OPEN JOURNAL SYSTEMS
ISSN: 2595-4431

Revista **B**rasileira de **M**eio **A**mbiente, v.12, n.1. 061-074 (2024)

Revista Brasileira de Meio Ambiente

Fialho da Silva et al

Reutilização sustentável de ampolas de mercúrio provenientes de lâmpadas de iluminação pública descartadas para esterilização UV

Wenderson Rodrigues Fialho da Silva[1]*, Giarlã Cunha da Silva[2], Matheus Machado Guidini[3], Patricia Pereira Fontes[4], Karoline Geralda Mendes[5]

[1]*Mestrando em Física, Departamento de Física, Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, Brasil, (*Autor correspondente: wenderson.f@ufv.br).*
[2]*Doutor em Microbiologia Agrícola, Departamento de Microbiologia, Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, Brasil.*
[3]*Licenciado em Biologia, Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, Brasil.*
[4]*Doutora em Bioquímica Aplicada, Departamento de Bioquímica, Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, Brasil.*
[5]*Mestranda em Ciência Florestal, Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Minas Geais, Brasil.*

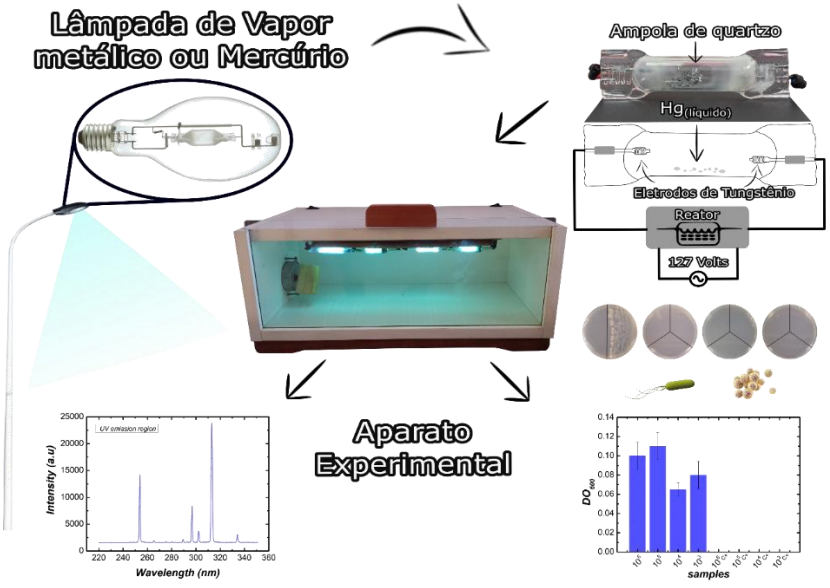
Histórico do Artigo: Submetido em: 12/09/2023 – Revisado em: 21/11/2023 – Aceito em: 31/01/2024

R E S U M O

A substituição de lâmpadas de alto consumo em via pública por lâmpadas LED fez com que um grande número de lâmpadas de vapor de mercúrio fosse descartadas. Tais lâmpadas, quando descartadas incorretamente, causam alto impacto ao meio ambiente, devido à presença de mercúrio em seu interior. Neste trabalho, desenvolvemos uma câmara de esterilização por luz ultravioleta a partir do reaproveitamento de lâmpadas de iluminação pública queimadas e descartadas. O equipamento, confeccionado com materiais de baixo custo, é composto por compartimento de MDF, quatro ampolas de quartzo contendo mercúrio, circuito de acionamento e um visor de vidro para monitoramento do processo de esterilização. Foi caracterizada a radiação emitida por meio de medidas espectrofotométricas, verificando o pico de emissão UV-C com caráter germicida em 254 nm. Seguido de avaliação da eficácia na esterilização de materiais contaminados com *Pseudomonas aeruginosa* e *Staphylococcus aureus*, como placas de Petri, placa de 96 poços e alças. O equipamento apresentou resultados satisfatórios após curtos períodos de exposição no aparelho. Os resultados obtidos neste estudo indicam que o equipamento pode ser utilizado na esterilização de superfícies e em outras aplicações. Além disso, o equipamento tem a vantagem de ser composto por uma fonte de radiação reaproveitada, que certamente iria para o lixo e teria alto potencial de poluir o meio ambiente.

Palavras-Chaves: Sustentabilidade, Reuso, Radiação UVC, Baixo custo, Esterilização.

RESUMO GRÁFICO // GRAPHICAL ABSCTRACT



Fialho da Silva, W.R. et al. (2024). Análise da variação temporal e sazonal do estado trófico do Ribeirão das Rosas, Juiz de Fora – MG. **Revista Brasileira de Meio Ambiente**, v.12, n.1, p.61-74.

Direitos do Autor. A Revista Brasileira de Meio Ambiente utiliza a licença *Creative Commons* - CC BY 4.0.

Sustainable reuse of mercury ampoules from discarded street lamps for UV sterilization

A B S T R A C T

The replacement of high-consumption lamps in public areas with LED lamps has led to a large number of mercury vapor lamps being discarded. Such lamps, when improperly disposed of, have a significant environmental impact due to the presence of mercury inside them. In this study, we have developed a UV sterilization chamber using reclaimed burnt-out and discarded public lighting lamps. The equipment, made from low-cost materials, consists of an MDF compartment, four quartz bulbs containing mercury, a control circuit, and a glass display for monitoring the sterilization process. The emitted radiation was characterized through spectrophotometric measurements, confirming the germicidal UV-C emission peak at 254 nm. This was followed by an assessment of the effectiveness in sterilizing materials contaminated with Pseudomonas aeruginosa and Staphylococcus aureus, such as Petri dishes, 96-well plates, and loops. The equipment demonstrated satisfactory results after short exposure periods in the device. The results obtained in this study suggest that the equipment can be used for sterilizing surfaces and in various other applications. Furthermore, the equipment has the advantage of being composed of a reclaimed radiation source that would otherwise have been discarded, potentially causing significant environmental pollution.

Keywords: Sustainability, Reuse, UVC radiation, Low cost, Sterilization.

Reutilización sostenible de ampollas de mercurio de lámparas alumbrado publico para esterilización UV

R E S U M E N

La sustitución de lámparas de alto consumo en áreas públicas por lámparas LED ha resultado en la eliminación de un gran número de lámparas de vapor de mercurio. Estas lámparas, cuando se desechan de manera incorrecta, tienen un alto impacto ambiental debido a la presencia de mercurio en su interior. En este estudio, hemos desarrollado una cámara de esterilización por luz ultravioleta utilizando lámparas de iluminación pública quemadas y desechadas. El equipo, fabricado con materiales de bajo costo, consta de un compartimento de MDF, cuatro bombillas de cuarzo que contienen mercurio, un circuito de control y una pantalla de vidrio para monitorear el proceso de esterilización. La radiación emitida se caracterizó a través de medidas espectrofotométricas, confirmando el pico de emisión UV-C con propiedades germicidas a 254 nm. A continuación, se evaluó la efectividad en la esterilización de materiales contaminados con Pseudomonas aeruginosa y Staphylococcus aureus, como placas de Petri, placas de 96 pocillos y asas. El equipo demostró resultados satisfactorios después de breves períodos de exposición en el dispositivo. Los resultados obtenidos en este estudio sugieren que el equipo se puede utilizar para esterilizar superficies y en diversas aplicaciones. Además, el equipo tiene la ventaja de estar compuesto por una fuente de radiación reutilizada que, de lo contrario, habría sido desechada y que podría causar una contaminación ambiental significativa.

Palabras clave: Sostenibilidad, Reutilizar, Radiación UVC, Bajo costo, Esterilización.

1. Introdução

Considerando as necessidades urgentes do mundo atual de consumir menos, otimizar custos e reciclar, a utilização de materiais descartados tem sido destacada como alternativa. A substituição de lâmpadas de alto consumo em diversos espaços públicos por lâmpadas LED fez com que grandes quantidades de lâmpadas de vapor de mercúrio fossem descartadas. O desenvolvimento de uma câmara de esterilização utilizando fonte de radiação ultravioleta é uma alternativa viável ao reaproveitamento das ampolas contendo mercúrio (Hg) proveniente dessas lâmpadas, cuja quantidade de Hg pode variar de 30 a 1000mg por ampola, dependendo da potência e modelo da lampada (Philips, 2011; Unicamp, 2008; Philips, 2022). A utilização dessas ampolas como fonte de radiação ultravioleta, além de vir como uma aplicação para esterilização de objetos, tem também a vantagem relacionada ao reaproveitamento desses materiais descartados, dando uma nova função a componentes que certamente iriam para o lixo e teriam um alto potencial de poluir o meio ambiente (Lima et al., 2000; McLagan et al., 2016; Shetaya et al., 2017; Hall et al., 2020).

A radiação ultravioleta (UV) abrange uma região do espectro eletromagnético capaz de interagir fotoquímicamente com ligações de dupla hélice do DNA. Em comprimentos de onda específicos, como 254

nm, a radiação UV-C é capaz de quebrar ligações moleculares e interromper o DNA ou RNA através da dimerização da pirimidina, causando a morte de microrganismos (Young et al., 1993; Cutler et al., 2011). Os sistemas de esterilização UV são utilizados em laboratórios de pesquisa, clínicas e hospitais para desinfecção de materiais, na indústria alimentícia para esterilização de embalagens, na purificação de água e para esterilização de ar. Em laboratórios de pesquisa, materiais plásticos são comumente usados. Esses materiais, porém, muitas vezes são de uso único, dada a dificuldade de esterilização, pois não podem ser autoclavados. Novas alternativas para limpeza e esterilização de placas, cabos, etc., foram propostas por Lui (2014), sendo a radiação ultravioleta uma possibilidade de utilização para esterilização de tais objetos.

Estudos anteriores relataram os mais variados projetos e aplicações de equipamentos para esterilização à base de luz UV, como dispositivos purificadores de água (Oliveira, 2002; Marchi, 2013; Marchi, 2015), sistemas de desinfecção de embalagens (Casini et al., 2019), para uso em ambientes de saúde (HE, 2020) e dispositivos de esterilização baseados em LED (Alvarenga et al., 2005; Gouvêa et al., 2014; Li et al., 2015; Zhang et al., 2015; Bagnato et al., 2016; Hull et al., 2017; Won et al., 2018; He, 2020; Wang, 2020; Zhao et al., 2020; Sella, 2020; Ma et al., 2021). Porém, nos referidos projetos, empregou-se lâmpadas industrializadas como fonte UV, projetadas especificamente para esterilização à base de radiação ultravioleta, ou seja, com finalidade germicida.

Assim, neste estudo, desenvolveu-se uma câmara de esterilização germicida de baixo custo, segura e eficiente, com emissão germicida na região UV-C, cuja fonte de radiação é uma ampola de quartzo contendo mercúrio, proveniente de lâmpadas queimadas de iluminação pública. Avaliamos a radiação emitida pelo dispositivo e sua aplicação no processo de esterilização de objetos de uso geral em laboratórios de pesquisa.

2. Material e Métodos

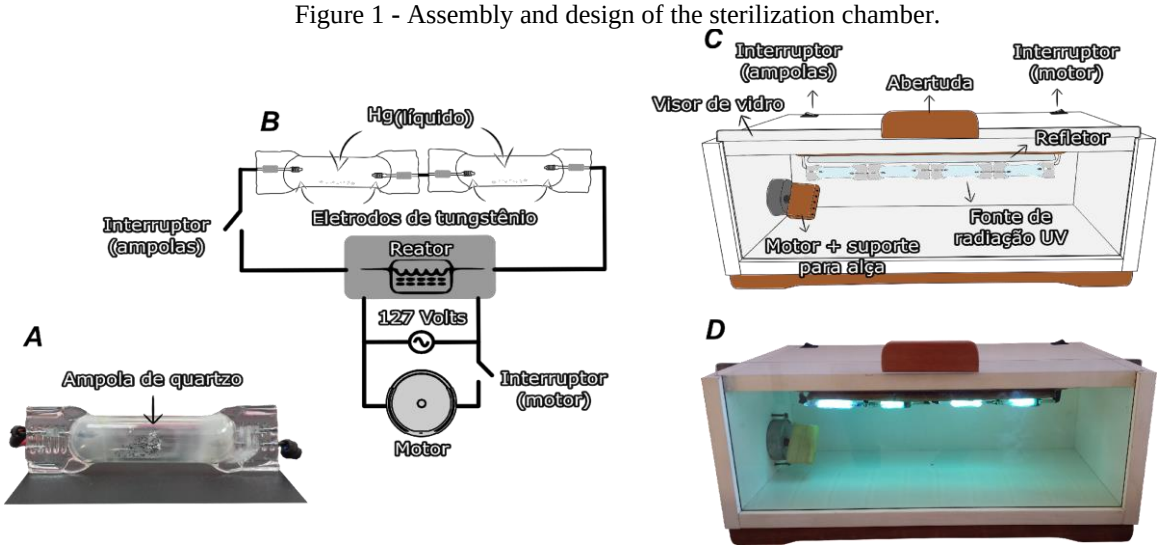
2.1 Construção da câmara de esterilização

Para a construção da câmara de esterilização foram utilizadas quatro ampolas de vapor de mercúrio queimadas (Figura 1A), descartadas de lâmpadas de vapor de mercúrio utilizadas em iluminação pública. As ampolas se localizam na parte interna das lâmpadas de vapor de mercúrio. Quando queimadas, podem ser removidas e reutilizadas. Elas são feitas de quartzo, transparente à radiação ultravioleta. O mercúrio presente em seu interior é responsável pela emissão da radiação ultravioleta em 254 nm. Dois reatores para lâmpadas fluorescentes, com 32 watts de potência (1 lâmpada/32W) foram utilizados para acionar a ampola de quartzo. As conexões foram divididas em dois circuitos isolados (Figura 1B), cada um contendo duas ampolas ligadas em série ligadas a um reator eletrônico.

Adicionou-se um motor para auxiliar na esterilização das alças, possibilitando a rotação das alças e, com isso, maior exposição à radiação. O motor utilizado foi reaproveitado de um forno de micro-ondas, onde é utilizado para girar a placa do forno. Em seu eixo foi fixado um suporte de madeira para fixação das alças. Todo o sistema é alimentado por uma tensão elétrica de 127 volts. Um diagrama elétrico mostrando como foram feitas as conexões elétricas é apresentado na Figura Suplementar S1.

As quatro ampolas de radiação fixaram-se em um suporte de madeira, que também foi fixado na parte superior de uma caixa de MDF (Medium Density Fiberboard), medindo 41 x 25 x 15 cm (Figura 1C e 1D). Foi utilizada uma placa de vidro temperado com 3 mm de espessura para fechar a câmara e facilitar o monitoramento seguro do processo de esterilização. Para aumentar a quantidade de luz focada na amostra, um refletor cilíndrico feito de lata de aço foi colocado entre o suporte de madeira e as lâmpadas. Ao motor foi acoplado um suporte de madeira (5 x 4 cm) para adaptação das alças, que gira a 3 rotações por minuto (RPM). O motor foi então fixado no lado esquerdo da câmara. Uma lista de materiais utilizados para construção da câmara é fornecida na Tabela Suplementar I.

Figura 1 - Montagem e esquema da câmara de esterilização.
Figure 1 - Assembly and design of the sterilization chamber.



(A) Detalhe da ampola de vapor de mercúrio, cujo material (quartzo) é transparente à radiação ultravioleta. (B) Representação das ligações elétricas de um circuito contendo duas lâmpadas e um motor. As ligações elétricas utilizadas neste projeto foram divididas em dois circuitos isolados, cada um contendo duas lâmpadas ligadas em série ligadas a um reator eletrônico de lâmpadas fluorescentes. Um diagrama elétrico mostrando como fazer as ligações elétricas é apresentado no material suplementar (Figura S1). (C) Diagrama representativo dos componentes da câmara de esterilização. (D) Dispositivo concluído em operação.

(A) Detail of the mercury vapor bulb, whose material (quartz) is transparent to ultraviolet radiation. (B) Representation of the electrical connections of a circuit containing two lamps and a motor. The electrical connections used in this project were divided into two isolated circuits, each containing two lamps connected in series to an electronic ballast for fluorescent lamps. An electrical diagram showing how to make the connections is provided in the supplementary material (Figure S1). (C) Representative diagram of the components of the sterilization chamber. (D) Completed device in operation.

2.2 Caracterização da radiação emitida

Um estudo das propriedades de emissão da fonte de luz proposta (ampola) foi realizado utilizando um espectrômetro (USB4000 - Ocean Optics). A luz emitida foi captada através de uma fibra óptica de quartzo, sendo possível obter o espectro de emissão das ampolas na região UV-Visível. A intensidade da radiação emitida pelas ampolas na região ultravioleta (240-370 nm) em função da distância (do sensor às ampolas) também foi avaliada utilizando um sensor de radiação ultravioleta baseado em um fotodiodo modelo GUVA-S12SD (GUVA 2011). O consumo de energia elétrica foi determinado utilizando multímetro convencional para o equipamento em pleno funcionamento, a fim de obter o consumo em kWh (quilowatt-hora).

2.3 Validação do equipamento

2.3.1 Cepas, manutenção e condições de cultivo

Para validar o funcionamento do aparelho, foram desenvolvidos testes utilizando a bactéria Gram-negativa *Pseudomonas aeruginosa* ATCC27853 e a bactéria Gram-positiva *Staphylococcus aureus*

ATCC6538. Para todos os experimentos, as bactérias foram cultivadas em ágar nutriente por 18 horas a 37°C ou caldo nutriente a 37°C, 180 rpm até DO_{600nm} de 0,5.

2.3.2 Teste de esterilização de alças

Após cultivo de *P. aeruginosa* e *S. aureus* em caldo nutriente até uma DO_{600nm} de 0,5 em 10 mL, a suspensão foi transferida para um tubo Falcon. Para avaliar a eficiência do aparelho na esterilização de alças, séries de 3 alças foram contaminadas com a suspensão bacteriana por 1 minuto para cada espécie. Em seguida, as alças foram colocadas em temperatura ambiente para secagem ao ar. Cada série de três alças foi fixada ao aparelho e exposta nos tempos de 1, 2, 3, 4 e 5 minutos à luz UV. As alças expostas à suspensão bacteriana e não expostas à luz UV foram utilizadas como controle negativo e as alças não contaminadas com suspensão bacteriana foram utilizadas como controles positivos.

Em seguida, as alças foram passadas em placas contendo ágar nutriente e também em tubos com caldo nutriente. Placas e tubos foram incubados a 37°C por 18 horas na ausência de luz. Para validar o resultado em caldo nutriente, uma alíquota de 5 µl de cada tubo foi transferida para uma placa contendo ágar nutriente, que foi novamente incubada por mais 18 horas. 1,2 ml de resazurina a 0,01% foram adicionados aos tubos, os quais foram incubados à temperatura ambiente na ausência de luz durante 2 horas.

2.3.3 Esterilização de placas de 96 poços

Para avaliar a eficiência do aparelho na esterilização de placas de 96 poços, o experimento foi conduzido conforme Sharma (2012) com pequenas modificações. Após as suspensões bacterianas atingirem uma DO_{600nm} de 0,5 em 10 mL, foram feitas diluições e alíquotas de 100 µL foram adicionadas aos poços da placa para obter populações de 10^6, 10^5, 10^4 e 10^2 células nos poços, de acordo com a Figura Suplementar S2. Poços contendo apenas caldo nutriente foram utilizados como controle positivo (sem contaminação bacteriana). As placas foram incubadas durante 30 minutos à temperatura ambiente. Em seguida, o conteúdo dos poços foi removido por pipetagem, os poços foram lavados com água estéril também por pipetagem e as placas foram secas à temperatura ambiente.

As placas foram então expostas durante 10 minutos à luz UV. Alguns poços foram cobertos para evitar exposição à luz UV (controle negativo). Em seguida, foram adicionados 250 µl de caldo nutriente a cada poço e a placa foi incubada a 37°C por 18 horas na ausência de luz. Para avaliar os resultados, o conteúdo de cada poço foi inoculado em uma placa contendo ágar nutriente, que foi incubada a 37°C por 18 horas. Além disso, a absorbância da cultura em placa de 96 poços foi determinada utilizando OD_{600nm}. 25 µL de resazurina 0,01% foram adicionados aos poços para avaliar a presença de células viáveis, as placas foram incubadas por duas horas em temperatura ambiente.

2.3.4 Esterilização de placas de Petri descartáveis

Para os experimentos com placas de Petri descartáveis, os testes foram realizados em duas etapas, conforme descrito a seguir. *P. aeruginosa* e *S. aureus* foram cultivadas até uma DO_{600nm} de 0,5 e 100 µL de inóculos contendo 10^6, 10^4 e 10^2 células foram plaqueadas pelo método Pour plate usando ágar nutriente em placas de Petri descartáveis (60x15mm). As placas foram incubadas a 37°C durante 18 horas. Em seguida, o meio de cultura de todas as placas foi removido e as placas foram lavadas com água para remover os fragmentos restantes do meio de crescimento e deixadas para secar em temperatura ambiente. Em seguida, as placas foram expostas durante 0 a 2 minutos a cada 20 segundos e depois a cada 30 segundos até 5 minutos à luz UV.

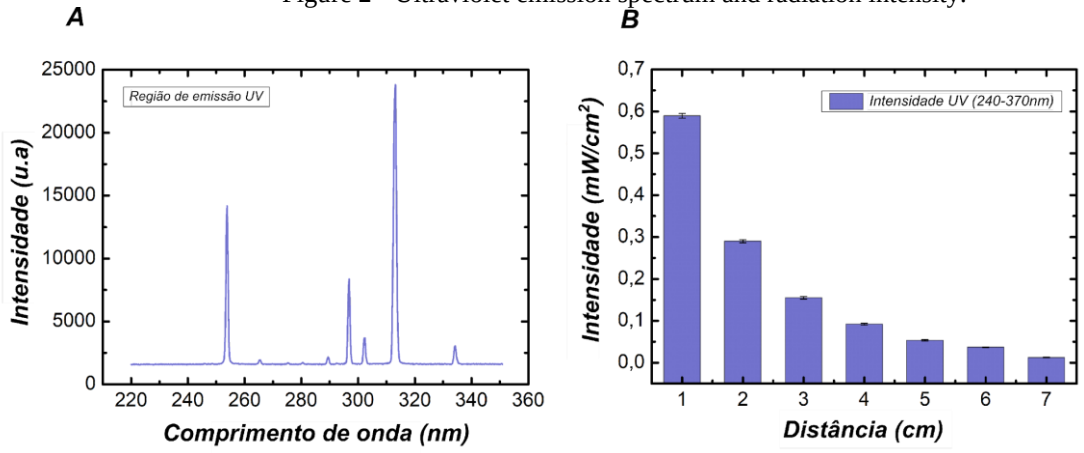
Após a exposição, meio de cultura foi adicionado às placas, que foram incubadas a 37°C por 18 horas para avaliação dos resultados. Placas não contaminadas com bactérias foram utilizadas como positivas e placas contaminadas e não expostas à luz UV foram utilizadas como controles negativos.

3. Resultados e Discussão

3.1 Radiação emitida e consumo de energia do dispositivo

Os espectros de emissão na região UV-C, de interesse na esterilização de materiais de uso laboratorial e atividade microbiana, revelaram o pico de radiação em 253,7 nanômetros (Figura 2A). A intensidade luminosa (mW/cm²) foi identificada na região UV (240-370 nanômetros) em função da distância, em centímetros, da fonte emissora (Figura 2B), cuja potência a 5 cm da fonte foi de 0,1 mW /cm². Fora da câmara, devido à proteção do visor de vidro, a radiação UV medida com o equipamento foi nula. O consumo de energia elétrica para as quatro lâmpadas utilizadas foi de 245 kWh, e para todos os equipamentos em funcionamento (motor + lâmpadas), o consumo foi de 256 kWh.

Figura 2 - Espectro de emissão ultravioleta e intensidade de radiação.
Figure 2 - Ultraviolet emission spectrum and radiation intensity.



(A) Picos de emissão na região UV das ampolas utilizadas no aparelho. A medição foi realizada em um espectrômetro Ocean Optics, modelo USB4000. (B) Intensidades da radiação ultravioleta emitida pela lâmpada na região ultravioleta (240-370nm) em função da distância do sensor à lâmpada, medida pelo sensor baseado em fotodiodo modelo GUVA-S12SD.

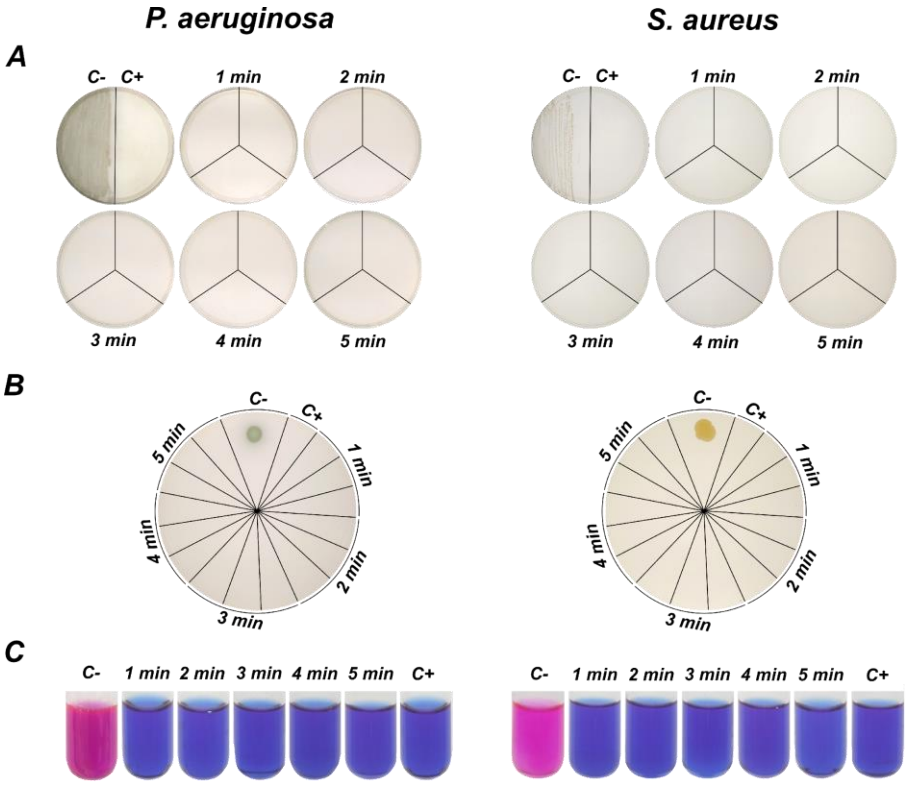
(A) Emission peaks in the UV region of the ampoules used in the apparatus. The measurement was performed on an Ocean Optics spectrometer, model USB4000. (B) Intensities of ultraviolet radiation emitted by the lamp in the ultraviolet region (240-370nm) as a function of the distance from the sensor to the lamp, measured by the sensor based on a photodiode model GUVA-S12SD.

3.2 Validação do equipamento

Após o tempo de incubação, para ambas as espécies de bactérias, observou-se que não houve crescimento nas placas inoculadas com as alças expostas à luz UV. O mesmo resultado é observado para a alça não contaminada (controle positivo). Porém, para a alça contaminada não exposta à luz UV (controle negativo), houve crescimento de bactérias (Figura 3A). Os tubos contendo caldo nutriente não apresentaram turbidez no meio inoculado com as alças expostas à luz UV, como controle positivo.

Os tubos inoculados com alça contaminada que não foi exposta à luz UV (controle negativo) apresentaram turbidez (dados não mostrados). Da mesma forma, apenas o inóculo controle negativo apresentou crescimento para ambas as espécies (Figura 3B). Quando a resazurina foi adicionada aos tubos, não foi observada alteração de cor nos tubos, exceto o controle negativo (Figura 3C). Estes resultados indicaram a eficiência do aparelho na esterilização de alças contaminadas em 1 minuto.

Figura 3 – Eficiência do aparelho na esterilização de alças contaminadas.
Figure 3 – Efficiency of the apparatus in the sterilization of contaminated loops.



(A) Placas inoculadas com alças contaminadas com *P. aeruginosa* e *S. aureus* após exposição à luz UV em 1, 2, 3, 4 e 5 minutos. Durante tempos de 1 a 5 minutos, cada placa foi dividida em 3 partes correspondendo a 3 alças por placa (3 repetições experimentais). (B) Placas inoculadas com microgotas de tubos contendo caldo nutriente contaminado com alças após exposição à luz UV. (C) Tubos contendo caldo nutriente contaminado com alças expostas à luz UV, após adição de resazurina. C- e C+ correspondem aos controles negativo (alça contaminada, mas não exposta à luz UV) e positivo (alça não contaminada) de exposição à luz UV, respectivamente.

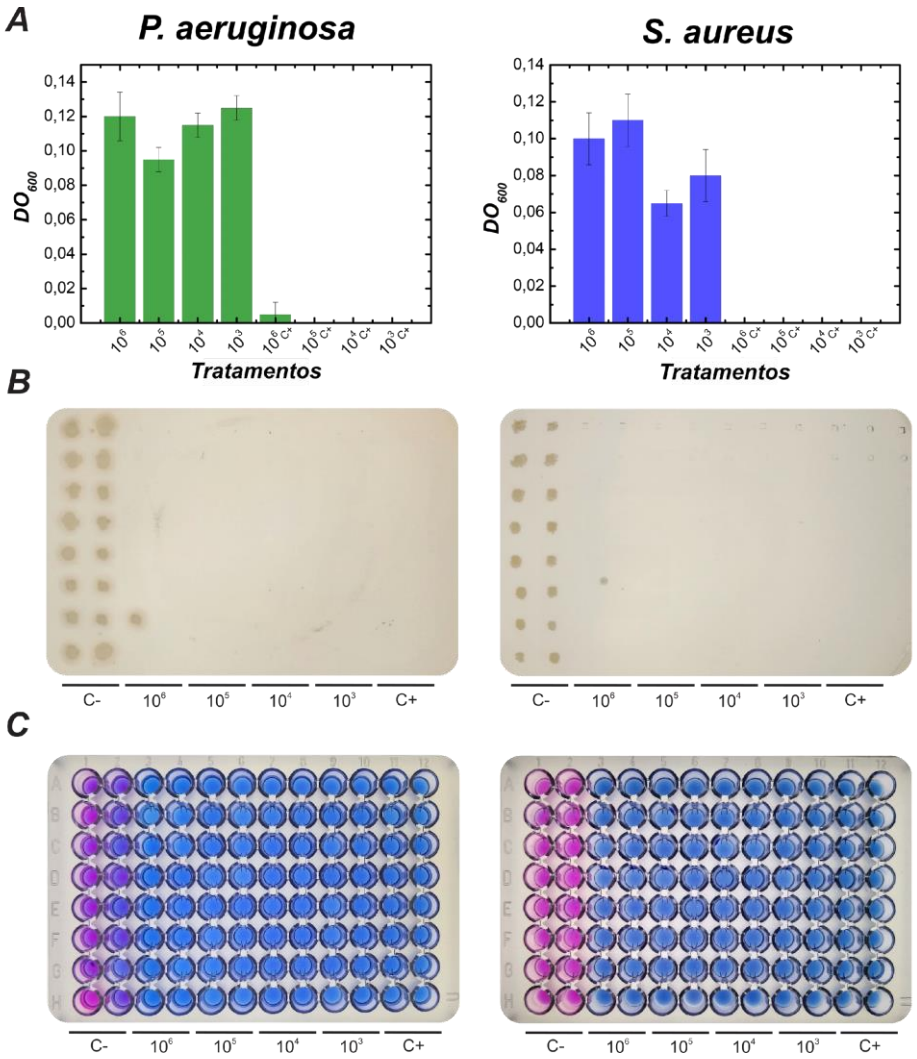
(A) Plates inoculated with loops contaminated with *P. aeruginosa* and *S. aureus* after exposure to UV light at 1, 2, 3, 4 and 5 minutes. For times from 1 to 5 minutes, each plate was divided into 3 parts corresponding to 3 loops per plate (3 experimental replicates). (B) Micro-drop inoculated plates from tubes containing nutrient broth contaminated with loops after exposure to UV light. (C) Tubes containing nutrient broth contaminated with loops exposed to UV light, after addition of resazurin. C- and C+ correspond to the negative (loop contaminated but not exposed to UV light) and positive (loop not contaminated) controls of UV light exposition, respectively.

No ensaio de esterilização em placas de 96 poços, os valores de absorbância OD_{600nm} indicaram crescimento em poços não expostos à luz UV (Figura 4A) para ambas as espécies. A leitura dos poços expostos à luz UV revelou um pequeno crescimento nos poços contaminados com 10^6 células de *P. aeruginosa*, porém

os demais poços não apresentaram crescimento bacteriano (Figura 4A). Não houve diferença nos valores de leitura dos poços contaminados com *S. aureus* em comparação aos poços não contaminados (Figura 4A). O inóculo em ágar nutriente da placa de 96 poços revelou crescimento apenas em um poço contendo 10^6 células para as duas espécies. Os controles positivo e negativo também apresentaram resultados de acordo com a leitura da placa (Figura 4B). Após adição de resazurina foi possível observar alteração de cor apenas nos poços pertencentes ao controle negativo, reforçando também os resultados anteriores (Figura 4C). Esses resultados mostram que, com exceção dos poços contaminados com 10^6 células, o aparelho foi eficiente na esterilização do material no tempo avaliado. Embora o crescimento na placa de ágar nutriente tenha sido observado em apenas um poço com população de 10^6 células, isso não foi observado ao adicionar resazurina, o que representa que o número de células viáveis para esta população tornou-se muito baixo após exposição à luz UV.

A combinação de uma etapa de lavagem das placas para a retirada inicial das células dos poços, juntamente com uma exposição mais prolongada à luz UV, pode ser capaz de aumentar a eficiência do equipamento na esterilização desse tipo de material.

Figura 4 – Eficiência do aparelho na esterilização de placas de 96 poços.
Figure 4 – Efficiency of the apparatus in sterilizing 96-well plates.

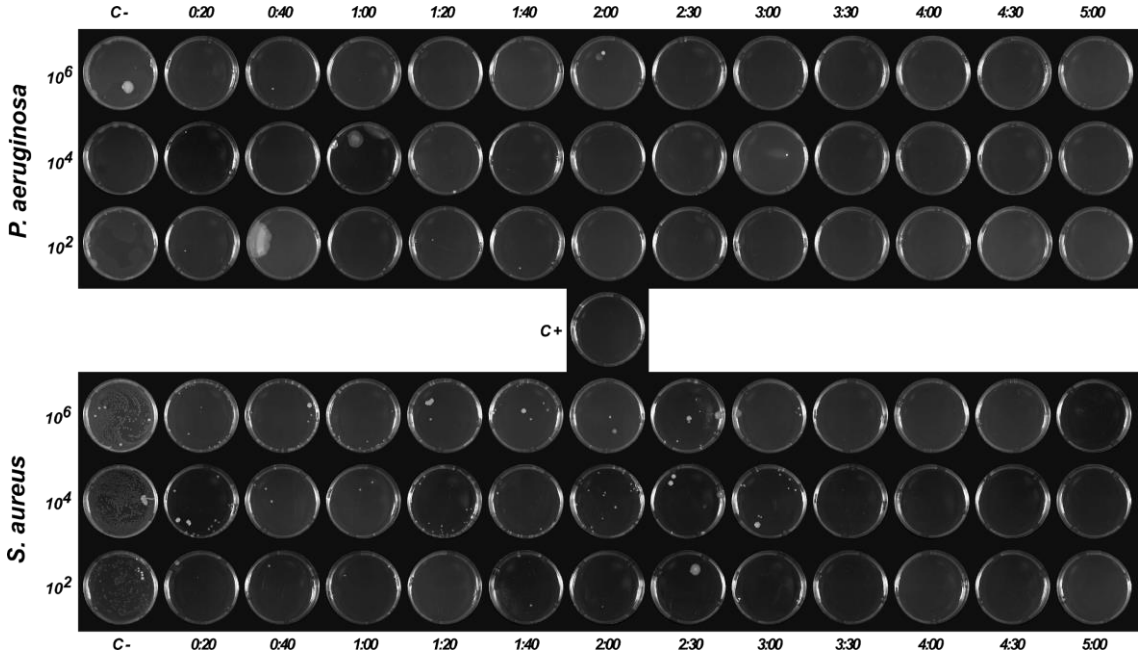


(A) Gráfico de barras com valores de leitura de DO_{600nm} da placa de 96 poços adicionada de caldo após exposição à luz UV durante 10 minutos. Os gráficos mostram os valores das leituras dos poços com caldo após contaminação com diferentes populações de *P. aeruginosa* (esquerda) e *S. aureus* (direita) expostas ou não à luz UV. (B) Placa contendo ágar nutriente inoculado com amostras de *P. aeruginosa* (esquerda) e *S. aureus* (direita) da placa de 96 poços exposta à luz UV. (C) placa de 96 poços após adição de resazurina. C- e C+ correspondem aos controles negativo (poços contaminados mas não expostos à luz UV) e positivo (poços não contaminados) de exposição à luz UV, respectivamente. O número de células, controle negativo (C-) e controle positivo (C+) estão representados nas letras B e C.

(A) Bar graph with OD_{600nm} reading values from the 96-well plate added with broth after exposure to UV light during 10 minutes. The graphics show the values of readings for the wells with broth after contamination with different populations of *P. aeruginosa* (left) and *S. aureus* (right) exposed or not exposed to the UV light. (B) Plate containing nutrient agar inoculated with samples of *P. aeruginosa* (left) and *S. aureus* (right) from the 96-well plate exposed to UV light. (C) 96-well plate after resazurin addition. C- and C+ correspond to the negative (wells contaminated but not exposed to UV light) and positive (wells not contaminated) controls of UV light exposition, respectively. The number of cells, negative control (C-) and positive control (C+) are represented in the letters B and C.

Para a esterilização das placas de Petri descartáveis, após exposição das placas contaminadas à luz UV, adição do ágar nutriente e incubação por 18 horas, em geral, observou-se crescimento apenas nas placas expostas por até 3 minutos. A exposição à luz UV foi mais eficiente em placas previamente contaminadas com *P. aeruginosa* em comparação com *S. aureus*, pois observamos maior crescimento em placas de *S. aureus* até 3 minutos de exposição (Figura 5).

Figura 5 - Eficiência do aparelho na esterilização de placas de Petri descartáveis.
Figure 5 - Efficiency of the apparatus in the sterilization of disposable Petri dishes.



Placas de Petri contaminadas com 10^6, 10^4 e 10^2 células de *P. aeruginosa* (parte superior) ou *S. aureus* (parte inferior) e expostas por 0 a 2 minutos a cada 20 segundos e depois a cada 30 segundos até 5 minutos à luz UV. UV por 1, 2, 3, 4 e 5 minutos. C- corresponde ao tempo de 0 segundos (não exposto à luz UV) e C+ corresponde ao controle positivo (não contaminado com bactérias).

Petri dishes are contaminated with 10^6, 10^4 and 10^2 cells of *P. aeruginosa* (top) or *S. aureus* (bottom) and exposed for 0 to 2 minutes every 20 seconds and then every 30 seconds up to 5 minutes to UV light. to UV for 1, 2, 3, 4 and 5 minutes. C- corresponds to the time of 0 seconds (not exposed to the UV light) and C+ corresponds to the positive control (not contaminated with bacteria).

Contudo, algumas placas contaminadas com *P. aeruginosa* e expostas por tempos inferiores a 3 minutos não apresentaram crescimento. Isto pode ser explicado pelo procedimento de limpeza da placa antes da explosão da luz UV (Figura 5). Para *S. aureus*, a eficiência de esterilização esteve de acordo com o número de células plaqueadas, o que não foi observado nas placas contaminadas com *P. aeruginosa* (Figura 5). Em geral, o aparelho foi eficiente para tempos superiores a 3 minutos de exposição. Esses resultados mostram a eficiência do aparelho na esterilização de placas de Petri descartáveis, mesmo sem a adição de mais uma etapa no processo de esterilização. Assim, os resultados obtidos mostraram que o aparelho é eficiente no processo de esterilização. Além disso, combinando etapas adicionais de lavagem, é possível melhorar ainda mais a eficiência do processo de esterilização.

Alvarenga (2005) destaca o custo da câmara mencionada em seu estudo (R$ 67,00) e compara-o com os valores de câmaras de esterilização fabricadas nacionalmente (R$ 2500,00) e internacionalmente (US$ 584,50). No entanto, tanto em sua pesquisa quanto nos demais estudos mencionados na introdução deste texto, foram empregadas lâmpadas industrializadas como fonte de radiação UV, projetadas especificamente para esterilização. Nesse contexto, a vantagem do equipamento proposto torna-se evidente, uma vez que, além de apresentar custo reduzido, facilidade de implementação e construção, também contribui para a diminuição de poluentes ambientais.

4. Conclusão

Neste trabalho mostramos uma aplicação viável para as lâmpadas de vapor de mercúrio descartadas. A câmara de esterilização desenvolvida é de fácil construção, de baixo custo e segura. Os resultados obtidos neste estudo mostraram que o equipamento pode ser utilizado para esterilização de superfícies em uma ampla variedade de aplicações. Constatamos que a câmara desenvolvida foi capaz de esterilizar equipamentos utilizados em laboratórios de pesquisa, contaminados com *P. aeruginosa* e *S. aureus*, como placas de Petri, placa de 96 poços e alças, que comumente seriam descartados após o uso, possibilitando a redução de resíduos plásticos. Desta forma, nossa proposta vem com uma forma de economizar recursos e retirar do meio ambiente um componente com alto poder poluente.

5. Agradecimentos

Os autores expressam seus agradecimentos às agências de fomento CAPES (Código de Financiamento 001), CNPq e FAPEMIG pelo apoio financeiro.

6. Referências

Alvarenga, E. S., Saliba, W. A., & Milagres B. G. (2005) Montagem de câmara com lâmpada de ultravioleta de baixo custo. **Quim. Nova.** 28(5), 927-928. https://doi.org/10.1590/S0100-40422005000500034

Bagnato, VS, Kurachi, C., Menezes, PFC, Chianfrone. D. J., & Pires, L. (2016) Dispositivo para a desinfecção de superfícies. (Patente BR nº 20 2014 006540 2 Y1).

Cutler, T. D., & Zimmerman, J. J. (2011) Irradiação ultravioleta e os mecanismos subjacentes à sua inativação de agentes infecciosos. **Anima. Curar. Res. Apocalipse** 12 (1), 15-23. doi: 10.1017/S1466252311000016.

Gouvêa, M. M., Lima, G. S., Neto, A. A. S., Netto, A. D. P., & Marques, F. F. C. (2014) Aplicação da radiação ultravioleta como contribuição à química verde e construção de um reator fotoquímico alternativo e de baixo custo para pré-tratamento de amostras. **Quim. Nova.** 37(2), 337-343. https://doi.org/10.5935/0100-4042.20140056

Guva (2011) https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/1918guva.pdf. Acessado em 1 de janeiro de 2023.

Hall, BD, Cobb, TP, Graham, MD, Hesslein, RH, Kidd, KA, Vogt, R., & Leavitt, PR (2020) Elevador de mercúrio em lagos: um novo vetor de transferência de metilmercúrio para peixes via invertebrados migratórios. **Environ. Sci. Technol. Lett.** Vamos. 7(8), 579-584. https://doi.org/10.1021/acs.estlett.0c00446

Hull, N. M., Isola, M. R., Petri, B., Chan, P., & Linden, K. G. (2017) Algal DNA Repair Kinetics Support Culture-Based Enumeration for Validação de Sistemas de Tratamento de Água de Lastro com Desinfecção Ultravioleta. **Environ. Sci. Technol. Lett.** 4(5), 192-196. https://doi.org/10.1021/acs.estlett.7b00076

Li, M., Qiang, Z., Bolton, J. R., Qu, J., & Li, W. (2015) Um sistema de fotorreação UV mini-fluídico para Estudos fotoquímicos em escala de bancada. **Environ. Sci. Technol. Lett.** https://doi.org/10.1021/acs.estlett.5b00207

Lima, A. P. S., Müller, R. C. S., Sarkis, J. E. S., Alves, C. A., Bentes, M. H. S., Brabo, E., & Santos, E. O. (2000) Mercury Contamination in Fish from Santarém, Pará, Brazil. **Environ. Research Section A**. 83:117-122. doi:10.1006/enrs.2000.4051

Lui, C. L. C., & Aquino, S. (2014, novembro) "Logística reversa: Como reaproveitar placas de petri no fluxo de trabalho de um laboratório de microbiologia," **Anais do III SINGEP e II S2IS**. São Paulo, SP, Brasil, 10.

Ma, B., Linden, Y. S., Gundy, P. M., Gerba, C. P., Sobsey, M. D., & Linden, K. G. (2021) Inactivation of Coronaviruses and Phage Phi6 from Irradiation across UVC Wavelengths. **Environ Sci. Technol. Lett.** 8(5), 425-430. https://doi.org/10.1021/acs.estlett.1c00178

Marchi, J. (2013) Kit germicida automático para reservatórios de água. (BR Patent No. 10 2013 032016 1 A2).

Marchi, J. (2015) Reservatório de água germicidad automático. (BR Patent No. 10 2013 017202 2 A2).

McLagan, D. S., Mitchell, C. P. J., Huang, H., Lei, Y. D., Cole, A. S., Steffen, A., Hung, H., & Wania, F. A. (2016) High-Precision Passive Air Sampler for Gaseous Mercury. **Environ. Sci. Technol. Lett.** 3:24-29. https://doi.org/10.1021/acs.estlett.5b00319

Oliveira, A. (2002) Equipamento e sistema para desenfecção de embalagens descartáveis de bebidas. (BR Patent No. 0100437 9 A2).

Philips (2011) Lighting Hardware. http://images.philips.com/is/content/PhilipsConsumer/PDFDownloads/Global/ODLI20160609_001-UPD-en_AA-Lighting-Hardware-17122012.pdf. Accessed 02 Jan 2023.

Philips (2022) Replacement Lamps, Mercury Vapor Standard - Product family leafet. https://www.lighting.philips.com/main/prof/conventional-lamps-and-tubes/high-intensity-discharge-lamps/hpl-high-pressure-mercury/mercury-vapor-standard. Accessed 02 Jan 2023.

Sella, A. V. (2020) Caixa exterilizadora à base de luz UV-C com placa de quartzo. (BR Patent No. 10 2019 023379 6 A2).

Sharma, A. (2012) An Ultraviolet-Sterilization Protocol for Microtitre Plates. **Journal of Experimental Microbiology and Immunology (JEMI)**. 16:144-147.

Shetaya, W. H., Osterwalder, S., Bigalke, M., Mestrot, A., Huang, J., & Alewell, C. (2017) An Isotopic Dilution Approach for Quantifying Mercury Lability in Soils. **Environ. Sci. Technol. Lett.** 4(12), 556-561. https://doi.org/10.1021/acs.estlett.7b00510

Wang, W. (2020) Overflow water sterilizing device, has water outlet pipe fixed at the end of device main body, quick joint installed on flow homogenizer, and lamp plate provided with UVC-LED lamp, where the light emitting end of the lamp plate is fixed towards quartz glass, (CN Patent No. CN210313630-U).

Won, W., Tran, L. G., Park, W., Kim, K., Shin, C. S., Kim, N., Kim, Y., & Yoon, Y. (2018) UV-LEDs for the Disinfection and Bio-Sensing Applications. **Int. J. Precis. Eng. Manuf.** 19:1901-1915. https://doi.org/10.1007/s12541-018-0218-5

Young, A. R., Moan, J., Björn, L. O., & Nultsch, W. (1993) **Environmental UV Photobiology**. Springer Science, New York. https://doi.org/10.1007/978-1-4899-2406-3

Zhang, S., Ye, C., Lin, H., Lv, L., & Yu, X. (2015) UV Disinfection Induces a Vbnc State in Escherichia coli and Pseudomonas aeruginosa. **Environ. Sci. Technol.** 49(3), 1721-8. https://doi.org/10.1021/es505211e

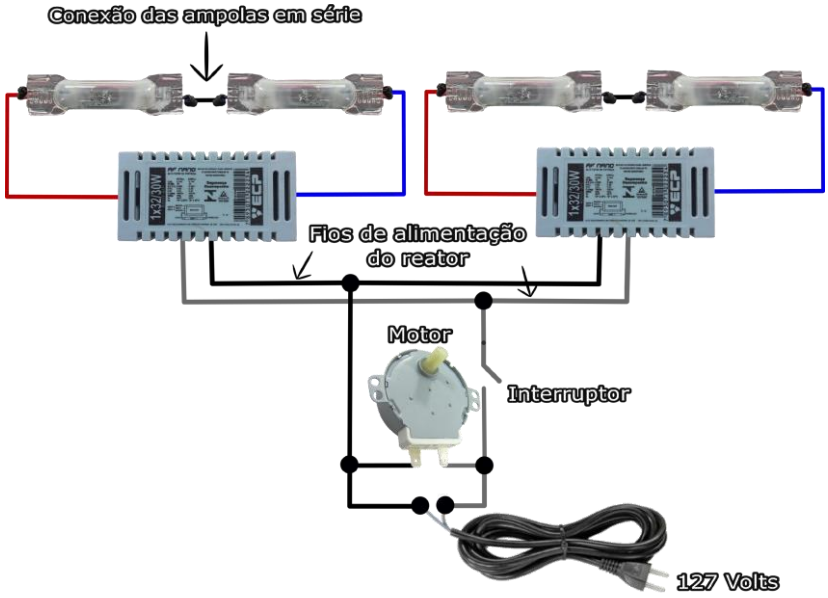
Zhao, Z., Zhang, Z., Lanzarini-Lopes, M., Sinha, S., Rho, H., Herckes, P., & Wsterhoff, P. (2020) Germicidal Ultraviolet Light Does Not Damage or Impede Performance of N95 Masks Upon Multiple Uses. **Environ. Sci. Technol. Lett.** 7(8), 600-605. https://doi.org/10.1021/acs.estlett.0c00416

7. Material Suplementar

Tabela I - Custo médio dos componentes. Itens reciclados de outros componentes são representados por *. No caso do reator, pode-se optar por usar equipamentos novos, o que otimizaria o tempo de montagem do equipamento.

Materiais	**Custo médio (R$)**
4 Lâmpada de vapor de mercúrio	*
Compartimento de MDF	60
Visor de vidro	10
2 Reatores	30 *
Cabos	*
Motor de microondas	*
2 Interruptores	5
Custo total (R$)	**105**

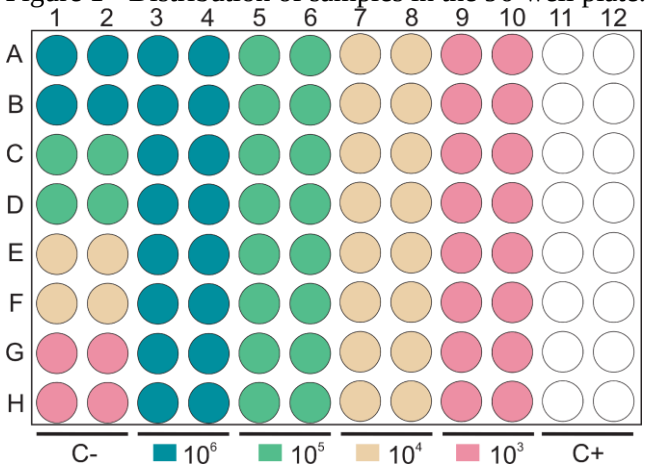
Figura S1 - Figura Suplementar 2 - Diagrama de conexões elétricas com imagens dos componentes mais utilizados.
Figure S1 - Supplementary Figure 2 - Diagram of electrical connections with images of the most used components.



Foram conectadas em série duas ampolas, as quais foram conectadas ao reator com 32 watts de potência (1 lâmpada/32W) utilizado para acionar as ampolas de quartzo. Um segundo circuito, contendo mais duas ampolas, foi feito de forma semelhante. Os fios de alimentação dos dois reatores (fase e neutro) estão conectados em paralelo, como pode ser visto na imagem. O motor de esterilização do circuito também está conectado em paralelo com os reatores, conforme mostrado no diagrama. Um interruptor é conectado em série com um dos fios da tomada (fase ou neutro). Por fim, uma tomada é conectada para acionar o equipamento.

Two ampoules were connected in series, which were connected to the reactor with 32 watts of power (1 lamp/32W) used to drive the quartz ampoule. A second circuit, containing two more ampoules, was made similarly. The power wires of the two reactors (phase and neutral) are connected in parallel, as can be seen in the image. The loop sterilization motor is also connected in parallel with the reactors, as shown in the diagram. A switch is connected in series with one of the socket wires (phase or neutral). Finally, an outlet is connected to drive the equipment.

Figura S2 - Figura Suplementar 1 - Distribuição das amostras na placa de 96 poços.
Figure S2 - Supplementary Figure 1 - Distribution of samples in the 96-well plate.



As diferentes amostras contendo diferentes populações de bactérias foram distribuídas na placa conforme mostrado na figura. O controle negativo (C-) corresponde a poços contaminados com bactérias que não foram expostos à luz UV. O controle positivo (C+) corresponde a poços adicionados apenas com caldo nutriente e não contaminados com bactérias.

The different samples containing different populations of bacteria were distributed on the plate as shown in the figure. The negative control (C-) corresponds to wells contaminated with bacteria that have not been exposed to UV light. The positive control (C+) corresponds to wells added only with nutrient broth and not contaminated with bacteria.