

Artigo Técnico

Desenvolvimento de um purificador de ar com radiação UVC e filtro HEPA no contexto de COVID-19

Development of an air purifier with UVC radiation and HEPA filter in the context of COVID-19

Julio Min Fei Zhang^{1*} , Alyssa El Chihimi de Andrade² , Felipe Augusto Moraes Machado³ , Larissa Bornia Ghilardi² , Barbara Medeiros Almeida³ , Beatriz Vilas Boas Pugliese Falararo² , Gustavo Alves Machado⁴ , Ana Paula Mendes Emygdio^{5,6} , Guilherme Martins Pereira^{5,8} , Daniel Varela Magalhães⁷ , Arturo Forner-Cordero³ , Pérola de Castro Vasconcellos⁸ 

RESUMO

A transmissão de infecções respiratórias tem importante impacto na saúde humana, sobretudo no atual contexto da pandemia de COVID-19. Neste trabalho, discute-se um purificador de ar que utiliza radiação ultravioleta-C (UVC) e filtro *high efficiency particulate air* (HEPA) como mecanismos para descontaminar ambientes internos com baixa circulação de ar. Para avaliar os parâmetros físico-químicos do equipamento e sua ação microbicida, foram determinados a irradiância produzida pela lâmpada, a vazão na entrada e saída do dispositivo, as alterações na concentração de ozônio e o potencial de descontaminação do equipamento para *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli* e *Candida albicans*. A dose total de radiação UVC que o ar recebe ao passar pelo equipamento foi de 8014 $\mu\text{J cm}^2$, o que representaria a inativação de até 80% de Sars-CoV-2 no ar. Além disso, a eficiência de filtração foi reduzida para cerca de 60% com a diminuição do tamanho da partícula para partículas com menos de 1 μm e manteve-se acima de 90% para $\text{PM}_{2.5}$ e PM_{10} . Nos testes microbiológicos, observou-se redução de 99,4, 99,9 e 99,5% para *S. aureus*, *E. coli* e *C. albicans*, respectivamente, em 11 minutos.

Palavras-chave: COVID-19; purificador de ar; radiação ultravioleta; filtro de ar.

ABSTRACT

The transmission of respiratory infections has an important role on human health, especially in the current context of the COVID-19 pandemic. In this work, we present the assessment of an air purifier that uses ultraviolet-C (UVC) radiation and a "High Efficiency Particulate Air" (HEPA) filter as mechanisms to decontaminate indoor environments with low air circulation. To assess the physicochemical and microbicidal characteristics of the equipment, the irradiance produced by the lamp, the flow rate at the entrance and exit of the device, possible changes in the ozone concentration and the equipment's decontamination potential for *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli* and *Candida albicans*. The total dose of UVC radiation that the air receives when passing through the equipment was 8014 $\mu\text{J cm}^2$, which would represent an inactivation of up to 80% of SARS-CoV-2 in the air. Furthermore, the filtration efficiency dropped with smaller particle diameter, and reduced to around 60% for particles with less than 1 μm and remained above 90% for $\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10} . In microbiological tests, there was a reduction of 99.4%, 99.9% and 99.5% for *S. aureus*, *E. coli* and *C. albicans*, respectively, in 11 minutes.

Keywords: COVID-19; disinfectants; ultraviolet rays; air filters.

INTRODUÇÃO

Em dezembro de 2019, ocorreram os primeiros casos de infecção pelo coronavírus Sars-CoV-2, causador da doença que ficou conhecida como COVID-19 (BRASIL, 2021; OMS, 2021a). Com a evolução da pandemia e o colapso dos serviços de saúde, houve um aumento da busca por tecnologias capazes de reduzir a transmissão do Sars-CoV-2 de forma rápida e eficaz, especialmente em ambientes

fechados, que representam o mais elevado risco de contágio (CORREIA *et al.*, 2020). Além disso, a importância da qualidade do ar de ambientes internos se tornou mais evidente, tanto para vírus quanto para poluentes, como o material particulado (BAINY *et al.*, 2021). A habilidade de transmissão de doenças por aerodispersóides vindos de longas distâncias é relevante para diversos agentes etiológicos de moléstias transmissíveis, sejam bacterianas, sejam virais (TELLIER

¹Faculdade de Medicina, Universidade de São Paulo – São Paulo (SP), Brasil.

²Instituto de Ciências Biomédicas, Universidade de São Paulo – São Paulo (SP), Brasil.

³Escola Politécnica, Universidade de São Paulo – São Paulo (SP), Brasil.

⁴Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo – São Paulo (SP), Brasil.

⁵Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo – São Paulo (SP), Brasil.

⁶Department of Civil & Environmental Engineering, University of Surrey, Global Centre for Clean Air Research – Guildford, Reino Unido.

⁷Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo – São Carlos (SP), Brasil.

⁸Instituto de Química, Universidade de São Paulo – São Paulo (SP), Brasil.

*Autor correspondente: juliomin@usp.br

Conflitos de interesse: os autores declaram não haver conflitos de interesse.

Financiamento: AME Digital e Fundação Universidade de São Paulo.

Recebido: 14/01/2022 – **Aceito:** 03/08/2022 – **Reg. ABES:** 20220114

et al., 2019). Também se tem demonstrado que o Sars-CoV-2 permanece viável em aerodispersóides por horas, facilitando a rápida e ampla distribuição do vírus (MORAWSKA; MILTON, 2020; VAN DOREMALEN et al., 2020).

Uma das formas de eliminar partículas virais presentes no ar ou superfícies e que tem sido bastante discutida no contexto da COVID-19 é a luz ultravioleta-C (UVC) (faixa de 200-280 nm), que apresenta considerável propriedade germicida (HADI et al., 2020; HEILINGLOH et al., 2020; STRAKHOVSKAYA et al., 2020). Além de vantagens como o amplo espectro de ação e o pouco tempo de exposição, essa luz é fortemente absorvida por bases de RNA e DNA, de modo a provocar danos estruturais nessas macromoléculas, inativando os vírus e tornando-os incapazes de se replicarem (LINDBLAD et al., 2020). A luz UVC já teve a sua eficiência na desativação do Sars-CoV-1 (DARNELL et al., 2004) e outros coronavírus (BUONANNO et al., 2020). Trabalhos que investigaram a suscetibilidade do próprio Sars-CoV-2 à irradiação por UVC (254 nm) também vêm sendo realizados. Heilingloh et al. (2020) mostraram a sua inativação completa após 9 minutos de exposição a uma dose de 1.940 $\mu\text{W cm}^{-2}$. Embora haja poucas conclusões sobre a ação da luz UVC em partículas virais aerossolizadas, existindo apenas algumas simulações no caso do Sars-CoV-2 (BEGGS; AVITAL, 2020), estima-se que as doses de ultravioleta necessárias para desinfecção de vírus aerossolizados são consideravelmente menores que as necessárias para a desinfecção em meio líquido (KOWALSKI, 2009; BUONANNO et al., 2020), o que corrobora o seu potencial contra o agente da COVID-19.

Outra ferramenta empregada na redução de transmissão aérea de patógenos é o filtro *high efficiency particulate air* (HEPA), capaz de filtrar principalmente partículas maiores que 3 μm de diâmetro (DEE et al., 2006). Tais filtros são construídos com microfibras de vidro, e o bloqueio das partículas dá-se por três mecanismos: impactação, interceptação e difusão (PERRY; AGUI; VIJAYAKIMAR, 2016). A eficiência de filtração do filtro HEPA é próxima a 100%, com pequena redução em partículas que medem entre 0,1 e 1 μm (PERRY; AGUI; VIJAYAKIMAR, 2016). Embora o diâmetro do Sars-CoV-2 seja de cerca de 100 nm (BAR-ON et al., 2020), sua transmissão aérea ocorre por meio de gotículas respiratórias; um espirro pode gerar gotículas que variam entre 0,5 e 12 μm , e a tosse, em geral, produz aerossóis na maior parte entre 1 e 4 μm (ATKINSON et al., 2009). Nesse contexto, o Centers for Disease Control and Prevention (CDC) e a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA) recomendam o uso de purificadores compostos de HEPA como estratégia adjunta para o controle da transmissão de Sars-CoV-2, reduzindo a possível contaminação em espaços fechados (CDC, 2021; EPA, 2021).

Este estudo teve como objetivo avaliar os parâmetros físico-químicos e microbicidas de um purificador de ar que utiliza a luz UVC e o filtro HEPA com a finalidade de descontaminar ambientes internos com baixa circulação de ar. Para isso, foram determinadas a irradiância produzida pela lâmpada, a vazão na entrada e na saída do dispositivo, a medição da concentração de ozônio, além do potencial de descontaminação do equipamento para *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli* e *Candida albicans*.

MATERIAIS E MÉTODOS

O purificador com dimensões de 157 × 197 × 390 mm é composto de uma caixa formada por chapa de *medium density fiberboard* (MDF), um filtro HEPA aspirador Equipt Electrolux (Electrolux, Suécia), um exaustor San Ace B97 24 V

(DC) 0,9 A modelo 9BAM24P2G03 e uma lâmpada Osram Puritec Hns 18 W UVC germicida 4 pinos (Osram Licht AG, Alemanha). Ressalta-se que a lâmpada está inserida em um tubo de policloreto de vinila (PVC) 50 mm, utilizado para direcionar o ar, garantindo a segurança do usuário, que não entrará em contato direto com a luz caso o equipamento seja aberto (Figura 1). O princípio de funcionamento do equipamento consiste no exaustor realizando a sucção de ar e forçando sua passagem pelo filtro, sendo então o fluxo direcionado até a lâmpada e em seguida retornando ao ambiente com menor quantidade de contaminantes.

Determinação da irradiância produzida pela lâmpada e dose de UVC

As medições foram realizadas utilizando-se um espectrorradiômetro portátil (Luzchem, SPR4002). Para as medidas, o sensor do medidor foi posicionado a 9 cm do equipamento (medidas internas), ou diretamente na saída de ar (para a aferição da radiação residual). Os valores dos sinais lidos foram convertidos para irradiância (W m^{-2}) utilizando um *software* que acompanha o equipamento. Para o cálculo da dose ultravioleta, o espectro de irradiância é integrado ao longo do comprimento de onda na faixa do pico de interesse (250-260 nm), resultando na irradiância ultravioleta a distância d de I_d [W m^{-2}]. Considerando a emissão superficial da lâmpada tubular e assumindo perdas por absorção ou espalhamento, é possível converter esse valor ao esperado a qualquer distância radial d do centro da lâmpada e altura h (referente à base da lâmpada) (GRIMES; ROBBINS; O'HARE, 2010), como na Equação 1:

$$I(d,h) = S_R \left(\frac{L - h}{d\sqrt{d^2 + (L - h)^2}} + \frac{h}{d\sqrt{d^2 + h^2}} \right) \quad (1)$$

Em que:

S_R : uma constante da lâmpada relacionada com a potência;

L : o comprimento da lâmpada.

A dose que uma partícula recebe é a integral da irradiância pelo tempo exposto. Para estimar esse tempo, foi realizada uma simulação pelo *software* ANSYS® 2021 R2.

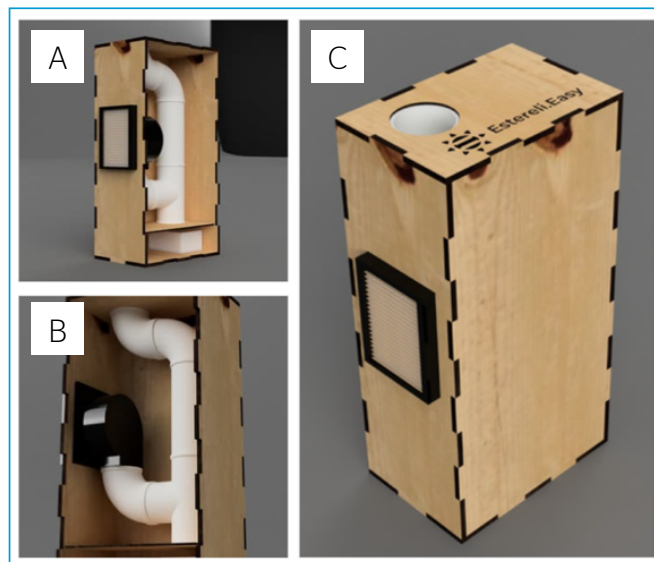


Figura 1 - Representação esquemática do equipamento.

Vazão do dispositivo

Para o cálculo da vazão de ar no equipamento, foram medidas inicialmente as velocidades do ar tanto na entrada (captação) quanto na saída de ar (exaustão) utilizando um anemômetro de fio quente. Esse dispositivo foi posicionado à distância de 7 cm do filtro (captação) e à distância de 4,5 cm da tubulação (exaustão) do filtro, permanecendo nessas posições por 1 minuto para garantir estabilidade na medição. Esse processo repetiu-se 16 vezes ao longo do dia. Com a velocidade do ar obtida, é possível calcular a vazão (Equação 2):

$$Q = VA \quad (2)$$

Em que:

Q: a vazão;

V: a velocidade do ar;

A: a área de seção transversal.

Para verificar se a vazão do equipamento era suficiente para limpeza do ar, foram seguidas as recomendações da Association of Home Appliance Manufacturers e do American National Standards Institute, descritas em Shaughnessy e Sextro (2006). Para isso, foi necessário calcular o *clean air delivery rate* (CADR), uma variável utilizada para confirmar se o equipamento atende aos requisitos mínimos para limpeza de um ambiente. A Equação 3 (SHAUGHNESSY; SEXTRO, 2006), utilizada para calcular o CADR do equipamento, está descrita a seguir (ver Material Suplementar 1 para ver todo o equacionamento):

$$CADR = Q(1 - k) \quad (3)$$

Em que:

k: a razão entre a concentração de partículas na saída e a concentração de partículas na entrada.

Para verificar a eficiência (ϵ) do equipamento em um cômodo de volume V, utilizou-se a Equação 4 (SHAUGHNESSY; SEXTRO, 2006):

$$\epsilon = \frac{CADR}{V(\lambda_v + \lambda_d) + CADR} \quad (4)$$

Em que:

λ_v : taxa de infiltração de partículas pelo movimento natural do ar (próximo de $1,0 \text{ h}^{-1}$);

λ_d : taxa de deposição das partículas na superfície ($1,0 \text{ h}^{-1}$ para partículas de tamanho $2,5 \mu\text{m}$).

Medição de concentrações de ozônio e material particulado

Medição de concentrações de ozônio

O experimento de medição de ozônio foi realizado em uma sala semifechada e sem ar-condicionado, com o uso de um analisador Thermo (Model 49i Ozone Analyzer, Thermo Fisher Scientific) (ANDRADE *et al.*, 2012). Foram feitas medições a cada 5 minutos, alternando entre a entrada de ar e a exaustão do equipamento. O registro foi iniciado no momento em que o purificador foi ligado.

Capacidade de filtração do material particulado ambiente

Para verificar a capacidade de filtração do equipamento em uma sala, a concentração de material particulado no ambiente foi medida com um monitor de material particulado (DC1700-PM $\text{PM}_{2,5}/\text{PM}_{10}$ AQM; Dyllos, Inc); esse aparelho é capaz de fazer leituras de $\text{MP}_{2,5}$ e MP_{10} ($\mu\text{g m}^{-3}$) (KUMAR *et al.*, 2021). $\text{MP}_{2,5}$ é o material particulado com diâmetro aerodinâmico inferior a $2,5 \mu\text{m}$, e MP_{10} , inferior a $10 \mu\text{m}$. O experimento foi realizado em uma sala pequena fechada com 13 m^3 . O monitor de material particulado foi posicionado a cerca de $0,5 \text{ m}$ de distância da saída de ar, a $0,9 \text{ m}$ do chão, posicionado de forma similar a uma pessoa sentada próxima ao equipamento. Para averiguar a influência do purificador na concentração de material particulado na sala, a medição ocorreu com o equipamento ligado e desligado em momentos alternados. O teste durou aproximadamente 3 horas, e o equipamento esteve ligado em três períodos alternados com três intervalos em que esteve desligado (20 min).

Capacidade de filtração do material particulado ambiente com nebulizador

Em uma sala fechada de 28 m^3 , na presença de três pessoas, foram posicionados três bicos nebulizadores suspensos em três pontos distintos. O purificador foi posicionado no centro da área demarcada pelos nebulizadores juntamente com uma célula de contenção ($0,04 \text{ m}^3$), que foi inserida na exaustão do equipamento. Foram utilizados dois medidores de material particulado (Handheld 3016-IAQ) para quantificar partículas cujos diâmetros eram inferiores a $0,3, 0,5, 1, 2,5, 5$ e $10 \mu\text{m}$, sendo um deles posicionado próximo ao local de captação do equipamento e o outro na exaustão, dentro da célula, ambos a uma distância de 10 cm do equipamento. As condições de temperatura e umidade da sala foram monitoradas durante todo o experimento.

Inicialmente, com o esquema experimental já montado, foram feitas medições de material particulado no ambiente com o equipamento desligado e sem nebulização de partículas por cerca de 10 minutos. Em seguida, uma solução contendo partículas de látex de poliestireno (PSL) foi preparada mediante a adição de 50 gotas de suspensão de micropartículas de poliestireno de $2,5 \mu\text{m}$ (Thermo Scientific™) e 50 gotas da suspensão de micropartículas de $10 \mu\text{m}$ (Thermo Scientific™) em 1 L de água deionizada. Essa solução foi, então, distribuída em três recipientes (300 mL de solução para cada recipiente) ligados às sondas, que foram conectadas a uma bomba e a um bico nebulizador. O equipamento foi ligado, e foram feitas cinco medições a cada 5 minutos.

Filtração de *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus* e *Candida albicans*

Estrutura laboratorial para os experimentos microbiológicos

Os testes microbiológicos foram realizados como demonstrado no Material Suplementar 2. De forma resumida, o equipamento foi colocado em posição horizontal em um fluxo laminar. Duas células de contenção foram adicionadas ao equipamento: uma na captação, em que foi embutido um nebulizador para liberar os microrganismos; e outra na exaustão, na qual foram posicionados dois amostradores de ar do tipo Andersen, com o objetivo de coletar os microrganismos após o ar nebulizado ter passado pelo equipamento (MORRIS *et al.*, 2000). As células de contenção possuíam um pequeno orifício no qual foi colocado um filtro de éster celulose com poros de tamanho de $0,45 \mu\text{m}$, o qual permitia a passagem de ar, mas impedia o escape de microrganismos.

Os microrganismos analisados foram uma bactéria gram-positiva (*S. aureus*), uma bactéria gram-negativa (*E. coli*) e um fungo (*C. albicans*). O ar nebulizado foi preparado da seguinte forma: *pellets* liofilizados na quantidade de 10^7 unidades formadoras de colônias (UFC) das cepas utilizadas foram hidratados em 1 mL de solução tampão de fosfato (34 g de fosfato de potássio monobásico anidro P.A., KH_2PO_4 para 1 L de água purificada), incubadas por 15 minutos a $35 \pm 2^\circ\text{C}$ (bactérias e fungos) e, em seguida, diluídas em 100 mL de água estéril, de modo que se obtivessem soluções desses microrganismos em concentração de 10^5 UFC mL^{-1} .

Os equipamentos Andersen continham meios de cultura seletivos (ágar Sabouraud dextrose, ágar *chromocultbac* e *plate count agar*), e as coletas foram realizadas em duplicatas. Obtiveram-se resultados quantitativos diretamente pela contagem das UFC resultantes (MORRIS *et al.*, 2000).

Coleta das amostras

Etapa 1: controle

As amostras foram coletadas por meio de *swab* e placas de Petri com o equipamento Andersen. Inicialmente, utilizando um *swab* plástico com meio Stuart, foi feita a coleta da superfície da célula de exaustão antes de ligar o aparelho. Essa coleta teve como objetivo a quantificação de microrganismos existentes previamente ao experimento naquele local. Após essa coleta, fez-se o *swab plating*, em que diluições seriadas em solução salina (1,25 mL de tampão fosfato com 5 mL de solução de cloreto de magnésio diluído em água purificada) do material coletado foram realizadas, seguido pela transferência dessas amostras para placas de Petri contendo meios de cultura seletivos. Ágar Sabouraud dextrose (Cat. #CM0147, Oxoid / Thermo Scientific™) na presença de cloranfenicol é seletivo para o cultivo de fungos; *plate count agar* (Cat. #CM0325, Oxoid / Thermo Scientific™) é um meio generalista para bactérias; e ágar *chromocultbac* (Probac do Brasil Produtos Bacteriológicos LTDA.) é um meio de cultura cromogênico utilizado para detecção e identificação de *E. coli*. O resultado foi obtido em UFC/*swab*.

Após a coleta com o *swab*, 5 mL de solução tampão fosfato (branco) foi nebulizada na célula de captação, e o equipamento foi ligado por 10 minutos. As partículas presentes no ar foram coletadas em placas de cultura contendo ágar Sabouraud dextrose e *plate count agar*. Ao final do experimento, outra coleta da superfície da célula de exaustão foi feita com a finalidade de quantificar os microrganismos que ficaram retidos e não foram coletados nos meios de cultura utilizados.

Etapa 2: microrganismos

A segunda etapa consistiu na nebulização dos microrganismos. O procedimento geral utilizado para cada microrganismo se iniciou com a nebulização de 5 mL da solução contendo o microrganismo escolhido. O equipamento foi ligado por 10 minutos, e a coleta foi realizada utilizando duas placas contendo meio de cultura específico para cada microrganismo. Após esse tempo, o nebulizador foi desligado, e o aparelho continuou ligado por mais 1 minuto. Ao final do experimento, houve mais uma coleta da superfície da célula de exaustão. Além disso, a solução de microrganismo que sobrou no nebulizador foi colocada em duas placas de Petri para que, assim, os microrganismos que não foram nebulizados pudessem ser quantificados. Por fim, o nebulizador foi lavado com água estéril para que a nebulização de outro microrganismo pudesse ser realizada.

Os meios de cultura utilizados foram *plate count agar*, ágar *chromocultbac* e ágar Sabouraud dextrose para a *S. aureus*, *E. coli* e *C. albicans*, respectivamente. Por fim, as bactérias foram incubadas por 48 horas a $35 \pm 2^\circ\text{C}$, e os fungos, por 72 horas a $25 \pm 2^\circ\text{C}$.

A solução nebulizada foi calculada em UFC como a quantidade de bactérias e fungos no inóculo inicial, subtraindo-se a quantidade da solução que ficou retida no nebulizador (solução não nebulizada).

Para os cálculos de UFC por volume (UFCv), foi empregada a Equação 5:

$$UFCv = \frac{UFC}{Q t} \quad (5)$$

Em que:

UFC: o número de UFC (considerando a solução nebulizada para cálculo do inóculo nebulizado e a média dos resultados obtidos nos testes com o amostrador);
Q: a vazão do dispositivo (considerado o fluxo de $28,3 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$ para o cálculo do amostrador e o fluxo de exaustão do purificador para o cálculo do inóculo nebulizado);

t: o tempo de amostragem (10 min para o cálculo do inóculo nebulizado e 11 min para o cálculo do amostrador).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Determinação da irradiância produzida pela lâmpada e dose de ultravioleta-C

Trabalhos prévios concluíram que a faixa de comprimento de onda ultravioleta mais eficaz para a inativação de microrganismos está entre 220 e 280 nm, com pico de eficácia próximo a 265 nm (HEILINGLOH *et al.*, 2020), o que corresponde ao comprimento de onda da luz UVC. Uma vez que a eficácia da irradiação da luz ultravioleta na inativação de microrganismos depende principalmente da dose em $\mu\text{J cm}^{-2}$ a qual eles são submetidos (REED, 2010), o grupo realizou um teste para determinar a irradiância emitida pela lâmpada tanto no interior da câmara, de modo a possibilitar o cálculo da dose incidida sobre os microrganismos captados pelo purificador, quanto na saída de ar, para verificar se há algum escape de luz UVC do aparelho que possa comprometer a segurança do usuário. Os dados de irradiância coletados no equipamento à distância de 9 cm da lâmpada estão representados na Figura 2.

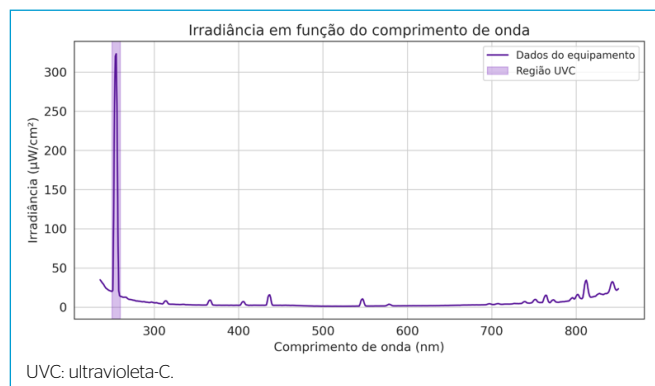


Figura 2 - Valores de irradiância em função do comprimento de onda para o equipamento. A região de interesse (250-260 nm) também está representada.

A irradiância máxima emitida pelo equipamento na região de interesse (250–260 nm) foi $1.448,67 \mu\text{W cm}^{-2}$. A irradiância medida na saída de ar do equipamento foi de apenas $3,5 \mu\text{W cm}^{-2}$, um valor seguro (IES, 2020), considerando que esse valor cai exponencialmente com a distância.

Como a distância máxima que uma partícula pode ter até a lâmpada é de 1 cm, tomou-se como base a distância de 0,5 cm para calcular a irradiância que ela recebe. Por meio da simulação realizada utilizando o *software* ANSYS® 2021 R2, o tempo que a partícula fica exposta à lâmpada foi de 0,04 segundo. Por intermédio da Equação 1 e com a informação de tempo obtida com a simulação, foi possível criar a curva de irradiância em função do tempo (Figura 3). Integrando essa curva, obteve-se que a dose total que o ar recebe no nosso equipamento era de $801,4 \mu\text{J cm}^{-2}$. De acordo com dados obtidos por Beggs e Avital (2020) e Biasin *et al.* (2021), essa dose apresentaria inativação de até 80% de Sars-CoV-2 no ar (Material Suplementar 3).

Vazão do dispositivo

Para o cálculo da velocidade do ar, 16 medições foram realizadas, gerando os *boxplots* da Figura 4.

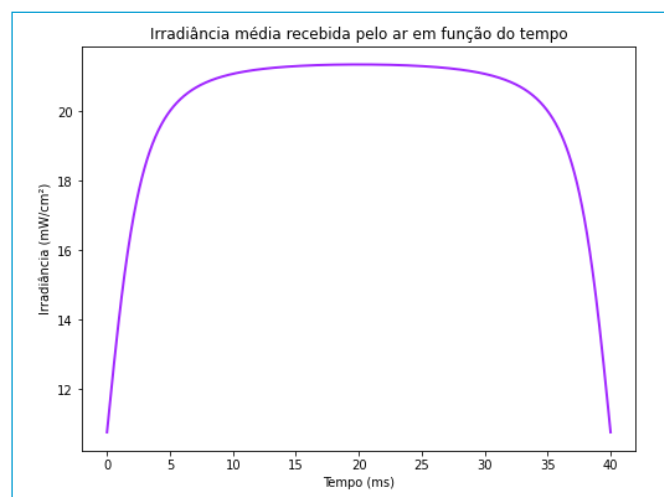


Figura 3 - Irradiância média que o ar recebe ao longo do tempo dentro do equipamento.

Como a área de entrada é grande (área do filtro), a vazão utilizada como referência foi a de saída, com valor médio de $32,98 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. O CADR, por sua vez, apresenta valor igual a $31,12 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ para partículas de tamanho igual a $2,5 \mu\text{m}$. Para verificar o tamanho máximo do ambiente em que o equipamento pode trabalhar, calculou-se o valor de eficiência para diferentes volumes. O resultado está na Figura 5.

Isso significa que o equipamento possui eficiência de pelo menos 50% (mínimo recomendado) em ambientes de até 15 m^3 , condições similares às do teste relatado nesta seção (SHAUGHNESSY; SEXTRO, 2006). O equipamento, então, é ideal para ambientes pequenos, como banheiros e alguns pequenos consultórios. Uma forma de melhorar o desempenho do equipamento seria aumentar a vazão, no entanto isso apresentaria impactos negativos no nível de ruído e na desinfecção por UVC.

Parâmetros de qualidade do ar

Capacidade de filtração de material particulado ambiente e emissões de ozônio

A medição da concentração de material particulado foi realizada para avaliar a melhoria da qualidade do ar interno em uma sala (Figura 6). O experimento ocorreu entre 15 e 19 h. A amostragem começou com a concentração externa de $\text{MP}_{2,5}$ de $11 \mu\text{g m}^{-3}$ (média horária; CETESB, 2021), subindo para $18 \mu\text{g m}^{-3}$ às 16 h e mantendo-se constante até o registro de redução a partir das 19 h ($10 \mu\text{g m}^{-3}$) (Material Suplementar 4). Apesar do aumento da concentração externa entre 15 e 16 h, percebeu-se redução na concentração interna de material particulado ao ligar o equipamento (momento I), o que também foi observado nos momentos III e IV (Figura 6). Sendo assim, os testes mostram que o equipamento pode reduzir as concentrações de material particulado em uma sala pequena. Outros testes foram realizados e estão relatados no Material Suplementar 4. No teste, viu-se que, após determinado tempo de uso, houve aumento nas razões $\text{MP}_{2,5}/\text{MP}_{10}$ ao longo do uso dos equipamentos em todos os testes realizados (Material Suplementar 4), o que sugere maior eficiência de filtração de partículas grossas (com diâmetros entre $2,5$ e $10 \mu\text{m}$).

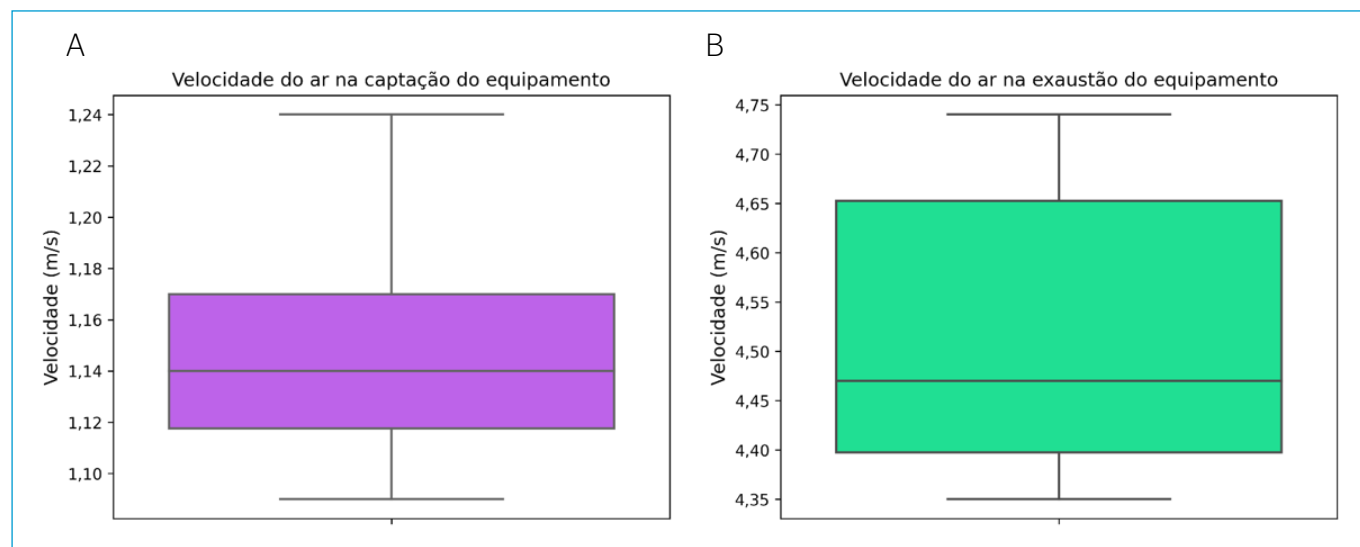


Figura 4 - Diagramas de caixa das velocidades na (A) entrada e na (B) saída do equipamento.

Os níveis de ozônio devem estar abaixo da concentração ambiental média, em 8 horas diárias, de $100 \mu\text{g m}^{-3}$ (aproximadamente 50 ppb), de acordo com recomendações da Organização Mundial da Saúde (2021b). No Brasil, a Resolução nº 003/90 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) define como máximo o valor de $160 \mu\text{g m}^{-3}$ no tempo médio de amostragem de 1 hora (apud INSTITUTO DE ENERGIA E MEIO AMBIENTE, 2012; CETESB, 2021). A concentração de ozônio medida na exaustão do equipamento não foi significativamente diferente da observada na sala (56 e $57 \mu\text{g m}^{-3}$ na exaustão e na sala, respectivamente). Logo, o equipamento não apresenta o risco de aumentar a concentração interna do poluente (Material Suplementar 4).

Capacidade de filtração de material particulado ambiente com nebulizador

O equipamento também foi testado com uso de nebulizador e revelou boa eficiência na redução para algumas faixas de tamanho de material particulado, como apresentado nas Figuras 7A e 7B. Como observado no teste realizado na sala, a eficiência de filtração foi menor com a diminuição do diâmetro da partícula, reduzindo para cerca de 60% as partículas menores de $1 \mu\text{m}$, porém mantendo-se acima de 90% $\text{MP}_{2,5}$ e MP_{10} (Figura 7B). O filtro empregado (Electrolux

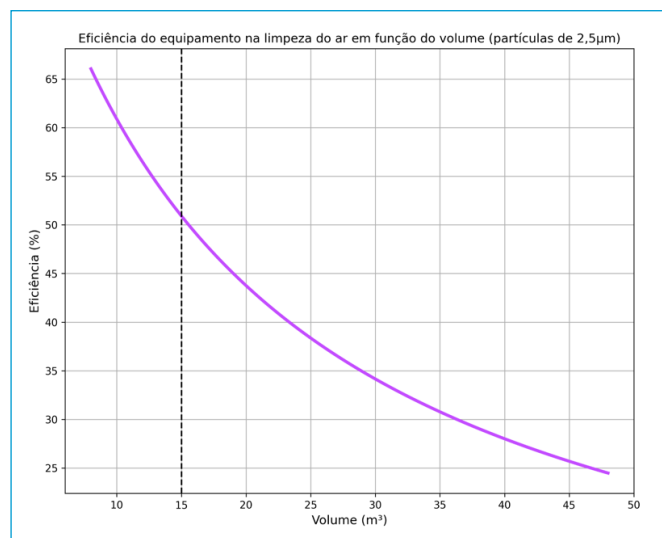


Figura 5 - Eficiência da limpeza do ar do equipamento em função do volume do ambiente. A linha tracejada representa o volume máximo do ambiente.

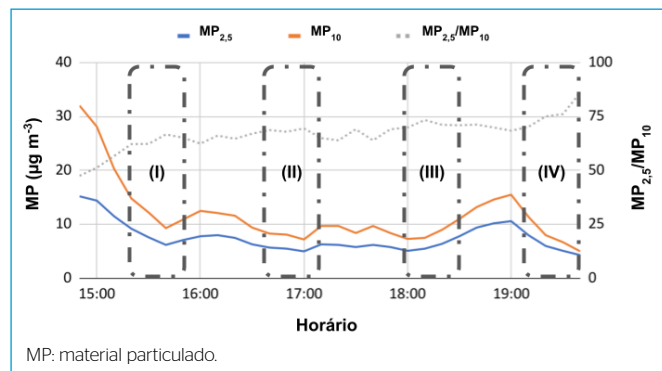


Figura 6 - Medição da concentração de $\text{MP}_{2,5}$ e MP_{10} ($\mu\text{g m}^{-3}$) em função do tempo no teste realizado com o equipamento. As áreas numeradas dentro do retângulo representam os momentos após a ativação dos purificadores (I, II, III e IV).

E147A) mostrou características de filtração similares às de um filtro HEPA (PERRY; AGUI; VIJAYAKIMAR, 2016). Nesse tipo de filtro as partículas em faixa de tamanho intermediário, de cerca de 100 a 400 nm, são removidas de forma menos eficiente (LOWTHER et al., 2020).

Embora o diâmetro do Sars-CoV-2 seja de cerca de 100 nm (BAR-ON et al., 2020), a transmissão aérea ocorre por meio de gotículas respiratórias geralmente maiores que $5 \mu\text{m}$ e aerossóis em geral menores que $5 \mu\text{m}$ que permanecem suspensos por mais tempo, sendo, portanto, uma preocupação (CHRISTOPHERSON et al., 2020). Assim, o filtro testado pode ser efetivo no controle da transmissão de Sars-CoV-2. Além disso, os filtros HEPA têm a capacidade de filtrar partículas que são inaláveis e podem provocar efeitos alérgicos, incluindo exacerbação de asma e aumento de admissão e mortalidade por doenças respiratórias e cardiológicas (COMEAP, 2010).

Filtração de Escherichia coli, Staphylococcus aureus e Candida albicans

As concentrações alcançadas após o tratamento do ar pelo purificador de ar foram comparadas com as concentrações inicialmente nebulizadas, sendo possível assim avaliar a porcentagem de redução da concentração dos microrganismos após a passagem pelo aparelho. Após a realização da etapa 1 (controle) da metodologia, as concentrações obtidas foram menores do que 3 UFC m^{-3} (Tabela 1 do Material Suplementar 5), o que indica que a concentração de microrganismos no aparelho na superfície da caixa de amostragem e na solução nebulizada era desprezível, como esperado.

A quantidade total de microrganismos nebulizados em UFC foi na ordem de grandeza de 10^4 , enquanto nas placas dos amostradores após nebulização e tratamento do ar pelo purificador de ar foram encontradas quantidades na ordem de grandeza de 10 a 10^2 UFC. Há, portanto, redução expressiva na quantidade de bactérias e fungos após a passagem pelo aparelho (Tabela 2 do Material Suplementar 5). Vale ressaltar que o resultado obtido pela coleta da superfície da caixa de amostragem após a nebulização dos microrganismos não foi relevante (menos de 1 UFC swab^{-1}).

Com o valor obtido por intermédio da medição do fluxo de ar na exaustão do aparelho, foi possível calcular a concentração da solução nebulizada na exaustão em UFC por m^3 . Dessa forma, nebulizaram-se 89.476 UFC m^{-3} de *S. aureus*, 89.922 UFC m^{-3} de *E. coli* e 89.704 UFC m^{-3} de *C. albicans* na região de captação do aparelho, enquanto foram encontrados 554, 69 e 419 UFC m^{-3} , respectivamente, no ar liberado pelo purificador, após a solução nebulizada ter percorrido o aparelho. Logo, foi possível observar redução de 99,4, 99,9 e 99,5% para *S. aureus*, *E. coli* e *C. albicans*, nessa ordem, após o equipamento ter funcionado por 11 minutos (Figura 8).

Esses resultados indicam que o equipamento é capaz de reduzir a concentração de microrganismos presentes no ar, contudo é importante considerar que pode haver decaimento natural desses microrganismos, não relacionado com o funcionamento do equipamento, que não foi levado em conta nessa análise. O decaimento natural pode ocorrer por diversos fatores ambientais, tais como oxidação por causa do oxigênio presente no ar, temperatura e desidratação. Ressalta-se que bactérias decaem mais rapidamente que vírus (KOWALSKI; BAHNFLETH, 1998).

A lâmpada UVC em conjunto com o filtro de ar mostrou ser capaz de reduzir a concentração de patógenos como os vírus e as bactérias tanto em estudos feitos em laboratório (> 99%) quanto em um modelo de recirculação de

ar experimental (31,6 a 63%) (EISENLÖFFEL *et al.*, 2019). Além disso, a combinação de luz UVC com filtro HEPA mostra ter as capacidades de inativar e aprisionar microrganismos, contribuindo para a melhora da qualidade do ar em locais fechados (LUNA *et al.*, 2008).

Além do potencial de redução do número de microrganismos pela combinação de UVC e filtro HEPA, na literatura também são apontados os benefícios do uso de cada tecnologia individualmente. Uma revisão sistemática sugere que os purificadores de ar portáteis baseados em filtro HEPA estão entre os mais eficientes na descontaminação de partículas com tamanhos relevantes para o contexto do Sars-CoV-2, considerando o tamanho do virion e das gotículas respiratórias que possam carregá-lo, por exemplo (LIU *et al.*, 2021). Esses purificadores baseados em filtro HEPA também foram analisados para outros microrganismos. Em quartos isolados para *S. aureus* resistentes à meticilina, o emprego desses aparelhos reduziu significativamente a contaminação de superfícies (BOSWELL; FOX, 2006).

Atualmente, diversos estudos que discutem o uso da luz UVC como estratégia no controle do contágio do vírus da COVID-19 estão sendo realizados tendo como base o uso de outros microrganismos (CADNUM *et al.*, 2020; CHOI *et al.*, 2021). Sabe-se que os vírus de fita simples, tais como o Sars-CoV-2, são mais suscetíveis aos danos provocados pela luz ultravioleta em relação aos de fita dupla, assim como a presença de RNA parece representar maior suscetibilidade no que tange à presença de DNA (TSENG; LI, 2005).

Além do tipo de ácido nucleico, a presença ou ausência de parede celular, bem como a sua espessura, também parecem estar ligadas à suscetibilidade dos microrganismos à luz ultravioleta. Alguns vírus aerotransportados, tais como os bacteriófagos MS2 e T7, foram inativados com doses de ultravioleta semelhantes às relatadas para *E. coli* e significativamente mais baixas do que as relatadas para bactérias gram-positivas, gram-negativas e fungos (TSENG; LI, 2005). Esses dados, em conjunto com os resultados obtidos neste estudo, demonstram a alta eficiência da utilização da luz UVC contra microrganismos e sugerem que o seu uso pode ser capaz de inativar o novo coronavírus e suas variantes.

Apesar disso, são necessários mais estudos para elucidar como cada um dos outros componentes da estrutura viral, tais como capsídeo, ausência ou

presença de envelope e tamanho do genoma, interferem na suscetibilidade à luz UVC. Ademais, estudos futuros envolvendo o próprio Sars-CoV-2 aerossolizado poderão comprovar a eficiência do purificador de ar empregado neste trabalho na inativação do agente causador da COVID-19.

CONCLUSÃO

O trabalho apresentou a construção de um purificador de ar voltado para o controle de microrganismos em suspensão e gotículas que os carregam, utilizando os princípios de desinfecção da radiação UVC e filtro HEPA.

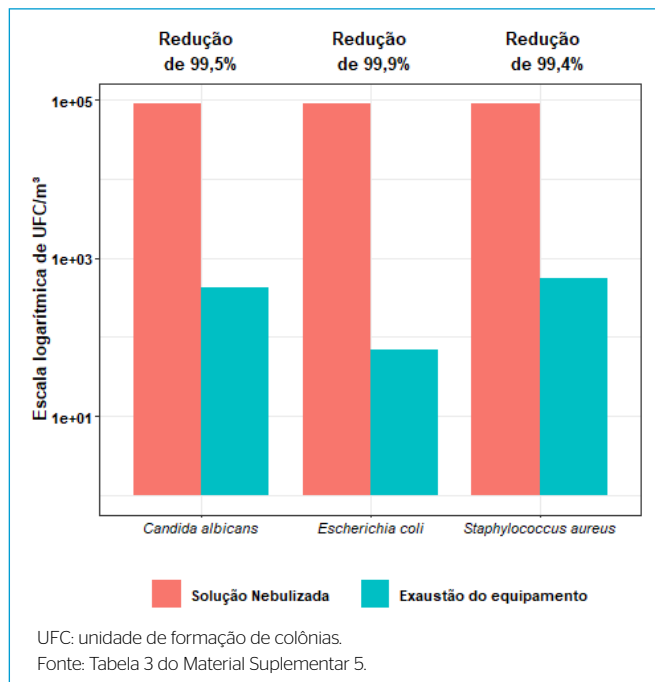


Figura 8 - Concentração em escala logarítmica (UFC m⁻³) da solução nebulizada (antes de passar pelo purificador) e da exaustão do equipamento (após a passagem pelo equipamento), para cada microrganismo estudado.

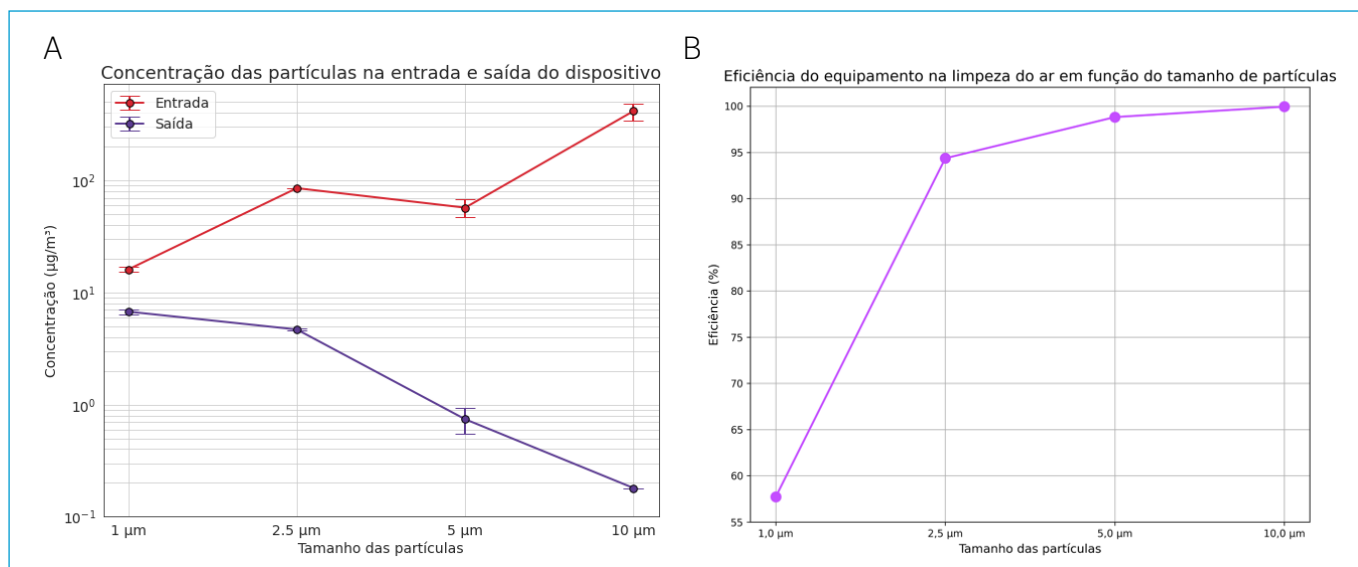


Figura 7 - (A) Concentração das partículas na entrada e na saída do dispositivo e (B) eficiência de filtração por tamanho de partícula.

Redução nos níveis ambientes de $MP_{2,5}$ e MP_{10} foi observada nos testes de operação com o equipamento em uma sala pequena, de volume comparável a um pequeno consultório ou um quarto de hospital. Eficiência de filtração acima de 90% foi observada para $MP_{2,5}$ e MP_{10} . Assim sendo, o equipamento tem a capacidade de filtrar parte das gotículas geradas em um espirro (entre 0,5 e 12 μm), além de aerossóis produzidos na tosse. A luz UVC utilizada no equipamento apresentou taxa de inativação viral máxima teórica de 80% e, combinada com o filtro de partículas, pode reduzir significativamente a carga de microrganismos no ambiente. Constatou-se também diminuição significativa (> 99%) de bactérias e fungos utilizados no estudo, após passagem do ar pelo equipamento por 11 minutos, o que sugere que o equipamento possui potencial para eliminar o Sars-CoV-2, vírus causador da COVID-19, em ambientes fechados.

Ressalta-se que não foi possível realizar testes diretamente com partículas virais de Sars-CoV-2 por causa da limitação metodológica de gerar aerodispersóides em ambientes fechados, porém fez-se uma ampla busca na literatura para determinar a dose necessária à descontaminação e o tempo mínimo para a inativação do vírus. Como perspectiva de pesquisa futura, o equipamento poderá ser testado em ambientes com presença de humanos, por meio de ensaio clínico controlado.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a Duane Fernandes, Fábio Videira e Pedro Sylvestre toda a ajuda no início da jornada. Ao pesquisador Bruno Ramos, do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP), as medições e os testes sobre UVC. À professora Maria de Fátima Andrade, que disponibilizou seu laboratório no Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG-USP). À professora Ana Márcia, que

elucidou os cuidados necessários em relação à luz UVC. Ao professor Artur Vilas Boas, toda a orientação na disciplina Empreendedorismo e Inovação em Saúde. Ao projetista Alex Gonçalves, que ajudou na construção do primeiro protótipo. A Matheus Pessoa, do Projeto Burn, que auxiliou na correção do manual e colaboração na pesquisa sobre a luz UVC. À equipe da Conforlab, composta de Piter Fanti, Renan Tavella, Robson Petroni e Stephanie Diniz, a excelência na execução dos testes físico-químicos e microbiológicos do projeto. À FabLab Livre SP, por ter disponibilizado o espaço e as ferramentas para a construção do equipamento.

CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES

Zhang, J.: Conceituação, Curadoria de dados, Obtenção de financiamento, Investigação, Metodologia, Administração de projeto, Escrita - primeira redação, Escrita — Revisão e Edição. Andrade, A.: Conceituação, Curadoria de Dados, Investigação, Metodologia, Escrita — Primeira Redação. Machado, F.: Conceituação, Curadoria de Dados, Investigação, Metodologia, Software, Escrita — Primeira Redação. Ghilardi, L.: Curadoria de Dados, Metodologia, Investigação, Escrita — Primeira Redação. Almeida, B.: Curadoria de Dados, Metodologia, Investigação, Escrita — Primeira Redação. Falararo, B.: Conceituação, Curadoria de Dados, Metodologia, Investigação, Escrita — Primeira Redação. Machado, G.: Conceituação, Software. Emydgio, A.: Curadoria de Dados, Análise Formal, Metodologia, Escrita — Revisão e Edição. Pereira, G.: Curadoria de Dados, Análise Formal, Metodologia, Supervisão, Escrita — Primeira Redação, Escrita — Revisão e Edição. Magalhães, D.: Análise Formal, Supervisão, Escrita — Revisão e Edição. Forner-Cordero, A.: Análise Formal, Supervisão, Escrita — Revisão e Edição. Vasconcellos, P.: Análise Formal, Supervisão, Escrita — Revisão e Edição.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA DE PROTEÇÃO AMBIENTAL DOS ESTADOS UNIDOS (EPA). Air cleaners, HVAC filters, and coronavirus (COVID-19). EPA, 2021. Disponível em: <https://www.epa.gov/coronavirus/air-cleaners-hvac-filters-and-coronavirus-covid-19>. Acesso em: 1º out. 2021.

ANDRADE, M.F.; FORNARO, A.; FREITAS, E.D.; MAZZOLI, C.R.; MARTINS, L.D.M.; BOIAN, C.; OLIVEIRA, M.G.L.; PERES, J.; CARBONE, S.; ALVALÁ, P.; LEME, N.P. Ozone sounding in the Metropolitan Area of São Paulo, Brazil: wet and dry season campaigns of 2006. *Atmospheric Environment*, v. 61, p. 627-640, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.07.083>

ATKINSON, J.; CHARTIER, Y.; PESSOA-SILVA, C.L.; JENSEN, P.; LI, Y.; SETO, W.-H.; (org.). *natural ventilation for infection control in health-care settings*. Genebra: World Health Organization, 2009.

BAINY, B.K.; PASCHOAL, I.A.; AVILA, A.M.H.; SANTOS, H.O.D. Air quality assessment in Southeast Brazil during COVID-19 pandemic and lockdown: report of increased air pollution. *Cadernos de Saúde Pública*, v. 37, n. 9, p. e00242320, 2021. <https://doi.org/10.1590/0102-311X00242320>

BAR-ON, Y.M.; FLAMHOLZ, A.; PHILLIPS, R.; MILO, R. SARS-CoV-2 (COVID-19) by the numbers. *eLife*, v. 9, e57309, 2020. <https://doi.org/10.7554/eLife.57309>

BEGGS, C.B.; AVITAL, E.J. Upper-room ultraviolet air disinfection might help to reduce COVID-19 transmission in buildings: a feasibility study. *PeerJ*, v. 8, e10196, 2020. <https://doi.org/10.7717/peerj.10196>

BIASIN, M.; BIANCO, A.; PARESCHI, G.; CAVALLERI, A.; CAVATORTA, C.; FENIZIA, C.; GALLI, P.; LESSIO, L.; LUALDI, M.; TOMBETTI, E.; AMBROSI, A.; REDAELLI, E.M.A.; SAULLE, I.; TRABATTONI, D.; ZANUTTA, A.; CLERICI, M. UV-C irradiation is highly effective in inactivating SARS-CoV-2 replication. *Scientific Reports*, v. 11, n. 1, 6260, 2021. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-85425-w>

BOSWELL, T.C.; FOX, P.C. Reduction in MRSA environmental contamination with a portable HEPA-filtration unit. *Journal of Hospital Infection*, v. 63, n. 1, p. 47-54, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.jhin.2005.11.011>

BRASIL. Ministério da Saúde. *Resposta nacional e internacional de enfrentamento ao novo coronavírus*. Brasil: Ministério da Saúde, 2021. Disponível em: <https://coronavirus.saude.gov.br/index.php/linha-do-tempo>. Acesso em: 30 set. 2021.

BUONANNO, M.; WELCH, D.; SHURYAK, I.; BRENNER, D.J. Far-UVC light (222 nm) efficiently and safely inactivates airborne human coronaviruses. *Scientific Reports*, v. 10, n. 1, 10285, 2020. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-67211-2>

- CADNUM, J.L.; LI, D.F.; JONES, L.D.; REDMOND, S.N.; PEARLMUTTER, B.; WILSON, B.M.; DONSKY, C.J. Evaluation of ultraviolet-C light for rapid decontamination of airport security bins in the era of SARS-CoV-2. *Pathogens and Immunity*, v. 5, n. 1, p. 133-142, 2020. <https://doi.org/10.20411/pai.v5i1.373>
- CENTERS FOR DISEASE CONTROL AND PREVENTION (CDC). *Ventilation in Buildings*. CDC, 2021. Disponível em: <https://www.cdc.gov/coronavirus/2019-nCoV/community/ventilation.html>. Acesso em: 1º out. 2021.
- COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). *Dados horários*. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, 2021. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/ar/dados-horarios/>. Acesso em: 15 dez. 2021.
- CHOI, H.; CHATTERJEE, P.; LICHTFOUSE, E.; MARTEL, J.A.; HWANG, M.; JINADATHA, C.; SHARMA, V.K. Classical and alternative disinfection strategies to control the COVID-19 virus in healthcare facilities: a review. *Environmental Chemistry Letters*, p. 1945-1951, 2021. <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01180-4>
- CHRISTOPHERSON, D.A.; YAO, W.C.; LU, M.; VIJAYAKUMAR, R.; SEDAGHAT, A.R. High-efficiency particulate air filters in the era of COVID-19: function and efficacy. *Otolaryngology - Head and Neck Surgery*, v. 163, n. 6, p. 1153-1155, 2020. <https://doi.org/10.1177/0194599820941838>
- COMMITTEE ON THE MEDICAL EFFECTS OF AIR POLLUTANTS (COMEAP). *The mortality effects of long-term exposure to particulate air pollution in the United Kingdom*. COMEAP, 2010.
- CORREIA, G.; RODRIGUES, L.; GAMEIRO DA SILVA, M.; GONÇALVES, T. Airborne route and bad use of ventilation systems as non-negligible factors in SARS-CoV-2 transmission. *Medical Hypotheses*, v. 141, 109781, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.mehy.2020.109781>
- DARNELL, M.E.R.; SUBBARAO, K.; FEINSTONE, S.M.; TAYLOR, D.R. Inactivation of the coronavirus that induces severe acute respiratory syndrome, SARS-CoV. *Journal of Virological Methods*, v. 121, n. 1, p. 85-91, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.jviromet.2004.06.006>
- DEE, S.A.; BATISTA, L.; DEEN, J.; PIJOAN, C. Evaluation of systems for reducing the transmission of porcine reproductive and respiratory syndrome virus by aerosol. *Revue Canadienne de Recherche Vétérinaire*, v. 70, n. 1, p. 28-33, 2006.
- EISENLÖFFEL, L.; REUTTER, T.; HORN, M.; SCHLEGEL, S.; TRUYEN, U.; SPECK, S. Impact of UVC-sustained recirculating air filtration on airborne bacteria and dust in a pig facility. *Plos One*, v. 14, n. 11, e0225047, 2019. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0225047>
- GRIMES, D.R.; ROBBINS, C.; O'HARE, N.J. Dose modeling in ultraviolet phototherapy. *Medical Physics*, v. 37, n. 10, p. 5251-5257, 2010. <https://doi.org/10.1118/1.3484093>
- HADI, J.; DUNOWSKA, M.; WU, S.; BRIGHTWELL, G. Control measures for SARS-CoV-2: a review on light-based inactivation of single-stranded RNA viruses. *Pathogens*, v. 9, n. 9, 737, 2020. <https://doi.org/10.3390/pathogens9090737>
- HEILINGLOH, C.S.; AUFDERHORST, U.W.; SCHIPPER, L.; DITTMER, U.; WITZKE, O.; YANG, D.; ZHENG, X.; SUTTER, K.; TRILLING, M.; ALT, M.; STEINMANN, E.; KRAWCZYK, A. Susceptibility of SARS-CoV-2 to UV irradiation. *American Journal of Infection Control*, v. 48, n. 10, p. 1273-1275, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ajic.2020.07.031>
- IES. *IES Committee Report: germicidal ultraviolet (GUV) - frequently asked questions*. Illuminating Engineering Society, 2020.
- INSTITUTO DE ENERGIA E MEIO AMBIENTE. *Padrões de qualidade do ar: experiência comparada Brasil, EUA e União Europeia*. Instituto de Energia e Meio Ambiente, 2012.
- KOWALSKI, W.J. *Ultraviolet germicidal irradiation handbook: UVGI for air and surface disinfection*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2009. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-01999-9>
- KOWALSKI, W.J.; BAHNFLETH, W. *Airborne respiratory diseases and mechanical systems for control of microbes*. HPAC Heating/Piping/Air Conditioning, 1998.
- KUMAR, P.; HAMA, S.; NOGUEIRA, T.; ABBASS, R.A.; BRAND, V.S.; ANDRADE, M.F.; ASFAW, A.; AZIZ, K.H.; CAO, S.-J.; EL-GENDY, A.; ISLAM, S.; JEBBA, F.; KHARE, M.; MAMUYA, S.H.; MARTINEZ, J.; MENG, M.-R.; MORAWSKA, L.; MUJALA, A.S.; SHIVA NAGENDRA, S.M.; NGOWI, A.V.; OMER, K.; OLAYA, Y.; OSANO, P.; SALAM, A. In-car particulate matter exposure across ten global cities. *Science of the Total Environment*, v. 750, 141395, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141395>
- LINDBLAD, M.; TANO, E.; LINDAHL, C.; HUSS, F. Ultraviolet-C decontamination of a hospital room: Amount of UV light needed. *Burns*, v. 46, n. 4, p. 842-849, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.burns.2019.10.004>
- LIU, D.T.; PHILLIPS, K.M.; SPETH, M.M.; BESSER, G.; MUELLER, C.A.; SEDAGHAT, A.R. Portable HEPA purifiers to eliminate airborne SARS-CoV-2: a systematic review. *Otolaryngology - Head and Neck Surgery*, v. 166, n. 4, p. 615-622, 2021. <https://doi.org/10.1177/01945998211022636>
- LOWTHER, S.D.; DENG, W.; FANG, Z.; BOOKER, D.; WHYATT, D.J.; WILD, O.; WANG, X.; JONES, K.C. How efficiently can HEPA purifiers remove priority fine and ultrafine particles from indoor air? *Environment International*, v. 144, 106001, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106001>
- LUNA, V.A.; CANNONS, A.C.; AMUSO, P.T.; CATTANI, J. The inactivation and removal of airborne Bacillus atrophaeus endospores from air circulation systems using UVC and HEPA filters. *Journal of Applied Microbiology*, v. 104, n. 2, p. 489-498, 2008. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2007.03569.x>
- MORAWSKA, L.; MILTON, D.K. It is time to address airborne transmission of coronavirus disease 2019 (COVID-19). *Clinical Infectious Diseases*, v. 71, n. 9, p. 2311-2313, 2020. <https://doi.org/10.1093/cid/cia939>
- MORRIS, G.; KOKKI, M.H.; ANDERSON, K.; RICHARDSON, M.D. Sampling of Aspergillus spores in air. *Journal of Hospital Infection*, v. 44, n. 2, p. 81-92, 2000. <https://doi.org/10.1053/jhin.1999.0688>
- ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE (OMS). *WHO Novel Coronavirus: China*. OMS, 2021. Disponível em: <https://www.who.int/csr/don/12-january-2020-novel-coronavirus-china/en/>. Acesso em: 1º out. 2021.
- ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE (OMS). *World Health Organization (WHO) global air quality guidelines*. Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. Geneva: World Health Organization, 2021b.
- PERRY, J.L.; AGUI, J.H.; VIJAYAKUMAR, R. *Submicron and nanoparticulate matter removal by HEPA-rated media filters and packed beds of granular materials*. NASA, 2016.

REED, N.G. The history of ultraviolet germicidal irradiation for air disinfection. *Public Health Reports*, v. 125, n. 1, p. 15-27, 2010. <https://doi.org/10.1177/003335491012500105>

SHAUGHNESSY, R.J.; SEXTRO, R.G. What is an effective portable air cleaning device? A review. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, v. 3, n. 4, p. 169-181, 2006. <https://doi.org/10.1080/15459620600580129>

STRAKHOVSKAYA, M.G.; MEEROVICH, G.A.; KUSKOV, A.N.; GONCHUKOV, S.A.; LOSCHENOV, V.B. Photoinactivation of coronaviruses: going along the optical spectrum. *Laser Physics Letters*, v. 17, n. 9, 093001, 2020. <https://doi.org/10.1088/1612-202X/abab14>

TELLIER, R.; LI, Y.; COWLING, B.J.; TANG, J.W. Recognition of aerosol transmission of infectious agents: a commentary. *BMC Infectious Diseases*, v. 19, n. 1, p. 101, 2019. <https://doi.org/10.1186/s12879-019-3707-y>

TSENG, C.-C.; LI, C.-S. Inactivation of virus-containing aerosols by ultraviolet germicidal irradiation. *Aerosol Science and Technology*, v. 39, n. 12, p. 1136-1142, 2005. <https://doi.org/10.1080/02786820500428575>

VAN DOREMALEN, N.; BUSHMAKER, T.; MORRIS, D.H.; HOLBROOK, M.G.; GAMBLE, A.; WILLIAMSON, B.N.; TAMIN, A.; HARCOURT, J.L.; THORNBURG, N.J.; GERBER, S.I.; LLOYD-SMITH, J.O.; WIT, E.; MUNSTER, V.J. Aerosol and surface stability of SARS-CoV-2 as compared with SARS-CoV-1. *New England Journal of Medicine*, v. 382, n. 16, p. 1564-1567, 2020. <https://doi.org/10.1056/NEJMc2004973>

