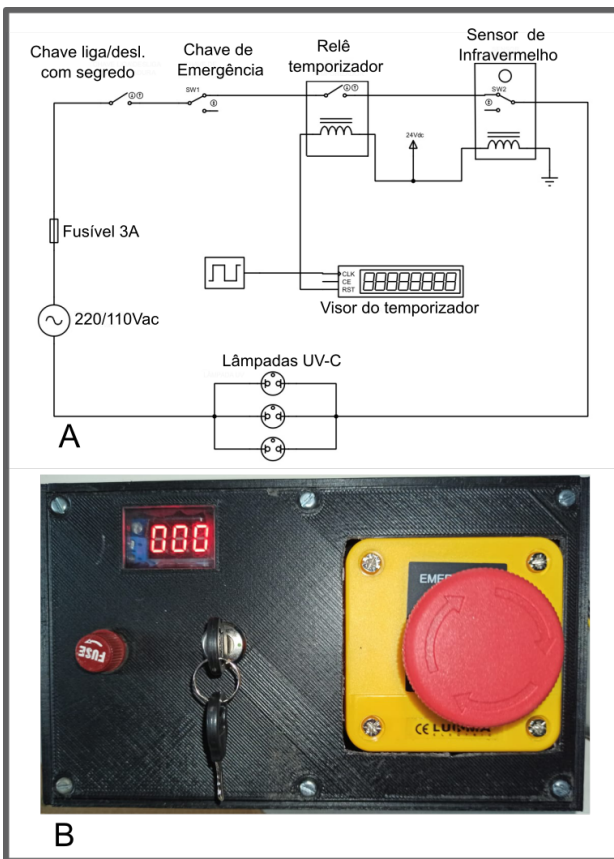


Figura 2. A) Diagrama elétrico para a iluminação e controle das lâmpadas. B) Foto da caixa de controle que comporta o temporizador, chave liga/desliga com segredo, fusível, botão de emergência e visor do temporizador

O segundo sistema de segurança é o botão de emergência, apresentado na Figura 2-B, que pode ser acionado por qualquer pessoa e interromperá imediatamente a alimentação das lâmpadas. Esse botão está posicionado sobre a caixa de controle. Por fim, o terceiro sistema de segurança é uma chave de liga/desliga, que é acionada somente com uma chave de miolo com segredo, que deverá ficar em poder de uma pessoa responsável pela sala. Dessa forma, as lâmpadas poderão ser ligadas quando a sala estiver vazia, como em intervalos de aulas, horários de almoço, jantar ou no período noturno.

Não é possível ligar esse sistema de irradiação sem a chave de miolo com segredo, mas mesmo assim, a

energização pode ser interrompida ou pelo sensor de presença ou pelo botão de emergência. Dessa forma, a irradiação do ambiente com pessoas não ocorrerá, mesmo quando houver a intenção.

O sistema foi projetado para ambientes fechados, mas poderá ser adaptado para ambientes externos, pois o sensor de presença permite que se desligue o sistema quando houver a movimentação de pessoas. Adicionalmente, como será apresentado nos resultados, essa configuração foi projetada com lâmpadas que produzem uma densidade de potência que permite a exposição das pessoas, com segurança, por alguns segundos; mesmo não sendo a intenção irradiar o ambiente com a presença de pessoas, o dimensionamento do sistema permite minimizar os efeitos deletérios da radiação UV-C na pele e olhos, em casos de exposições involuntárias.

A irradiação da sala é controlada por um temporizador (HCW-M421), que pode ser programado pelo usuário, e o tempo máximo de irradiação da sala será limitado. Esse mesmo temporizador também pode ser programado para energizar as lâmpadas somente após um determinado período de tempo após o acionamento da chave. Isso permite que o operador tenha tempo hábil para ligar o sistema e sair da sala sem ser exposto à radiação.

Na Figura 3, apresenta-se um exemplo de rotulagem que foi elaborado para ser fixado na sala em que este sistema foi instalado.



Figura 3. Rotulagem necessária para alertar a presença de radiação ultravioleta, que deverá ser fixada num local visível ao público da sala e próximo da central de controle.

De acordo com a norma ABNT IEC 60601-2-57:2015, uma fonte emissora de UV, como a utilizada no presente projeto, enquadra-se no Grupo de Risco 3. Essas fontes podem apresentar um risco, mesmo com exposições curtas e que possuam densidade de potência de UV actínico (280-400 nm) acima de 0,03 W m⁻². O requisito de rotulagem para esse grupo de risco deve ser algo próximo ou equivalente a: "A radiação UV emitida por este dispositivo pode ser perigosa. Evitar a exposição de olhos e pele". Adicionalmente, é necessário que o usuário seja treinado.

2.3. Radiometria

O espectro de emissão das lâmpadas foi obtido por meio de um espectrômetro de CCD com 2048 elementos (USB200, Ocean Optics, USA), com sensibilidade espectral entre 200 e 800 nm, equipado com uma sonda de correção cossenoidal, que é acoplada ao aparelho por meio de uma fibra óptica. A intensidade do espectro foi adquirida de forma relativa uma vez que tal sistema não é adequado para mensurar a irradiância espectral de fontes que possuem emissões estreitas como as encontradas em lâmpadas contendo gás ionizado. Esse sistema foi empregado apenas para determinar a posição espectral das linhas de emissão da lâmpada de vapor de mercúrio. O espectrômetro foi aferido com uma fonte calibrada de mercúrio e argônio, (HG-1, Ocean Optics, USA) com linhas entre 253 e 922 nm.

Para determinar o perfil da potência das lâmpadas no interior da sala de aula, empregou-se o detector de elemento único (LM-2 UV, Coherent, USA), contendo um sensor de 6 mm de diâmetro e sensibilidade na região espectral entre 250 e 400 nm. A potência foi mensurada em 11 pontos da sala, a uma altura de 0,5 m acima do piso e 2,5 m abaixo da posição onde encontravam-se as lâmpadas, com destaque para as medidas sob as lâmpadas, na região central, e nos cantos das salas, onde haverá um valor reduzido de irradiância.

Para determinar a potência das lâmpadas, empregou-se um detector de potência de elemento único (818P, Newport, USA), com diâmetro de 11,8 mm e com sensibilidade em todo o espectro ultravioleta, visível e infravermelho (193-1064 nm). Mensurou-se (com 3 repetições) a potência total da lâmpada, que é composta por radiação UV e visível, posicionando-se o detector sob cada uma das 3 lâmpadas e a 0,5 m acima do piso e 2,5 m abaixo da posição onde se encontravam as lâmpadas. Essa medida mensura a potência total da lâmpada emitida ao longo de todo o espectro do ultravioleta e do visível. Na sequência, cobriu-se o mesmo detector com uma lâmina de vidro de 1 mm de espessura para bloquear a radiação UV e mensurar somente a radiação visível oriunda da lâmpada de UV-C. Com essa medida, pode-se mensurar a potência visível da lâmpada e então subtrair este valor e determinar a potência da lâmpada emitida exclusivamente na região da radiação UV-C. O detector empregado possui um certificado de calibração emitido pelo próprio fabricante (Newport, USA) que afere um fator de correção de 0,87 para a detecção do comprimento de onda de 254 nm. Esse fator foi empregado para calcular a potência final sob as lâmpadas. Todas as medidas foram realizadas com a sala isolada da iluminação natural ou oriunda de qualquer outra fonte de iluminação.

Para calcular a densidade de potência, empregou-se a potência mensurada e a área de 1,1 cm² do detector de elemento único, que possui um diâmetro de 11,8 mm. O tempo de exposição para inativar microrganismos foi calculado empregando-se a densidade de potência média nas regiões de menor

incidência da sala que foi observada nos seus cantos, que são as regiões mais distantes das lâmpadas.

Para determinar o limiar do tempo para a exposição do público sob as lâmpadas mensurou-se a densidade de potência a 1,20 m de distância da lâmpada central, o que corresponde a uma pessoa de 1,80 m ter a pele ou os olhos expostos quando ela está em pé sob a lâmpada central, com todo o sistema ligado. Essa situação corresponde à maior irradiância à qual uma pessoa pode ser exposta. Determinou-se a potência (com 3 repetições) de forma similar ao descrito anteriormente sob as 3 lâmpadas, mas com o sensor posicionado a 1,20 m da lâmpada e a 1,80 m do piso da sala.

3. Resultados

A radiação emitida pelas lâmpadas germicidas é composta por vários picos de emissão, como apresentado na Figura 4. Observa-se o pico de maior emissão em 254 nm na região UV-C do espectro, que é a principal responsável pela ação antimicrobiana desejada. Há outros picos de emissão, com destaque para o pico em 313 nm, na região UV-B, e o pico em 365 nm, na região UV-A. Também há picos na região espectral do visível. Na mesma Figura 4, pode-se comparar a emissão espectral da lâmpada com sua emissão filtrada por uma lâmina de vidro de 1 mm de espessura. Como já descrito na metodologia, a lâmina de vidro bloqueia a radiação UV-C e UV-B com emissões em 254 nm e 313 nm, respectivamente.

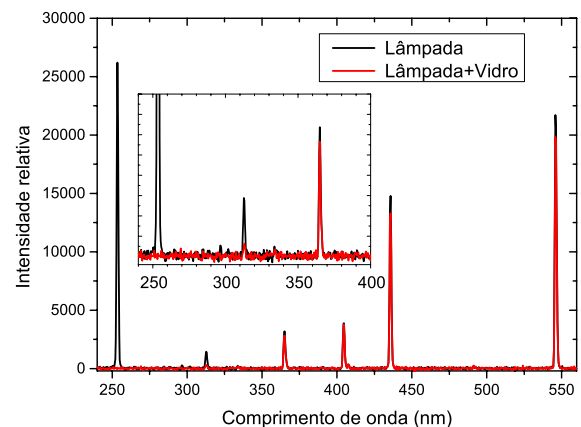


Figura 4. Espectro de emissão das lâmpadas empregadas na irradiação da sala. Observa-se a ausência do pico de emissão em 254 e 313 nm quando a emissão da lâmpada UV-C é filtrada por uma lâmina de vidro com 1 mm de espessura.

Esse resultado demonstra que a radiação UV-C e UV-B não é capaz de atravessar as janelas existentes nas salas de aula ou os vitrôs presentes nas portas das salas. A medida da potência da lâmpada filtrada pelo vidro permite calcular a radiação UV dessa lâmpada, desconsiderando a radiação visível que não causa dano. Esse procedimento, que diferencia a radiação UV da visível, é fundamental para a correta dosimetria do ambiente.

A densidade de potência produzida em diferentes pontos da sala é dependente da disposição das lâmpadas, da altura instalada e da distância da fonte

de radiação. A densidade de potência final é, dessa forma, fortemente dependente desses parâmetros geométricos. Vale notar que cada projeto terá a sua particularidade. É importante configurar a posição das lâmpadas para reduzir sombras e garantir uma irradiação homogênea em toda a sala.

Na Figura 5, observa-se a distribuição dos valores de potência mensurados a 50 cm acima do piso, altura típica de assentos de cadeiras. As medidas realizadas dentro da sala foram escolhidas para cobrir pontos importantes (vide Figura 5); sendo eles, as arestas da sala (4 pontos), mediatriz das paredes (4 pontos) e sob as 3 lâmpadas, totalizando 11 medidas. Nestas últimas 3 posições, elas foram realizadas exatamente sob cada lâmpada.

Diferentes alturas apresentarão diferentes valores de potência. Esses valores estão normalizados pelo maior valor de potência mensurado na sala, que está posicionado sob a lâmpada central.

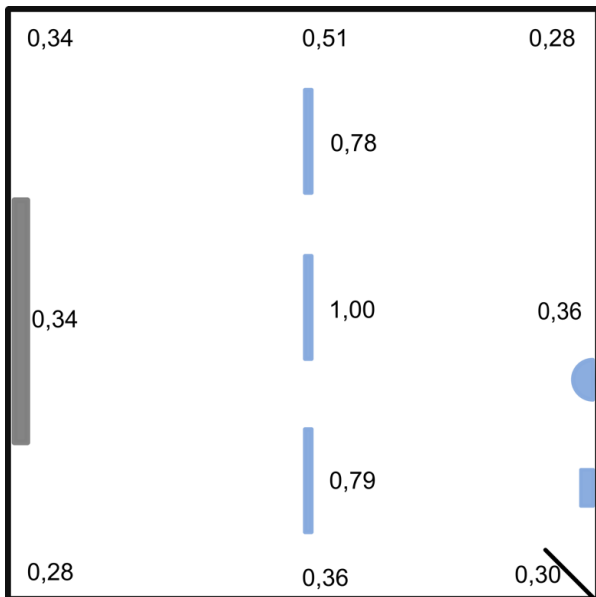


Figura 5. Perfil relativo da potência média mensurada em diferentes pontos da sala. Os valores estão normalizados pelo valor máximo encontrado na sala, que se situa sob a lâmpada central.

A parte central terá sempre a maior potência, desde que as lâmpadas estejam dispostas de forma simétrica. Neste projeto, observou-se um valor mínimo nos cantos mais distantes das lâmpadas, com um valor médio de 0,3, i. e., 30% do valor máximo da região central.

Na Tabela 2, observam-se os valores mensurados sob as 3 lâmpadas, conforme descrito na metodologia, filtradas ou não pela lâmina de vidro, o que permite diferenciar a potência total da potência no visível. Na mesma tabela, há o valor médio da potência de UV e, por fim, o valor corrigido pelo certificado de calibração.

Com valor corrigido, a densidade de potência sob as lâmpadas L1, L2 e L3 é, respectivamente, 0,031 (6), 0,043 (14) e 0,032 (17) mWcm⁻².

Os elevados valores de incertezas se devem aos fatores experimentais que não foram monitorados, por exemplo, envelhecimento das lâmpadas e tempo em que as lâmpadas estavam ligadas quando se

realizou a medida da potência. Aliado a estes fatores se tem também a influência da medida experimental, tais como posicionamento e sensibilidade do detector a variações de temperatura.

Tabela 2. Potência média mensurada (µW) sob as 3 lâmpadas (L1, L2, L3) a 0,5 m do piso; com e sem o bloqueio da radiação ultravioleta (UV) por uma lâmina de vidro para discriminar a radiação UV da radiação total.

L1 lateral		L2 central		L3 lateral	
Total	Visível	Total	Visível	Total	Visível
43 (8)	4 (1)	73 (18)	19 (7)	45 (22)	4 (2)
Potência de UV (Total - Visível)					
39 (8)		54 (19)		40 (22)	
Potência de UV corrigida					
34 (7)		47 (16)		35 (19)	

Fonte: O autor (2021).

Ao considerar o valor de potência observado nos locais das salas mais distantes das lâmpadas, há uma redução em 30% do valor máximo observado sob a lâmpada central. Então, nessa região da sala há uma densidade de potência de apenas 0,0129 (42) mW cm⁻². Esse é o valor de densidade de potência que deverá ser empregado para a inativação dos microrganismos, pois são locais de menor densidade de potência, nos quais o tempo para a inativação será maior quando comparado com o tempo necessário para inativação nos locais de maior densidade de potência, que estão mais próximos das lâmpadas.

Para a determinação do período máximo de tempo que a pele e os olhos de uma pessoa podem ficar expostos, foram obtidos os valores apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Potência total média mensurada (µW) sob as 3 lâmpadas (L1, L2 e L3) a 1,2 m da lâmpada e a 1,8 m do piso, com e sem o bloqueio da radiação ultravioleta (UV) por uma lâmina de vidro para discriminar a radiação UV da radiação total (UV + Visível) emitida pelas lâmpadas.

L1 lateral		L2 central		L3 lateral	
Total	Visível	Total	Visível	Total	Visível
151 (1)	38 (11)	192 (10)	36 (14)	152 (6)	28 (6)
Potência de UV (total – visível)					
103 (11)		156 (17)		124 (9)	
Potência de UV corrigida					
90 (10)		136 (15)		108 (8)	

Fonte: O autor (2021).

Esses valores foram obtidos a 1,20 da lâmpada central, o que corresponde a uma potência média de 0,136 (15) mW, recebida por uma pessoa posicionada em pé, sob essa lâmpada. Considerando esse valor de potência e a área do detector (1,1 cm²), obteve-se uma densidade de potência de 0,124 (14) mW cm⁻². Conforme apresentado na Tabela 1, que

apresenta a fluência de 6 mJ cm^{-2} como a máxima permitida para o comprimento de onda de 254 nm, tem-se um tempo de exposição máximo de 48 s para o público. Esse tempo de exposição aumentará em outras condições. Considerar-se-á, aqui, a condição mais desfavorável para a exposição da pele e olhos.

Apesar de este projeto não visar à irradiação da sala quando ocupada pelo público, é importante mensurar o tempo em que uma pessoa poderia ficar exposta, para garantir que, mesmo havendo alguma falha nos sistemas de segurança, o dano ao público não ocorra, pois, a densidade de potência é baixa o suficiente para garantir uma exposição segura de até 48 s, na condição mais desfavorável. O público que supostamente poderia ser exposto tem tempo hábil para sair da sala, movimentar-se para ativar o sensor de presença ou se direcionar até a central de controle para acionar o botão de emergência.

4. Discussão

O interesse pelo uso da radiação UV-C para a inativação de fungos, bactérias e vírus suspensos no ar e depositados na superfície de fômites e alimentos aumentou ainda mais durante a pandemia da Covid-19 (23). Por quase um século e meio, as radiações UV-C e UV-B vêm sendo utilizadas contra diversas espécies de microrganismos patogênicos para a esterilização não térmica (30). Até agora, a grande maioria dos sistemas de desinfecção baseados na radiação UV tem utilizado a radiação UV-C emitida por lâmpadas de mercúrio de baixa pressão, que apresentam um pico a 254 nm. Considerando-se a densidade de potência mínima de $0,0129 \text{ (42) mW cm}^{-2}$ obtida por meio do nosso sistema de irradiação, foi possível calcular os tempos de exposição necessários para inativar microrganismos de grupos filogeneticamente distintos. Na Tabela 4 é apresentada a densidade de energia necessária para a redução de 90% da viabilidade de algumas espécies de microrganismos expostos à radiação ultravioleta com a mesma distribuição espectral da utilizada no presente trabalho, sendo majoritariamente radiação com emissão em 254 nm.

Tabela 4. Tempo de exposição calculado para a fotoinativação de microrganismos considerando uma redução de 90%.

Vírus	Densidade de energia de energia (mJ cm^{-2})	Tempo de exposição (min)	Ref.
Coronavírus	3,7	5	(1)
Rotavírus SA-11	10	13	(2)
Poliovírus (tipo 1)	7	9	(2)
Hepatite A	6	8	(2)
Influenza	1,5	2	(27)

Fonte: O autor (2021).

Considerou-se, nessa tabela, uma redução na viabilidade de 90%. Reduções na viabilidade superiores a 90% serão obtidas com tempos de exposição ou densidade de potência maiores. Dessa forma, o sistema de irradiação apresentado mostra-se adequado para o controle de diferentes microrganismos e é capaz de inativar, não apenas coronavírus, mas também outros patógenos que

estejam suspensos no ar ou depositados nas superfícies expostas à radiação.

Exposições de $0,6 \text{ mJ cm}^{-2}$ a 254 nm foram capazes de inativar 88% dos coronavírus em aerossóis, enquanto exposições de $2,6 \text{ mJ cm}^{-2}$ inativaram apenas 68% de amostras do bacteriófago MS2 e do adenovírus. Esses resultados indicaram que os coronavírus são de 7 a 10 vezes mais suscetíveis à radiação UV-C do que os outros vírus testados (26). A suscetibilidade dos vírus à radiação UV-C, particularmente dos vírus cujos genomas são DNA ou RNA fita simples, é inversamente proporcional ao tamanho do genoma. Os coronavírus são os vírus de RNA fita simples que apresentam os maiores genomas, o que explicaria as suas menores tolerâncias à radiação UV-C em comparação com outros vírus, como o da influenza A (31). Outros vírus capazes de causar doenças respiratórias importantes, como o H1N1, também podem ser facilmente inativados pela radiação UV-C germicida. Ainda, a curva de dose-resposta mostrou que a suscetibilidade do vírus da influenza aumenta com a diminuição da umidade relativa (27).

A redução de infecções virais em ambientes onde sistemas de lâmpadas UV-C germicidas foram instaladas está bem documentada e é conhecida há décadas. Por exemplo, a inativação de vírus suspensos no ar pela radiação UV-C preveniu a disseminação de gripe entre pacientes de um hospital para veteranos e reduziu 44% as infecções virais em um hospital pediátrico nos EUA. Durante os ciclos de irradiação, os pacientes foram removidos dos ambientes expostos à radiação (17).

O principal problema associado ao uso das lâmpadas UV-C germicidas, com emissão em 254 nm, é o risco de exposições inadvertidas de usuários, já que esse comprimento de onda, por ser mutagênico e carcinogênico, pode causar danos à pele e aos olhos (23). Para reduzir o risco de exposições acidentais à radiação UV, o sistema de iluminação do presente estudo foi dotado de diversos mecanismos de segurança. De acordo com as recomendações da ICNIRP para os limites de exposição da pele e dos olhos, foi estabelecida a fluência de 6 mJ cm^{-2} , para o comprimento de onda de 254 nm. Essa é uma das menores fluências recomendadas entre todos os comprimentos de onda do espectro UV, indicando que 254 nm é o comprimento de onda mais deletério do espectro UV (29). Para o sistema de lâmpadas UV-C descrito neste trabalho, foi calculado um tempo máximo de exposição de 48 s. Apesar de haver extensas pesquisas a respeito dos efeitos da radiação UV na matéria orgânica, ainda é necessário investigar o efeito da radiação UV-C, empregando-se fluências menores do que o limite seguro e ao longo de vários anos. Somente por meio desses trabalhos poderá ser estabelecida a extensão dos efeitos estocásticos na pele e nos olhos de indivíduos expostos à radiação. Considerando-se a possibilidade dos efeitos tardios e estocásticos induzidos pela radiação UV, nós não recomendamos o desenvolvimento de produtos e serviços que exponham o público à radiação UV-C,

mesmo considerando que haja a possibilidade de calcular um tempo de exposição seguro.

Recentemente, duas fontes de radiação UV-C distante, que emitem fótons monocromáticos, foram avaliadas como alternativas às lâmpadas UV-C germicidas de vapor de mercúrio. Foi observado que lâmpadas de excimer Brometo de Criptônio ou Cloreto de Criptônio emitem nos comprimentos de onda de 207 e 220 nm, respectivamente, e são capazes de inativar microrganismos, como vírus e esporos de bactérias, de maneira tão ou mais eficiente que as lâmpadas UV-C germicidas (9, 18, 19, 23, 32-34). Dados moleculares e biológicos acumulados na última década por diversos grupos de pesquisa permitiram concluir que a radiação UV-C distante (207 e 222 nm), apesar de ser capaz de inativar de maneira eficiente vírus e bactérias, não apresenta riscos para a saúde de humanos (23, 33, 35-38). Isso ocorre porque esses comprimentos de onda são fortemente absorvidos por proteínas e, portanto, apresentam uma penetração extremamente baixa na matéria orgânica. Apesar da baixa penetração, esses fótons são capazes de penetrar, causar danos e inativar vírus e bactérias, mas não são capazes de atravessar o citoplasma e causar danos no núcleo das células eucarióticas, que são muito maiores.

Projetos que empregam radiação ultravioleta têm ação eficiente em superfícies planas e lisas, pois materiais porosos, como roupas, ou ambientes que possuem regiões com sombras, como áreas sob cadeiras, mesas e equipamentos hospitalares, não serão irradiados adequadamente. Entretanto, o sistema aqui descrito é muito eficiente para reduzir a população de microrganismos em suspensão ou depositados em superfícies expostas à radiação. Adicionalmente é importante lembrar que poderá haver inúmeros fatores interferentes na eficiência desses sistemas de irradiação. A literatura evidencia fatores, como movimentação do ar e disposição das lâmpadas na sala (39, 40) como determinantes para adequada irradiação e redução da população de microrganismos.

A popularização da metodologia apresentada aqui neste trabalho deve garantir que ela seja segura, de fácil implementação e apresente os resultados desejados. Adicionalmente, ela poderá ser facilmente utilizada em outros ambientes.

Caso haja o interesse de implementar tais sistemas de forma comercial há a necessidade de otimizar a disposição das lâmpadas empregando ferramentas computacionais, pois para cada ambiente terá a sua disposição mais apropriada e assim se necessita uma otimização. Ainda, se deve avaliar computacionalmente outras características que se estendem além do presente trabalho, como por exemplo, o envelhecimento das lâmpadas e a refletividade em superfícies.

Utilizou-se a sala de aula como modelo, com uma versão mínima de 3 lâmpadas, que pode ser expandida para 6 ou 9 lâmpadas, caso se queira reduzir o tempo de exposição para a inativação ou se a sala de interesse possui dimensões maiores. Os

valores apresentados para 3 lâmpadas correspondem a 49 m² ou ambientes similares que podem permanecer regularmente fechados em alguns horários típicos, como o horário de almoço, jantar ou no período noturno. Essa situação ocorre tipicamente em salas de aula, que, apesar de poderem acomodar 3 turnos com alunos, usualmente possuem períodos de intervalos antes das 7 h 30 min, entre 12 h e 14 h; entre 17 h e 19 h e após às 22 h.

Adicionalmente, caso haja o interesse de implementar o sistema em ambientes com circulação contínua de pessoas, como corredores ou salas de uso coletivo, mas esporádico, sensores de presença devem ser adequadamente projetados e devem ser instalados botões de emergência para inativar a irradiação quando há público presente. De acordo com os limites de exposição da pele e olhos, é importante dimensionar a potência das lâmpadas para aumentar o tempo de exposição dos tecidos, sem o comprometimento na inativação dos microrganismos. No presente projeto, a radiometria de 3 lâmpadas permitiu fornecer uma densidade de potência baixa o suficiente para expor o público de forma segura por alguns segundos (48 s, neste projeto) e ainda inativar 90% dos microrganismos com os tempos de exposição apresentados na tabela 4.

Para melhor avaliar os fatores de influência na eficácia da UV-C na inativação de microrganismos, é necessário avaliar fatores ambientais e de superfícies. Para essas situações, a correta dosimetria (7) ou simulações (41) fazem-se necessárias. Considerando-se a ação de UV-C em ambientes reais em que a inativação de microrganismos seja desejada, haverá condições ambientais e superfícies heterogêneas nas quais a redução microbiana obtida em laboratório jamais será atingida num ambiente hospitalar ou espaços públicos (13). Mesmo assim a redução das populações microbianas nas principais regiões de interesse, como ar e as superfícies de maior contato, ainda produz o efeito desejado sendo uma importante ferramenta para conter pandemias como a Covid-19.

Caso o presente projeto seja transformado num produto, é extremamente importante que se sigam os requisitos da norma IEC 62471, que descreve as técnicas a serem utilizadas para avaliar o potencial de risco associado com a utilização de fontes luminosas. As lâmpadas utilizadas no sistema descrito neste trabalho fazem parte do grupo de risco 3, que são lâmpadas que emitem radiação UV e oferecem um alto risco biológico, especialmente para os olhos. Por esse motivo, faz-se necessária à sua adequação para que todos os procedimentos de segurança sejam seguidos, de modo que se reduza ao máximo o risco de acidente e que a proteção dos usuários seja maximizada. É necessário também que o produto passe pelo processo de certificação junto ao Inmetro, seguindo os requisitos de avaliação de conformidade (RAC) determinados pelo organismo de certificação de produtos (OCP) acreditados e/ou designados daquele órgão.

5. Conclusões

É possível equipar e irradiar periodicamente com radiação ultravioleta UV-C as salas de uso coletivo, como salas de aula, teatros, cinemas, consultórios médicos e odontológicos, unidades básicas de saúde e hospitais, para que se reduzam a viabilidade de microrganismos suspensos e depositados em fômites. Entretanto, a efetividade do sistema de irradiação instalado deve ser aferida periodicamente, por meio de ensaios radiométricos e microbiológicos, priorizando a segurança do público.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio do Departamento de Física (DF) e da Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto (FFCLRP) da Universidade de São Paulo (USP) na implantação deste sistema numa sala de aula nas dependências da Faculdade. Os autores agradecem também o apoio financeiro à FAPESP (19/15580-9; 17/25923-5 e 11/07960-4) e ao CNPq por intermédio do projeto (305771/2016-7), sob coordenação do Prof. Amando Siuiti Ito.

Agradecemos também o apoio técnico recebido pelos funcionários do DF, com destaque para o Sr. Élcio Aparecido Navas, pela eletrônica do sistema de controle; para o Sr. Júlio Cezar, pela instalação elétrica, e ao Sr. Carlos Renato da Silva, pelos trabalhos na oficina mecânica e impressão 3D. Ao Sr. Guilherme Araújo Braz, pelas orientações quanto à normatização de sistemas de irradiação de UV-C em ambientes abertos.

Referências

- Hessling, M., et al., Ultraviolet irradiation doses for coronavirus inactivation - review and analysis of coronavirus photoinactivation studies. *Gms Hygiene and Infection Control*, 2020. 15.
- Hijnen, W.A.M., E.F. Beerendonk, and G.J. Medema, Inactivation credit of UV radiation for viruses, bacteria and protozoan (oo)cysts in water: A review. *Water Research*, 2006. 40(1): p. 3-22.
- Hadi, J., et al., Control Measures for SARS-CoV-2: A Review on Light-Based Inactivation of Single-Stranded RNA Viruses. *Pathogens*, 2020. 9(9).
- Horton, L., et al., Spectrum of virucidal activity from ultraviolet to infrared radiation. *Photochem Photobiol Sci*, 2020.
- Wang, Y.X., et al., Unique epidemiological and clinical features of the emerging 2019 novel coronavirus pneumonia (COVID-19) implicate special control measures. *Journal of Medical Virology*, 2020. 92(6): p. 568-576.
- Ren, Y., L. Li, and Y.M. Jia, New Method to Reduce COVID-19 Transmission-The Need for Medical Air Disinfection is Now. *Journal of Medical Systems*, 2020. 44(7).
- Kohli, I., et al., UVC Germicidal Units: Determination of Dose Received and Parameters to be Considered for N95 Respirator Decontamination and Reuse. *Photochemistry and Photobiology*, 2020, 96: 1083-1087.
- Baluja, A., et al., UV light dosage distribution over irregular respirator surfaces. Methods and implications for safety. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 2020. 17(9): p. 390-397.
- Buonanno, M., et al., Far-UVC light (222 nm) efficiently and safely inactivates airborne human coronaviruses. *Scientific Reports*, 2020. 10(1).
- dos Santos, T. and de Castro, L.F., Evaluation of a portable Ultraviolet C (UV-C) device for hospital surface decontamination. *Photodiagnosis and Photodynamic Therapy*, 2021. 33: 102161
- Sabino, C.P., Ball, A.R., Baptista, M.S., Dai, T.H., Hamblin, M.R., Ribeiro, M.S., Santos, A.L., Sellaera, F.P., Tegos, G.P., and Wainwright, M., Light-based technologies for management of COVID-19 pandemic crisis. *Journal of Photochemistry and Photobiology B-Biology*, 2020, 212:111999.
- Shimabukuro, P.M.S.; Duarte, M.L.; Imoto, A.M.; Atallah, A.N.; Franco, E.S.B.; Peccin, M.S.; Taminato, M., Environmental cleaning to prevent COVID-19 infection. A rapid systematic review. *Sao Paulo Medical Journal*, 2020. 138(6):505-514
- Kowalski, W. 2009: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Darnell, M.E.R., et al., Inactivation of the coronavirus that induces severe acute respiratory syndrome, SARS-CoV. *Journal of Virological Methods*, 2004. 121(1): p. 85-91.
- Braga, G., et al., Molecular and physiological effects of environmental UV radiation on fungal conidia. *Current Genetics*, 2015. 61(3): p. 405-425.
- Andersen, B.M., et al., Comparison of UVC light and chemicals for disinfection of surfaces in hospital isolation units. *Infection Control and Hospital Epidemiology*, 2006. 27(7): p. 729-734.
- Pavia, M., et al., The effect of ultraviolet-C technology on viral infection incidence in a pediatric long-term care facility. *American Journal of Infection Control*, 2018. 46(6): p. 720-722.
- Welch, D., et al., Far-UVC light: A new tool to control the spread of airborne-mediated microbial diseases. *Scientific Reports*, 2018. 8.
- Buonanno, M., et al., 207-nm UV Light - A Promising Tool for Safe Low-Cost Reduction of Surgical Site Infections. I: In Vitro Studies. *Plos One*, 2013. 8(10).
- Hamzavi, I.H., et al., Ultraviolet germicidal irradiation: Possible method for respirator disinfection to facilitate reuse during the COVID-19 pandemic. *Journal of the American Academy of Dermatology*, 2020. 82(6): p. 1511-1512.
- Sabino, C.P., et al., UV-C (254 nm) lethal doses for SARS-CoV-2. *Photodiagnosis Photodyn Ther*, 2020: p. 101995.
- Fiorillo, L., et al., COVID-19 Surface Persistence: A Recent Data Summary and Its Importance for Medical and Dental Settings. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020. 17(9).
- Cadet, J., Harmless Effects of Sterilizing 222-nm far-UV Radiation on Mouse Skin and Eye Tissues. *Photochem Photobiol*, 2020. 96(4): p. 949-950.
- Goldfarb, A.R. and Saidel, L. J. Ultraviolet absorption spectra of proteins. *Science* 195. 114(2954): p. 156-157.
- Douki, T., et al., Bipyrimidine photoproducts rather than oxidative lesions are the main type of DNA damage involved in the genotoxic effect of solar UVA radiation. *Biochemistry*, 2003. 42(30): p. 9221-9226.
- Walker, C.M. and G. Ko, Effect of ultraviolet germicidal irradiation on viral aerosols. *Environ Sci Technol*, 2007. 41(15): p. 5460-5.
- McDevitt, J.J., S.N. Rudnick, and L.J. Radonovich, Aerosol Susceptibility of Influenza Virus to UV-C Light. *Applied and Environmental Microbiology*, 2012. 78(6): p. 1666-1669.
- De Lima, F. and L. Bachmann, Spectroradiometry Applied to Dental Composite Light Curing. *Applied Spectroscopy Reviews*, 2012. 47(4): p. 256-271.
- McKinlay, A.F., et al., Guidelines on limits of exposure to ultraviolet radiation of wavelengths between 180 nm and 400 nm (incoherent optical radiation). *Health Physics*, 2004. 87(2): p. 171-186.
- Reed, N.G., The History of Ultraviolet Germicidal Irradiation for Air Disinfection. *Public Health Reports*, 2010. 125(1): p. 15-27.
- Lytle, C.D. and J.L. Sagripanti, Predicted inactivation of viruses of relevance to biodefense by solar radiation. *Journal of Virology*, 2005. 79(22): p. 14244-14252.
- Buonanno, M., et al., 207-nm UV Light-A Promising Tool for Safe Low-Cost Reduction of Surgical Site Infections. II: In-Vivo Safety Studies. *Plos One*, 2016. 11(6).
- Buonanno, M., et al., Germicidal Efficacy and Mammalian Skin Safety of 222-nm UV Light. *Radiation Research*, 2017. 187(4): p. 483-491.
- Ponnaiya, B., et al., Far-UVC light prevents MRSA infection of superficial wounds in vivo. *Plos One*, 2018. 13(2).
- Yamano, N., et al., Long-term effect of 222-nm ultraviolet lamp on mice highly susceptible to developing ultraviolet-induced skin tumors. *Journal of Investigative Dermatology*, 2019. 139(5): p. S126-S126.

36. Fukui, T., et al., Exploratory clinical trial on the safety and bactericidal effect of 222-nm ultraviolet C irradiation in healthy humans. *Plos One*, 2020. 15(8).
37. Yamano, N., et al., Long-term Effects of 222-nm ultraviolet radiation C Sterilizing Lamps on Mice Susceptible to Ultraviolet Radiation. *Photochemistry and Photobiology*, 2020. 96(4): p. 853-862.
38. Narita, K., et al., Chronic irradiation with 222-nm UVC light induces neither DNA damage nor epidermal lesions in mouse skin, even at high doses. *Plos One*, 2018. 13(7).
39. First, M., et al., Fundamental factors affecting upper-room ultraviolet germicidal irradiation - part I. Experimental. *J Occup Environ Hyg*, 2007. 4(5): p. 321-31.
40. Rudnick, S.N. and M.W. First, Fundamental factors affecting upper-room ultraviolet germicidal irradiation - Part II. Predicting effectiveness. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 2007. 4(5): p. 352-362.
41. Gardner, D.W.M. and G. Shama, Modeling UV-induced inactivation of microorganisms on surfaces. *Journal of Food Protection*, 2000. 63(1): p. 63-70.

Contato:

Luciano Bachmann
Departamento de Física, FFCLRP, USP
Av. dos Bandeirantes, 3900 CEP 14040-901,
Ribeirão Preto-SP
L.B@USP.BR