



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE
TELECOMUNICAÇÕES

WAGNER DE ANCHIETA MARQUES

Otimização do processo de desinfecção de ambientes por radiação ultravioleta C

NITERÓI

2024

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE
TELECOMUNICAÇÕES

WAGNER DE ANCHIETA MARQUES

**Otimização do processo de desinfecção de ambientes por radiação
ultravioleta C**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações. Área de concentração: Sistemas de Telecomunicações.

Orientador:
Ricardo Campanha Carrano

NITERÓI

2024

(Espaço reservado para a ficha catalográfica)

WAGNER DE ANCHIETA MARQUES

Otimização do processo de desinfecção de ambientes por radiação ultravioleta C

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações. Área de concentração: Sistemas de Telecomunicações.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Ricardo Campanha Carrano, D.Sc. – Orientador, UFF

Prof. Vitor Hugo Ferreira, D.Sc. – UFF

Prof. Robisom Damasceno Calado, D.Sc. – UFF

Prof. Diego Gimenez Passos, D.Sc. – ISEL

Prof. Catarine Canellas Gondim Leitão, D.Sc. – UERJ

Niterói

Agosto de 2024

*Dedico à minha família, de modo especial
aos meus pais pelo seu apoio imensurável e
ao meu avô Antonio Moraes de Anchieta
que apesar de ter partido, ainda vive na
minha memória, onde ainda guardo as suas
manifestações de carinho desde a minha infância.*

Agradecimentos

Agradeço a Deus por ter me dado força e amparo, sobretudo nos momentos mais difíceis, os quais eu sabia que sozinho jamais conseguiria vencê-los e por ter me agraciado por uma família tão amorosa.

Agradeço a minha incrível família que sempre esteve ao meu lado. Um agradecimento especial aos meus pais Severino do Ramo Marques e Catia Santos de Anchieta Marques pelo seu apoio incondicional nas minhas escolhas durante a minha vida acadêmica e profissional, e que mesmo diante das dificuldades, sempre prezaram por uma educação exemplar para com seus filhos. Aos meus pais, eu sinceramente espero algum dia, poder retribuir à altura todo o esforço que despenderam ao longo da minha formação e criação.

Ao meu orientador professor Ricardo Campanha Carrano, por todas as suas orientações, por ter acreditado na proposta deste trabalho e por todo seu esforço em viabilizar os meios necessários para a realização desta pesquisa. Também gostaria de agradecê-lo por seu empenho e incentivo em realizar tentativas para que esta pesquisa pudesse contribuir e se somar aos esforços da universidade em ações de combate à pandemia de COVID-19.

Ao professor Vitor Hugo que nos últimos anos da minha graduação e durante meu mestrado desempenhou o papel de tutor e mentor. E por isso, possui forte influência na minha formação acadêmica e profissional. Gostaria de agradecê-lo pelos inúmeros incentivos, apoio e sugestões dados ao longo do desenvolvimento deste trabalho, sobretudo no período da pandemia de COVID-19.

Aos amigos e membros da empresa Higiatronic tecnologia para a saúde LTDA-ME, por incentivarem e apoiarem este trabalho.

Resumo

A infecção hospitalar é um dos principais problemas enfrentados por pacientes, instituições e profissionais prestadores de serviços da saúde. Nos estabelecimentos assistenciais de saúde (EAS), uma das principais formas de prevenir as infecções hospitalares é a desinfecção dos ambientes. Entre os métodos existentes, a desinfecção por radiação ultravioleta C (UVC) se destaca por ser um método que não precisa de produtos químicos. Por isso, sua aplicação não necessita de manipulação, armazenamento e transporte de soluções químicas. Entretanto, os equipamentos para desinfecção de ambientes por radiação UVC atualmente disponíveis no mercado, e que possuem comprovação científica operam em potência elétrica elevada. Por conta disso, em alguns ambientes dos EAS brasileiros pode ser mais difícil a utilização desses equipamentos, por causa do limite de potência das tomadas elétricas disponíveis. Essa dificuldade se torna ainda mais relevante em um cenário de pandemia de uma doença infecciosa, por exemplo, a COVID-19. Diante disso, o presente trabalho avaliou a eficiência energética das duas abordagens identificadas que são utilizadas na desinfecção de ambientes por radiação UVC, com o objetivo de verificar se uma das abordagens pode facilitar o uso dos equipamentos no Brasil. A avaliação foi realizada através de simulações e de modelos matemáticos. Os resultados mostraram que uma das abordagens é mais eficiente energeticamente. Ou seja, ela é capaz de alcançar as mesmas taxas de desinfecção no ambiente do que a outra abordagem, porém, com menor potência e consumo de energia elétrica. Assim, este trabalho demonstrou que uma das abordagens permite otimizar o processo de desinfecção de ambientes por radiação UVC. A otimização desse processo pode viabilizar o uso dos equipamentos para desinfecção por radiação UVC com comprovação científica no Brasil, permitindo sua conexão em qualquer tomada disponível no ambiente. Essa facilidade é particularmente importante em momentos de pandemia. Além disso, a otimização permite tornar os equipamentos mais compactos, o que reduz custos sem comprometer sua capacidade de desinfecção.

Palavras-chaves: radiação UVC, desinfecção de ambiente, eficiência energética, otimização.

Abstract

Hospital-acquired infections pose significant challenges for patients, and providers alike. Within healthcare facilities, one of the primary methods for preventing such infections is room disinfection. Of the various methods available, ultraviolet C (UVC) radiation disinfection stands out for its chemical-free nature, eliminating the need for handling, storing, or transporting chemical solutions. However, the UVC disinfection equipment currently on the market and backed by scientific validation, operates at high electrical power. This poses challenges in some Brazilian healthcare facilities due to power limitations of the electrical outlet. The problem is further exacerbated during pandemics, such as the COVID-19 outbreak. To address this, our study assessed the energy efficiency of the approaches currently used for UVC radiation-based room disinfection using simulations and mathematical models. Our findings revealed that one approach is more energy-efficient, achieving comparable disinfection rates with lower power consumption. Our findings revealed that one approach is more energy-efficient, achieving comparable disinfection rates with lower power consumption. Thus, our study underscores the potential for optimizing the UVC radiation-based disinfection process, making scientifically validated equipment more accessible in Brazil by enabling connection to any available power outlet. Such flexibility is very important during pandemics. Moreover, optimization can lead to more compact equipment, reducing costs without compromising disinfection effectiveness.

Keywords: Room disinfection, area disinfection, energy efficiency, UVC radiation, optimization.

Lista de Figuras

FIGURA 1 - RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA NO ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO.	2
FIGURA 2 - IRRADIÂNCIA SOBRE UMA SUPERFÍCIE.	10
FIGURA 3 - ALGUMAS COLÔNIAS FORMADAS EM UMA PLACA DE PETRI.	11
FIGURA 4 - VISTA SUPERIOR DA DESINFECÇÃO DO AMBIENTE - ABORDAGEM CENTRALIZADA.	26
FIGURA 5 - RELAÇÃO ENTRE A IRRADIÂNCIA E A DISTÂNCIA.	27
FIGURA 6 - VISTA SUPERIOR DA DESINFECÇÃO DO AMBIENTE - ABORDAGEM DISTRIBUÍDA. .	28
FIGURA 7 - DIFERENÇA DA IRRADIÂNCIA ENTRE A ABORDAGEM CENTRALIZADA E A DISTRIBUÍDA.	29
FIGURA 8 - SIMULAÇÃO: ABORDAGEM CENTRALIZADA – CASO BASE.	32
FIGURA 9 - COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS E DADOS EXPERIMENTAIS.	34
FIGURA 10 - REPRESENTAÇÃO GEOMÉTRICA SIMPLIFICADA PARA INTERPRETAÇÃO DO FATOR DE VISÃO DA RADIAÇÃO.	34
FIGURA 11 - CONFIGURAÇÃO SUPERFÍCIE CILÍNDRICA E ELEMENTO DE ÁREA DIFERENCIAL. 35	
FIGURA 12 - MODELO DE LÂMPADA UVC TUBULAR USADA NA SIMULAÇÃO.	36
FIGURA 13 - MODELAGEM DO EQUIPAMENTO: REPRESENTAÇÃO DAS LÂMPADAS UVC NO MODELO DESENVOLVIDO.	38
FIGURA 14 - MODELAGEM DO EQUIPAMENTO: NÍVEIS DE POTÊNCIA DE 3 EQUIPAMENTOS DIFERENTES.	39
FIGURA 15 - SIMULAÇÃO: ABORDAGEM DISTRIBUÍDA - CASOS 1 E 2.	43
FIGURA 16 - PERFIL DA IRRADIÂNCIA DOS EQUIPAMENTOS SIMULADOS (ESCALA LINEAR). ..	44
FIGURA 17 - PERFIL DA IRRADIÂNCIA DOS EQUIPAMENTOS SIMULADOS (ESCALA LOGARÍTMICA).	45

Lista de Tabelas

TABELA 1 - RELAÇÃO ENTRE A REDUÇÃO DE LOG E REDUÇÃO EM PERCENTUAL DA CARGA MICROBIANA.	12
TABELA 2 - COMPARAÇÃO ENTRE OS PRINCIPAIS EQUIPAMENTOS.	22
TABELA 3 - PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DA LÂMPADA UVC ESCOLHIDA.	37
TABELA 4 - DOSES NECESSÁRIAS PARA REDUÇÃO DE MICRO-ORGANISMOS.	41
TABELA 5 - IRRADIÂNCIA DOS EQUIPAMENTOS SIMULADOS.	47
TABELA 6 - TEMPO E CONSUMO PARA ELIMINAR 3 LOG ₁₀ (99,9%) DO SARS-CoV-2.	49
TABELA 7 - CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA E REDUÇÃO DO CONSUMO COM A ABORDAGEM DISTRIBUÍDA.	51
TABELA 8 - CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA E REDUÇÃO RELATIVA DO CONSUMO.	52

Lista de Abreviaturas e Siglas

COVID-19	COronaVirus Disease
CDC	Disease Control and Prevention
DNA	Ácido Desoxirribonucleico
EAS	Estabelecimentos Assistenciais de Saúde
LED	Light Emitting Diode (Diodo emissor de luz)
MDRPA	Multidrug Resistant Pseudomonas Aeruginosa (Pseudomonas aeruginosa multirresistente)
MRSA	Multiple-Resistant Staphylococcus Aureus (Staphylococcus aureus resistente à meticilina)
PVC	Policloreto de Vinila
RNA	Ácido Ribonucleico
UFC	Unidade formadora de colônias
UPA	Unidades de Pronto Atendimento
UV	Ultravioleta
UVA	Ultravioleta A
UVB	Ultravioleta B
UVC	Ultravioleta C
VRE	Vancomycin-Resistant Enterococcus Faecium (Enterococcus resistente a vancomicina)

Sumário

Capítulo 1 - Introdução.....	1
1.1 Motivação	3
1.2 Objetivos	4
1.2.1 Objetivo geral	5
1.2.2 Objetivos específicos	5
1.3 Estrutura do Trabalho	6
Capítulo 2 - Revisão da Literatura	7
2.1 Fundamentação teórica	7
2.1.1 Fontes emissoras de radiação UVC	8
2.1.1.1 Fonte natural	8
2.1.1.2 Fonte artificial	8
2.1.2 Principais parâmetros do processo de desinfecção por radiação UVC.....	9
2.1.2.1 Parâmetros radiométricos	9
2.1.2.2 Parâmetros microbiológicos	11
2.2 Radiação UVC para desinfecção de ambientes	12
2.2.1 Um breve histórico	13
2.2.2 Radiação UVC e a pandemia de COVID-19.....	15
2.2.3 Estado da Arte	16
2.2.4 Principais equipamentos emissores	21
2.2.5 Processo para desinfecção de ambientes usando equipamentos emissores de radiação UVC.....	24
2.2.5.1 Abordagem centralizada.....	25
2.2.5.2 Abordagem distribuída.....	27
Capítulo 3 - Material e Métodos.....	31
3.1 Simulação: abordagem centralizada – Caso base	31
3.2 Modelagens	33
3.2.1 Modelo fator de visão da radiação	33
3.2.2 Modelagem do equipamento	37
3.2.3 Modelo dose resposta	41
3.3 Simulação: abordagem distribuída – Casos 1 e 2	42
Capítulo 4 - Resultados e Discussão.....	44
Capítulo 5 - Conclusão	56

5.1	Trabalhos Futuros	58
	Referências	59

Capítulo 1 - Introdução

A desinfecção é um procedimento que tem como objetivo eliminar ou inativar a maioria dos micro-organismos presentes em objetos inanimados e superfícies, através de um processo químico ou físico [1]. Além das superfícies, a desinfecção também pode ser realizada na água e no ar.

Desse modo, a desinfecção é o processo capaz de reduzir para níveis seguros aos seres humanos, a quantidade de micro-organismos causadores de doenças presentes em superfícies, água e no ar ambiente [2]. Neste trabalho, a expressão “desinfecção de ambiente” será usada para se referir a desinfecção das superfícies de um ambiente fechado.

Atualmente é possível observar que o processo da desinfecção é amplamente realizado em diversas áreas, tais como a saúde e a veterinária, assim como também nas indústrias de alimento e farmacêutica, dentre outras áreas. Na saúde em particular, a desinfecção é empregada em estabelecimentos assistenciais de saúde (EAS), como por exemplo hospitais e clínicas médicas, como sendo uma das principais formas de controle de infecções hospitalares [3].

As técnicas utilizadas na área da saúde para desinfecção são realizadas a partir de processos químicos ou físicos. Dentre as soluções que envolvem processos químicos, tem-se o álcool etílico a 70%, o ácido peracético e o quaternário de amônio [3]. Com relação às soluções que envolvem processos físicos, enquanto algumas são baseadas em princípios térmicos, como é o caso da pasteurização e a termodesinfecção, outras têm como base a radiação, como é o caso da radiação ultravioleta (UV) [1].

Conforme ilustra a Figura 1, no espectro eletromagnético a radiação ou luz UV está situada entre os Raios X e a luz visível, compreendida em uma faixa de comprimento de onda entre 100 nm e 400 nm. A faixa da radiação ultravioleta, por sua vez, é dividida em diversas sub-regiões, sendo as principais conhecidas como UVA, UVB e UVC. A radiação UVA, considerada como radiação de ondas longas, está compreendida entre 315 nm e 400 nm, a UVB, radiação de ondas médias, está entre 280 nm e 315 nm, e a UVC, radiação de ondas curtas, de 200 nm até 280 nm.

Cada uma das sub-regiões do UV citadas é capaz de causar algum dano biológico em seres humanos ou em micro-organismos [4]. A radiação UVA mesmo sendo a menos danosa, pode causar o envelhecimento precoce da pele, em casos de exposição excessiva.

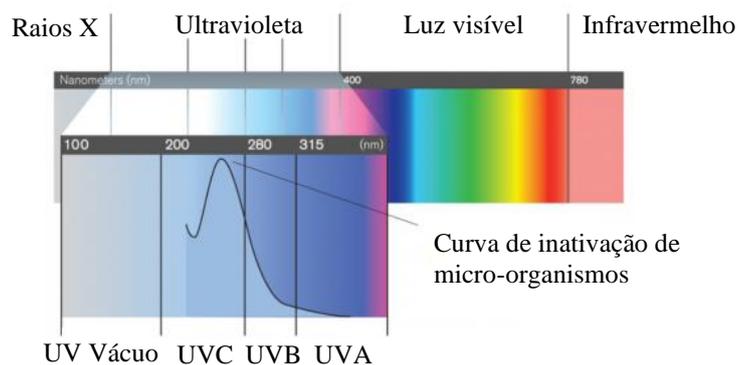


Figura 1 - Radiação ultravioleta no espectro eletromagnético.

Fonte: adaptado de Yao *et al.* [5].

A radiação UVB, em casos moderados de exposição, também pode provocar envelhecimento precoce da pele. Como sua atuação ocorre também no DNA causando mutação genética, sua exposição pode levar ao câncer de pele em casos extremos. A radiação UVC pode causar todos os danos à pele mencionados anteriormente, e ainda provocar danos à visão, mesmo em casos moderados de exposição [4].

Uma vez que a radiação UVC pode provocar danos ao DNA/RNA de micro-organismos em um curto período de exposição, ela é considerada uma radiação com elevada ação germicida [6]. Ou seja, a radiação UVC atua eliminando ou inativando patógenos (micro-organismos causadores de doenças) como vírus, bactérias, fungos, protozoários e algas.

A ação germicida da radiação UVC ocorre porque a sua faixa de comprimento de onda permite que essa radiação seja absorvida pelo material genético dos micro-organismos [6]. Ao absorver a radiação, a informação genética dos micro-organismos pode ser alterada, o que provoca a sua morte ou inativação. Assim, os micro-organismos se tornam incapazes de se replicarem ou de causar doenças em seres humanos.

Por outro lado, radiações com comprimento de onda fora da região do UVC, como a UVA e UVB por exemplo, possuem ação germicida reduzida, conforme indica a curva de inativação de micro-organismos presente na Figura 1.

Sendo assim, devido a sua elevada ação germicida, a radiação UVC tem sido utilizada com segurança como método de desinfecção em diversas áreas, inclusive na saúde. Quando a radiação UVC é combinada com processos manuais de limpeza, ou ainda com outras técnicas de desinfecção, constitui-se então uma forma efetiva para prevenir as doenças causadas por micro-organismos patogênicos e também as infecções hospitalares.

1.1 Motivação

A infecção hospitalar é um dos principais problemas enfrentados por pacientes, instituições e profissionais prestadores de serviços da saúde. Nos EAS, uma das principais formas de prevenir as infecções hospitalares é a desinfecção dos ambientes. Assim, os microorganismos patogênicos presentes nas superfícies dos ambientes podem ser reduzidos para níveis seguros para pacientes e profissionais da saúde.

No entanto, é possível observar que as práticas atuais de limpeza e de desinfecção realizadas de forma manual e baseadas apenas em produtos químicos, não têm sido suficientes para prevenir satisfatoriamente as infecções hospitalares. Nesse contexto, a radiação UVC tem sido usada principalmente nos Estados Unidos e em alguns países da Europa, como método complementar às práticas tradicionais de desinfecção de ambientes. Ao adicionar uma etapa com a radiação UVC no processo de desinfecção, esses países têm tornado os ambientes dos EAS mais seguros [7], [8].

Entretanto, os equipamentos para desinfecção de ambientes por radiação UVC atualmente disponíveis no mercado, que possuem comprovação científica de desinfecção, operam em potência elétrica elevada. Por conta disso, eles podem ter dificuldades para operar em alguns ambientes dos EAS no Brasil. Essa dificuldade está relacionada com a tensão e os limites de corrente das tomadas disponíveis nesses ambientes. Com isso, algumas tomadas disponíveis no ambiente podem não suportar a operação do equipamento, dificultando assim a desinfecção do ambiente.

Diante disso, a otimização do processo de desinfecção de ambientes por radiação UVC pode tornar esse processo mais eficiente energeticamente. Ou seja, com a otimização será possível obter os mesmos resultados dos equipamentos atuais na desinfecção do ambiente, porém consumindo menos energia elétrica.

Essa maior eficiência energética na desinfecção do ambiente permite, por exemplo, que os equipamentos possam ser conectados em qualquer tomada elétrica, independentemente da sua tensão ou corrente máxima suportada. Dessa forma, a otimização poderá contribuir para viabilizar o uso da radiação UVC na desinfecção de ambientes dos EAS no Brasil.

Além de permitir maior flexibilidade para conectar os equipamentos em qualquer tomada, independe da tensão ou da corrente máxima, a otimização também permite que mais equipamentos possam ser usados simultaneamente. Por conta da maior eficiência energética

do processo, mais equipamentos podem ser usados no mesmo ambiente ou em outro ambiente do EAS.

A utilização simultânea de vários equipamentos em um ambiente tem a vantagem de ampliar o alcance da radiação UVC. Como a radiação UVC tem um comportamento similar à luz visível, que não é capaz de ultrapassar ou contornar obstáculos, então regiões de sombra podem existir durante a desinfecção. Assim, o uso de mais equipamentos no ambiente pode reduzir as regiões sombra e aumentar a área de desinfecção.

Além disso, a possibilidade de usar vários equipamentos de desinfecção simultaneamente em ambientes diferentes, sem sobrecarregar as instalações elétricas do EAS, pode aumentar a disponibilidade desses ambientes. Isso pode ser particularmente interessante em um cenário de pandemia de uma doença infecciosa, como foi o caso da COVID-19 (COronaVIRus Disease).

Nesse cenário, também é interessante que equipamentos de desinfecção de ambientes por radiação UVC possam ser usados não apenas em hospitais, mas também em EAS de menor porte. Como pode ser o caso de hospitais de campanha, postos de saúde, Unidades de Pronto Atendimento (UPA) e até mesmo em casas de repouso.

Outra vantagem proporcionada pela maior eficiência energética do processo é a redução do tempo de desinfecção. Como o consumo de energia do equipamento de desinfecção está relacionado com o seu tempo de operação, então se o processo se tornar mais eficiente energeticamente, o tempo de desinfecção poderá ser reduzido. Assim, o processo poderá ser realizado sem comprometer a desinfecção do ambiente, com menor consumo de energia.

Portanto, a fim de viabilizar o uso da radiação UVC para desinfecção de ambientes no Brasil, esta pesquisa pretende investigar a otimização desse processo. Com a otimização, a desinfecção do ambiente poderá ser realizada de forma mais eficiente energeticamente. Assim, os equipamentos para desinfecção de ambientes por radiação UVC poderão ser utilizados em qualquer tomada disponível no ambiente, tendo em vistas as normas brasileiras para instalações elétricas vigentes. Dessa forma, esta pesquisa visa contribuir para viabilizar o uso dessa tecnologia no Brasil.

1.2 Objetivos

O objetivo geral e os objetivos específicos deste trabalho são apresentados a seguir.

1.2.1 Objetivo geral

Avaliar a eficiência energética das abordagens utilizadas atualmente para desinfecção de ambientes por radiação UVC. Essa avaliação será realizada através de simulação e modelagem, onde um ambiente de controle e modelos matemáticos foram considerados. A avaliação mostrou que ambas as abordagens podem alcançar as mesmas taxas de desinfecção nas superfícies do ambiente. Porém, uma delas alcança o mesmo resultado consumindo menos energia, ou seja, de forma mais eficiente energeticamente.

Assim, ao demonstrar que existe uma abordagem mais eficiente energeticamente, a potência e o consumo de energia elétrica dos atuais equipamentos poderão ser reduzidos. Com isso, os equipamentos poderão ser conectados em qualquer tomada disponível no ambiente, viabilizando assim o uso da radiação UVC na desinfecção de ambientes nos EAS do Brasil.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos desta pesquisa são:

- Avaliar a eficiência energética das abordagens utilizadas atualmente para desinfecção de ambientes por radiação UVC;
- Estabelecer um ambiente de controle simulado, no qual será realizado as simulações para avaliação da eficiência energética das abordagens;
- Desenvolver um modelo matemático para equipamentos de desinfecção com uma ou mais lâmpadas UVC;
- Utilizar modelos matemáticos para estimativa de irradiância e taxas de desinfecção dos micro-organismos nas superfícies do ambiente;
- Estabelecer a potência e o consumo de energia elétrica dos equipamentos de uma das abordagens como base de comparação, ao realizar a desinfecção do ambiente simulado;
- Comparar a potência e o consumo de energia das abordagens para as mesmas taxas de desinfecção e micro-organismos presentes em alguns pontos do ambiente de controle;

- Verificar a partir da comparação, qual das abordagens é a mais eficiente energeticamente;
- Verificar se a potência elétrica do equipamento usado na abordagem mais eficiente energeticamente é compatível com a tomada elétrica de menor potência prevista pelas normas de instalações elétricas do Brasil. E assim, verificar se o equipamento poderá ser conectado em qualquer tomada disponível no ambiente.

1.3 Estrutura do Trabalho

A estrutura desta Tese está estabelecida como descrito a seguir.

O Capítulo 1 apresentou a contextualização, a motivação e os objetivos deste trabalho.

O Capítulo 2 apresenta inicialmente uma fundamentação teórica sobre radiação UVC, que contribui para a compreensão de alguns aspectos mencionados na revisão da literatura e sobre desinfecção de ambientes por radiação UVC.

O Capítulo 3 descreve o material e os métodos, bem como os modelos que serão considerados no desenvolvimento deste trabalho.

O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos a partir da aplicação da metodologia descrita no capítulo anterior, bem como uma breve discussão desses resultados.

O Capítulo 5 apresenta as conclusões obtidas a partir da pesquisa realizada e descrita neste trabalho.

Capítulo 2 - Revisão da Literatura

Neste capítulo será apresentada inicialmente uma fundamentação teórica, e em seguida, a revisão da literatura sobre o uso da radiação UVC para desinfecção de ambientes. A fundamentação teórica contribuirá para a compreensão de aspectos importantes mencionados na revisão da literatura.

2.1 Fundamentação teórica

A radiação é um processo físico de emissão e propagação de energia através de partículas ou ondas eletromagnéticas em movimento, podendo ocorrer em um meio material ou no vácuo. As radiações que se propagam através de ondas eletromagnéticas são chamadas de radiações eletromagnéticas. A Figura 1 **Erro! Fonte de referência não encontrada.** mostrou uma parte do espectro eletromagnético, onde as radiações eletromagnéticas são representadas de acordo com seu comprimento de onda.

Cada radiação presente no espectro eletromagnético, como por exemplo ultravioleta, raios X, raios gama, possuem características próprias, não apenas em relação a sua faixa de comprimentos de onda, mas principalmente, sobre seus efeitos e aplicações. Em particular, as características e efeitos da radiação ultravioleta, bem como a principal aplicação da radiação UVC, já foram mencionados no capítulo anterior.

Entretanto, é interessante observar que os micro-organismos não se comportam da mesma maneira quando são expostos a diferentes comprimentos de onda, dentro da faixa da radiação ultravioleta. Esse comportamento é descrito de forma qualitativa através da curva de inativação de micro-organismos, que já foi apresentada no capítulo anterior.

Conforme já estabelecido na literatura e ilustrado na curva da Figura 1, a faixa de comprimento de onda em que a destruição ou inativação dos micro-organismos ocorre com mais efetividade está entre 220 e 280 nm, e com pico de efetividade próxima a 265 nm [9]. Como essa faixa está situada na região do espectro eletromagnético em que se encontra o UVC, essa radiação é conhecida por sua elevada ação germicida.

Portanto, quando a radiação UVC emitida por uma fonte incide sobre micro-organismos, uma parcela da energia é absorvida. A energia absorvida pelos micro-organismos é capaz de alterar o seu material genético. Essa alteração pode destruir o micro-

organismo ou torná-lo inativo, de modo a impedir sua replicação ou de causar doenças em humanos.

2.1.1 Fontes emissoras de radiação UVC

A radiação UVC pode ser gerada a partir de uma fonte natural ou artificial, as quais serão apresentadas a seguir:

2.1.1.1 Fonte natural

O sol é uma fonte natural de radiação UVC, e dentre outras radiações também emite UVA e UVB. Entretanto, antes de chegarem até a superfície da Terra, essas radiações se comportam de maneira diferente ao passarem pela camada de ozônio.

Como a radiação UVA não é absorvida pela camada de ozônio, a intensidade da radiação UVA não é afetada ao chegar na superfície da Terra. Mas radiação UVB é parcialmente absorvida pela camada de ozônio, e por isso sua intensidade é atenuada ao chegar na Terra [4]. Em relação ao UVC, essa radiação é totalmente absorvida ao passar pela camada de ozônio. Dessa forma, a radiação UVC emitida pelo sol não chega até a superfície da Terra.

2.1.1.2 Fonte artificial

Como a radiação UVC emitida pelo sol não alcança a superfície da Terra, é necessário gerar artificialmente essa radiação para que possa ser usada pelo homem. Assim sendo, atualmente as lâmpadas são as fontes artificiais de radiação UVC. A seguir, são apresentados os tipos mais usados de lâmpadas emissoras de radiação UVC [4], [10]:

- **Lâmpada de mercúrio de baixa pressão:** Além de ser o tipo de lâmpada mais comum em aplicações, também é o tipo com mais disponibilidade no mercado. Sua emissão ocorre principalmente em 254 nm (cerca de 90%), mas também emite radiação no espectro visível e no infravermelho;
- **Lâmpada de xênon pulsada:** tipo de lâmpada em que a radiação UVC é emitida em uma série de pulsos curtos, podendo variar de micro a

milissegundos. São construídas a partir de um tubo de vidro com xenônio e criptônio em seu interior, e com eletrodos em cada extremidade do tubo;

- **Diodos emissores de luz UVC (LEDs UVC):** os LEDs atualmente disponíveis emitem radiação UVC principalmente em 214 nm, 265 nm e 273 nm. Os LEDs UVC funcionam em baixa tensão e em corrente contínua. No entanto, ainda não são tão eficientes quanto as lâmpadas de mercúrio de baixa pressão;
- **Lâmpada excimer ou lâmpada Far-UVC:** são lâmpadas que emitem radiação UVC em 222 nm. Possui a vantagem de ser menos danoso aos humanos, mas sua ação germicida não é tão intensa quanto as lâmpadas de mercúrio.

2.1.2 Principais parâmetros do processo de desinfecção por radiação UVC

A desinfecção por radiação UVC possui alguns parâmetros ou grandezas, que permitem uma descrição quantitativa do processo. Os principais parâmetros estão relacionados com a radiometria e a microbiologia, os quais serão apresentados a seguir.

2.1.2.1 Parâmetros radiométricos

A radiometria é a ciência que estuda a transferência e medição de energia das radiações eletromagnéticas situadas entre o ultravioleta e o infravermelho. Assim, a energia emitida por uma fonte de radiação UVC pode ser mensurada e descrita a partir de parâmetros radiométricos. As grandezas radiométricas consideradas mais relevantes para o processo de desinfecção por radiação UVC são estas [11]:

- **Energia radiante (Q):** energia total emitida, propagada ou recebida através de ondas eletromagnéticas. Sua unidade no SI é o joule (J);
- **Potência ou fluxo radiante (Φ):** potência total da radiação emitida por uma fonte, e que atravessa uma dada superfície por unidade de tempo. É medida em watt (W) e é dada por:

$$\phi = \frac{dQ}{dt} \quad (1)$$

- **Irradiância (i):** potência radiante que incide sobre uma superfície real ou imaginária, por unidade de área. A unidade da irradiância no SI é W/m^2 e dada por:

$$i = \frac{d\phi}{dA} \quad (2)$$

A Figura 2 ilustra o conceito da irradiância, bem como sua relação da potência radiante ϕ que incide sobre uma superfície de área A .

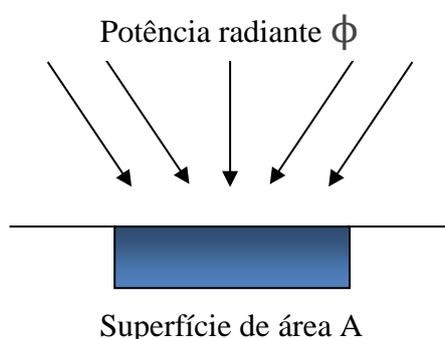


Figura 2 - Irradiância sobre uma superfície.

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

- **Dose ou exposição radiante (D)** [12]: também chamada de fluência, é a energia radiante recebida por uma superfície por unidade de área em determinado intervalo de tempo. A unidade da dose no SI é J/m^2 , podendo ser calculada a partir da integral da irradiância de uma superfície ao longo do período de irradiação, conforme indica a seguinte equação:

$$D = \frac{dQ}{dA} = \int_0^T i(t) dt \quad (3)$$

Caso a irradiância sobre uma superfície seja considerada constante ao longo do tempo, então a dose pode ser calculada pelo produto da irradiância com o tempo de duração da irradiação, conforme indicado a seguir:

$$D = i \cdot T \quad (4)$$

Portanto, a dose pode ser entendida como sendo uma medida da exposição à radiação de uma superfície real ou imaginária, durante o período de irradiação.

2.1.2.2 Parâmetros microbiológicos

A microbiologia é a ciência que estuda os micro-organismos, incluindo os patogênicos. Assim, quando uma análise microbiológica é realizada em uma amostra de superfície ou do ar ambiente, por exemplo, pode-se identificar quais e estimar quantos micro-organismos estão presentes nessa amostra. Como resultado dessa análise, a quantidade de micro-organismos pode ser expressa através de dois parâmetros microbiológicos:

- **Unidade formadora de colônias (UFC)** [13]: é uma unidade de medida usada para estimar a quantidade de bactérias ou fungos presentes em uma amostra. Essa quantidade é obtida a partir da contagem de colônias, sendo geralmente expressa em UFC/ml ou UFC/g. Durante o processo de análise, os micro-organismos presentes na amostra crescem e formam colônias. Essas colônias são formadas a partir de uma única célula ou de um conjunto de células. As colônias possuem tamanhos suficientes para serem visualizadas sem a utilização de um microscópio. Assim, através da contagem dessas colônias é possível estimar a quantidade de micro-organismos na amostra. Na Figura 3 é possível visualizar algumas colônias formadas em uma placa de Petri, após uma análise microbiológica.

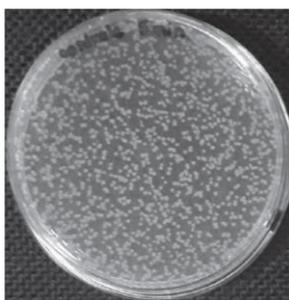


Figura 3 - Algumas colônias formadas em uma placa de Petri.

Fonte: Corrêa *et al.* [14].

- **Redução de Log da carga microbiana:** normalmente é usado para indicar de forma relativa, a quantidade de micro-organismos eliminados após um processo de desinfecção. Assim, uma redução de $3 \log_{10}$ por exemplo, representa uma redução de 99,9% dos micro-organismos. Os principais valores para esse parâmetro e os seus correspondentes em percentual são

mostrados na Tabela 1. No entanto, esses valores são apenas os mais representativos, pois em análises microbiológicas, a redução de log encontrada pode também assumir valores não inteiros.

Tabela 1 - Relação entre a redução de log e redução em percentual da carga microbiana.

REDUÇÃO DE LOG	REDUÇÃO EM PERCENTUAL
1 log ₁₀	90%
2 log ₁₀	99%
3 log ₁₀	99,9%
4 log ₁₀	99,99%
5 log ₁₀	99,999%

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Em outras palavras, uma redução de n log significa que a quantidade de micro-organismos foi reduzida por um fator de 10^{-n} . Por exemplo, se após a desinfecção de uma superfície foi verificado uma redução de 4 log, onde havia inicialmente 10^6 micro-organismos, então, pode-se afirmar que a redução em percentual foi de 99,99% e deixou apenas 10^2 micro-organismos na superfície.

Portanto, enquanto o parâmetro UFC representa melhor o valor absoluto da quantidade de micro-organismos presente em uma amostra, a redução de log representa melhor o valor relativo de micro-organismos eliminados após uma desinfecção.

2.2 Radiação UVC para desinfecção de ambientes

Nesta seção, será apresentado um breve histórico sobre o uso da radiação UVC para desinfecção de superfícies e do ar ambiente. Em seguida, os trabalhos que representam o estado da arte na desinfecção de ambientes por radiação UVC, bem como aqueles que foram desenvolvidos no contexto da pandemia de COVID-19 serão discutidos.

2.2.1 Um breve histórico

O efeito da radiação UV sobre os micro-organismos tem sido estudado há mais de cem anos. Os primeiros trabalhos que mencionam a ação germicida da radiação UV começaram a ser publicados em 1877 por Downes e Blunt [15]. Nesse trabalho os autores relataram que as bactérias eram inativadas pela radiação solar e que o espectro azul-violeta era o mais efetivo.

Alguns anos depois em 1885, Arloing e Duclaux demonstraram que a radiação solar também tinha efeito sobre os micro-organismos *Bacillus anthracis* e *Tyrothrix scaber*, respectivamente [16]. O resultado obtido por Arloing pode ser considerado importante, pois a bactéria *Bacillus anthracis* pode causar uma doença infecciosa grave, chamada de Antraz, em seres humanos e animais.

Um fato interessante a ser observado é que embora os primeiros estudos com micro-organismos começaram a ser desenvolvidos em 1877 e eram realizados com a radiação emitida pelo sol, a primeira lâmpada UV já tinha sido inventada em 1835. Nesse ano, Wheatstone inventou a primeira lâmpada de vapor de mercúrio, mas era instável e funcionava apenas por um curto período [17].

As lâmpadas UV começaram a ser aperfeiçoadas a partir de 1850, quando Stokes [17] usou eletrodos de alumínio para produzir um arco elétrico em um tubo de quartzo, onde a radiação UV era emitida em 185 nm.

Em 1889, Widmark [18], [19] publicou dois estudos confirmando que a radiação UV emitida por lâmpadas era responsável por queimaduras na pele. Esse mesmo efeito também foi relatado por Ward [20] em 1892, quando realizava testes com a bactéria *Bacillus anthracis*. Ainda no mesmo ano, Geisler [16] mostrou que a radiação UV emitida tanto pelo sol quanto por uma lâmpada era capaz de eliminar a bactéria *Bacillus typhosus*.

Barnard e Morgan [21] em 1903 foram os primeiros a identificarem que no espectro do UV emitido por lâmpadas, a região próxima ao 250 nm possui elevada ação germicida. Os trabalhos publicados nos anos seguintes mostraram que seria possível estreitar o espectro de emissão das lâmpadas UV. Assim, Ehrismann e Noethling [22] em 1932 conseguiram isolar a emissão da radiação em 253,7 nm. Até os dias atuais, esse é o principal comprimento de onda emitido pelas lâmpadas UV de vapor de mercúrio disponíveis no mercado.

Na década de 1930 surgiram as primeiras aplicações utilizando radiação UV em hospitais [23] - [27]. Essas aplicações foram implementadas visando o controle de infecção

e tinham como principal função a desinfecção do ar ambiente. Mais tarde em 1957, Riley [28] demonstrou como um sistema de desinfecção do ar poderia controlar a disseminação da tuberculose em uma enfermaria hospitalar. A tuberculose é uma doença causada pela bactéria *Mycobacterium tuberculosis* e transmitida pelo ar.

Nos anos da década de 1950, a radiação UV começou a ser usada também na desinfecção de superfícies [29], [30]. No entanto, nesse período as superfícies consideradas são principalmente as paredes internas dos dutos de ar-condicionado e dos sistemas de tratamento de ar. De fato, conforme verificado por Walter, o crescimento bacteriano nas superfícies da evaporadora, presente em sistemas de refrigeração poderia causar problemas de saúde em seres humanos [31].

Entre as décadas de 1950 e 1980, pesquisadores e empresas como a General Electric e a Phillips contribuíram principalmente com a publicação de manuais detalhados e guias de projetos, sobre diversas aplicações envolvendo radiação UV. Os manuais da General Electric descreviam por exemplo, como as lâmpadas UV poderiam ser instaladas no interior de dutos de ar-condicionado [32], [33]. A Phillips publicou um guia de projeto no qual apresentava pela primeira vez, uma descrição das aplicações de suas lâmpadas UV, que poderiam ser usadas para controle do crescimento de micro-organismos [34].

No período entre 1970 e a primeira década dos anos 2000, avanços significativos foram realizados na análise e modelagem de sistemas emissores de radiação UVC para desinfecção. Nicas e Miller em 1999 [35] usaram um modelo matemático para estimar a irradiância de lâmpadas UV, que foram usadas por Riley em um experimento com a *Mycobacterium tuberculosis* em 1976 [36]. Em 2002, Beggs e Sleigh [37] desenvolveram um modelo que fornece uma irradiância média, muito próxima daquela obtida experimentalmente dois anos antes por Miller e Macher [38].

Na última década, os avanços nos projetos e pesquisas em sistemas de desinfecção por radiação UVC foram possíveis principalmente por dois fatores: mais dados disponíveis sobre os componentes do sistema e desenvolvimento de novos modelos matemáticos.

De fato, o projeto dos sistemas depende dos dados fornecidos pelos fabricantes das lâmpadas UVC e de reatores eletrônicos, bem como o uso de modelos matemático da irradiância [9], [16], [39]. Assim, com o desenvolvimento desses fatores ao longo das últimas décadas, os projetistas foram capazes de dimensionar os sistemas de acordo com as características específicas de cada aplicação.

2.2.2 Radiação UVC e a pandemia de COVID-19

A preocupação com a desinfecção das superfícies do ambiente foi intensificada com a pandemia de COVID-19. Como a COVID-19 é uma doença causada por um novo tipo de coronavírus chamado de SARS-CoV-2, diversos estudos foram desenvolvidos durante a pandemia, para verificar se a radiação UVC poderia ser usada para eliminar esse novo vírus [40] - [43], e para a reutilização de máscaras do tipo N95 [41], [44] - [46].

Em 2015 o Centers for Disease Control and Prevention (CDC) publicou um estudo, em que o objetivo foi avaliar os efeitos do uso de radiação UVC na desinfecção de máscaras do tipo N95 [47]. A motivação do estudo foi que em caso de pandemia de uma doença infecciosa respiratória, poderia ser necessário a reutilização de máscaras N95.

Infelizmente, cerca de cinco anos após a publicação do estudo, o cenário desenhado pelo CDC que motivou a realização do estudo, se tornou realidade com a pandemia de COVID-19. De fato, no início da pandemia, onde a produção de máscaras não foi suficiente para atender a demanda, a reutilização de máscaras passou a ser considerada, uma vez que essa prática normalmente não é recomendada.

Os resultados sugerem que é possível utilizar a radiação UVC para desinfetar máscaras do tipo N95. Os ensaios indicaram um pequeno impacto na capacidade de filtragem, e nenhum efeito no fluxo respiratório em doses até 950 J/cm^2 . No entanto, o número de ciclos de desinfecção é limitado e pode variar de acordo com o modelo da máscara. Por causa disso, o CDC ressalta a importância de se realizar testes ao utilizar um modelo em particular de máscara.

Diante da baixa disponibilidade de máscaras N95 e demais equipamentos de proteção individual (EPI), provocada pela pandemia de COVID-19, um grupo de trabalho da Universidade de Nebraska, nos Estados Unidos, desenvolveu e implementou um protocolo de desinfecção por radiação UVC de máscaras N95 para reutilização [44].

O protocolo desenvolvido considerou estudos anteriores que relatam os efeitos da radiação UVC em coronavírus presentes em superfícies, como por exemplo, o estudo apresentado em [48]. A literatura mostra que doses de radiação entre 2 e 5 mJ/cm^2 são suficientes para inativar os coronavírus conhecidos até o início da pesquisa.

A desinfecção das máscaras é realizada em uma sala fechada do centro médico da universidade. Na sala, as máscaras são fixadas em cordas localizadas entre dois conjuntos de lâmpadas UVC, de modo que cada conjunto emita radiação em um lado da máscara. A

duração da desinfecção é de aproximadamente 15 minutos. A dose de radiação UVC recebida em cada lado da máscara é cerca de 360 mJ/cm².

Além disso, o protocolo estabelece que as máscaras após passarem pela desinfecção seja reutilizada sempre pela mesma pessoa. Por isso, o nome do profissional é marcado na sua máscara, bem como o número de vezes em que foi descontaminada e a data da sua primeira utilização.

A pandemia de COVID-19 incentivou o desenvolvimento de diversas pesquisas com o objetivo de apresentar soluções para combater a transmissão do SARS-CoV-2 usando a radiação UVC. Essas pesquisas estão relacionadas principalmente com a desinfecção de superfícies e do ar ambiente. Na próxima seção serão apresentadas as pesquisas que fazem parte do estado da arte, incluindo as pesquisas que foram desenvolvidas no contexto da pandemia.

2.2.3 Estado da Arte

A radiação UVC pode ser usada na desinfecção de água, ar e superfícies. Para a desinfecção de água, há trabalhos na literatura que relatam estudos sobre aplicação da radiação UVC em piscinas [49] - [52] e aquários [53] - [56], bem como no tratamento de esgoto [57] - [59] e de águas pluviais [60] - [62]. Para a desinfecção do ar, os trabalhos são principalmente sobre sistemas em dutos de ar condicionado [63] - [65], desinfecção do ar superior de um ambiente fechado [66] - [68] e recirculadores de ar [14], [69], [70].

Corrêa *et al.* [14] desenvolveram e testaram como prova de conceito, um dispositivo portátil de desinfecção do ar por radiação UVC. Os autores usaram um tubo produzido em policloreto de vinila (PVC) e um ventilador para construir o dispositivo. A bactéria *E. coli* foi usada nos testes. Os resultados mostraram uma redução de 99,9% na contaminação do ar em um dos ambientes testados.

Capetillo *et al.* [63] sugerem que a radiação UVC é uma forma energeticamente eficiente de garantir o fornecimento de ar limpo em um ambiente. Mas para isso, o projeto dos sistemas precisa maximizar o desempenho da desinfecção e, ao mesmo tempo, reduzir o consumo de energia. Nesse sentido, o estudo utilizou análise de dinâmica dos fluidos computacional, para avaliar como a posição de uma lâmpada UVC em um duto influencia o desempenho da desinfecção.

Os autores concluíram que se as lâmpadas UVC forem dispostas de modo a produzir um campo de irradiância uniforme no interior do duto, essa configuração pode fornecer uma desinfecção mais eficiente energeticamente. Além disso, os resultados sugerem que se as lâmpadas UVC forem instaladas ao longo do comprimento do duto, a desinfecção será maior do que se as lâmpadas estiverem na transversal.

Para a desinfecção de superfícies, os trabalhos disponíveis na literatura estão relacionados principalmente à desinfecção de serpentina de ar condicionado [71] - [74] superfícies de alimentos [75] - [78], e de pequenos objetos [79] - [85], bem como a desinfecção de ambientes [8], [86] - [114].

A superfície das serpentinas de resfriamento, localizadas no interior de dutos de ar condicionado, são locais ideais para o crescimento de micro-organismos, por causa da umidade e do acúmulo de partículas transportadas pelo ar. Além de contaminar o ar ambiente, a presença dos micro-organismos na serpentina prejudica a troca de calor e aumenta a resistência do fluxo de ar no interior do duto.

Dessa forma, o crescimento de micro-organismos na serpentina pode aumentar o consumo de energia elétrica dos ventiladores e do sistema de refrigeração. É interessante observar que a desinfecção da superfície da serpentina pode contribuir para a desinfecção do ar ambiente.

Nesse contexto, Wang *et al.* [71] investigaram o potencial da radiação UVC de manter o bom desempenho da serpentina na troca de calor e na economia do sistema de refrigeração. A investigação foi realizada em um teste de campo, com um equipamento comercialmente disponível para ser instalado em uma serpentina de ar-condicionado. O teste teve duração de 14 meses, sendo quatro meses antes da instalação do dispositivo e dez meses após a instalação.

O potencial da radiação UVC foi avaliado através de uma comparação entre antes e depois da instalação do equipamento. Os resultados mostraram que a condutância térmica da serpentina aumentou em 10% e a queda de pressão no fluxo de ar diminuiu em 13%. Além disso, o consumo de energia dos ventiladores reduziu em 9% durante os dez meses de operação do dispositivo.

Apesar do equipamento também consumir energia, a redução do consumo dos ventiladores foi 39% maior do que a energia consumida pelo equipamento de desinfecção. Isso demonstra uma economia real com a implementação da radiação UVC na serpentina.

A desinfecção de pequenos objetos normalmente é relatada na literatura sendo realizada através de cabines ou câmaras UVC [79], [81], [82], [84]. A desinfecção desses objetos também pode ser feita através de equipamentos leves e portáteis, que geralmente possuem um formato similar a um bastão, como os descritos em [83], [85]. O desenvolvimento dessas pesquisas foram motivadas principalmente pela pandemia de COVID-19.

As pesquisas sobre desinfecção de ambientes relatam principalmente testes de validação de equipamentos emissores de radiação UVC. Nesses testes os equipamentos são avaliados quanto a eficácia de realizar a desinfecção das superfícies do ambiente.

Enquanto alguns testes foram realizados em ambientes reais [7], [8], [86] - [92] como em hospitais por exemplo, outros foram realizados em ambientes controlados [93] - [98] como um laboratório.

Em alguns desses estudos, além do teste de validação do equipamento, também é relatado redução dos casos de infecção hospitalar, após adoção do equipamento na rotina do EAS. É interessante observar que na maioria dos estudos citados foram utilizados equipamentos comercialmente disponíveis.

Kitagawa *et al.* [7] investigaram o impacto na taxa de infecção da bactéria *Staphylococcus aureus* resistente à meticilina (MRSA) de um hospital, quando a desinfecção por radiação UVC foi adicionada ao protocolo de limpeza manual. O equipamento que utiliza lâmpada de xênon pulsada foi usado em 86% dos quartos de paciente disponíveis no hospital. A desinfecção foi realizada durante a limpeza terminal, ou seja, após o paciente ter recebido alta médica ou ter sido transferido.

Os autores verificaram que a taxa de infecção de MRSA diminuiu de 3,56 por 1.000 pacientes-dia, para 2,21 por 1.000 pacientes-dia, o que corresponde uma redução de 38%. Além disso, os autores observaram que o uso da radiação UVC diminuiu significativamente, o risco de infecção por MRSA em 55,6%. O estudo concluiu que adicionar desinfecção por radiação UVC ao processo de limpeza terminal feita manualmente, pode reduzir a taxa de infecção de MRSA.

Assim como em [7], a pesquisa apresentada em [92] também avaliou os efeitos ao incluir a desinfecção por radiação UVC, nos procedimentos tradicionais de limpeza. Mas nesta última pesquisa foi utilizado um outro equipamento com lâmpada de mercúrio de baixa pressão. Além disso, os autores consideraram a taxa de infecção pela bactéria *Clostridium difficile* em pacientes que passaram por transplantes de medula óssea. Os resultados da

pesquisa indicaram que a taxa de infecção reduziu de 13,0 para 7,0 por 1.000 pacientes-dia, o que representa uma redução de 46,1%.

Com a pandemia de COVID-19, surgiram na literatura diversos trabalhos sobre desenvolvimento de equipamentos para desinfecção de ambientes. Esses trabalhos em sua maioria descrevem projetos e protótipos de equipamentos controlados remotamente [99] - [101], e autônomos [102] - [108].

Os equipamentos controlados remotamente foram desenvolvidos no contexto da pandemia como forma de possibilitar uma desinfecção segura de um ambiente contaminado. Assim, o profissional da saúde ou operador do equipamento pode realizar a desinfecção do ambiente à distância e a partir de um local seguro.

Entretanto, a operação desse tipo de equipamento pode ser considerada mais complexa, quando comparada com outros tipos de equipamentos ou métodos mais tradicionais de desinfecção, como a química por exemplo. Dessa forma, a complexidade de operar um equipamento controlado remotamente, exige mão de obra mais qualificada. Isso pode na prática, inviabilizar a implementação desse tipo de equipamento em alguns locais.

Os equipamentos autônomos são dispositivos projetados para realizar a desinfecção à medida que se movimentam em um ambiente ou hospital, sendo supervisionados minimamente por seres humanos. Por causa da sua movimentação, esses equipamentos são alimentados por bateria e por isso precisam ser periodicamente recarregadas. O desenvolvimento dos equipamentos autônomos relatados na literatura também foi motivado por questões de segurança dos profissionais da saúde durante a pandemia.

No entanto, apesar das diversas pesquisas que têm sido desenvolvidas sobre equipamentos autônomos para desinfecção, essa tecnologia ainda pode ser considerada muito incipiente para ser implementada em um hospital, por exemplo.

Astrid *et al.* [89] investigaram a usabilidade e efetividade de um equipamento autônomo em um hospital universitário. Após definir os parâmetros distância da superfície e tempo de exposição, o equipamento foi liberado para se movimentar de forma autônoma em dois ambulatórios do hospital, após a limpeza e desinfecção de rotina.

Os resultados mostraram que o equipamento conseguiu reduzir significativamente a carga microbiana das superfícies após a limpeza e desinfecção manual. Quanto à usabilidade, os autores concluíram que o equipamento testado, apesar de comercialmente disponível, ainda não está pronto para ser usado diariamente em hospitais.

Essa conclusão foi obtida após observarem falhas técnicas e dificuldades de uso. Nos testes foi observado ainda a necessidade de intervenção do operador durante a desinfecção, por conta de paradas causadas por movimentação imprevista de itens ou de pessoas. Além disso, pode ser preocupante deixar um equipamento caro e delicado circular livremente em algumas áreas do hospital.

Por outro lado, equipamentos portáteis que são movidos pelo operador para o interior do ambiente e que realizam a desinfecção de forma estática têm sido amplamente estudados e utilizados [8], [41], [86], [87], [90], [93] - [95], [98], [109] - [114]. Por isso, apesar da sua simplicidade, atualmente esse é o principal tipo de equipamento utilizado para desinfecção de ambientes por radiação UVC.

Yang *et al.* [90] testaram a efetividade de um equipamento em reduzir micro-organismos presentes em um quarto hospitalar. Após um paciente com a bactéria MRSA ter recebido alta médica, o equipamento de desinfecção por UVC foi colocado no quarto. Em seguida, amostras foram coletadas antes e após a aplicação da radiação UVC.

Os resultados mostraram redução não apenas da MRSA, mas também de outras bactérias e do fungo *Aspergillus fumigatus* (A. Fumigatus). Após 15 minutos de desinfecção, não foi encontrado a presença da MRSA em amostras localizadas em até 2 metros do equipamento. A redução do fungo A. Fumigatus também foi significativa, reduzindo de $3,0 \times 10^6$ para apenas 2.200 UFC, ou seja, uma redução de 3 log.

A efetividade de um equipamento com três emissores independentes de radiação UVC foi relatada em [93]. Um equipamento com múltiplas fontes emissoras de radiação é uma invenção protegida por patente [115]. Essa característica permite minimizar as áreas de sombras, uma vez que a radiação UVC não atravessa obstáculos, tendo um comportamento similar a luz visível.

O teste do equipamento foi realizado com três vírus: o MERS-CoV, o MHV-A59, e o vírus da hepatite do camundongo. Amostras desses vírus em placa de Petri foram colocadas a 1,22 metros de distância do equipamento.

O resultado do teste indicou que após 10 minutos de desinfecção, todos os vírus considerados foram 99,999% eliminados. Apesar do resultado, os autores afirmaram que o equipamento não deve substituir as boas práticas de limpeza, mas deve ser usado como um complemento da limpeza terminal padrão.

Outro equipamento para desinfecção de ambiente por radiação UVC foi avaliado, e os seus resultados foram divulgados em um relatório de estudo [98], produzido por um

laboratório de análise de microbiológica. O estudo avaliou a efetividade do equipamento usando a bactéria *Listeria monocytogenes*. A amostra contendo a bactéria estava localizada a 5 metros do equipamento, e recebeu radiação UVC por 30 minutos. Os resultados mostraram uma redução de 5,61 \log_{10} .

2.2.4 Principais equipamentos emissores

Os equipamentos para desinfecção de ambientes mencionados no final da seção anterior, também estão comercialmente disponíveis. Por isso, eles serão considerados neste trabalho como sendo os principais equipamentos emissores de radiação UVC.

Esses equipamentos foram considerados os principais porque possuem comprovação científica e estão disponíveis no mercado atualmente. A comprovação desses equipamentos foi verificada através de artigos científicos publicados em revistas ou de relatórios de estudo produzidos por laboratório de análises microbiológicas.

Nesses artigos e relatórios foram demonstrados que esses equipamentos podem reduzir a quantidade de micro-organismos nas superfícies do ambiente. Além disso, alguns equipamentos também demonstraram que podem reduzir os casos de infecção hospitalar em um EAS.

Por conta da pandemia de COVID-19, muitos outros equipamentos para desinfecção de ambientes por radiação UVC podem ser encontrados no mercado. No entanto, eles não possuem comprovação científica como os principais equipamentos.

Todos os principais equipamentos realizam a desinfecção de forma estática e são alimentados por tomadas elétricas disponíveis no ambiente. Esses equipamentos estão apresentados de forma comparativa na Tabela 2. Os dados, incluindo potência e corrente elétrica, indicados na Tabela 2 foram obtidos a partir da referência de cada equipamento e de seu respectivo fabricante.

Conforme pode ser observado na Tabela 2, a potência elétrica dos equipamentos varia entre 1.500 e 2.400 W. A corrente elétrica indicada na Tabela 2 é a corrente máxima recomendada pelo fabricante, que a tomada deve suportar para que o equipamento possa ser ligado com segurança. Por causa da elevada potência dos principais equipamentos, caso fossem utilizados no Brasil, eles apenas poderiam ser conectados em 127 V, se a tomada suportar uma corrente de até 20 A. Caso sejam conectados em 220 V, a tomada deverá suportar uma corrente de até 10 A.

Tabela 2 - Comparação entre os principais equipamentos.

Equipamento					
Referência	[90]	[7]	[92]	[93]	[97] / [98]
Potência elétrica	2.200 W	820 W	2.400 W	1.500 W	1.920 W / 2.340 W
Tensão elétrica	220-240 Vac	100-240 Vac	120-240 Vac	120-240 Vac	120 Vac / 120-240 Vac
Corrente máxima da tomada	10 A	15-10 A	20-10 A	10 A	15 A / 20-10 A
Tipo de lâmpada	Mercúrio de baixa pressão	Xênon pulsada	Mercúrio de baixa pressão	Mercúrio de baixa pressão	Mercúrio de baixa pressão
Nome comercial	Hyper Light P3	Xenex	Tru-D	Helios	M15 / M20
Fabricante	Mediland	Xenex Disinfection Services	PDI	Surfacide	UVC Cleaning Systems

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

No Brasil, a norma NBR 14136 determina e fixa as dimensões de apenas dois modelos de plugues e tomadas [116]. Um modelo para correntes até 10 A e outro para 20 A, para conexões com tensões nominais compreendidas entre 100 V e 250 V em corrente alternada.

A norma NBR 5410 estabelece as condições que devem satisfazer as instalações elétricas de baixa tensão (até 1.000 V em corrente alternada), visando principalmente a segurança das pessoas [117]. De modo geral, essa norma é aplicada em edificações do tipo residencial, comercial, pública, dentre outros tipos.

Em complemento a NBR 5410, a norma NBR 13534 estabelece os requisitos específicos para instalações elétricas em EAS, visando garantir a segurança dos pacientes e dos profissionais de saúde [118]. Assim, em edificações como os EAS, onde os equipamentos de desinfecção poderão ser usados com o objetivo de prevenir infecções hospitalares, a norma NBR 13534 também precisa ser considerada.

Com relação as tomadas em um EAS, a NBR 13534 apresenta no item 6.5.3.102 a seguinte recomendação: “Recomenda-se que os circuitos de tomadas de corrente sejam todos de uma mesma tensão, para garantir que todo equipamento, sobretudo nas emergências, possa ser usado o mais rapidamente possível, livre de embaraços.” [118]. Dessa forma, entende-se que a NBR 13534 não determina, mas recomenda que todas as tomadas de um EAS tenham o mesmo nível de tensão.

Portanto, com base nessa recomendação, não é possível garantir que em qualquer ambiente de um EAS, tenha sempre disponível uma tomada de 220 V, que é a tomada mais compatível com o nível de potência dos principais equipamentos. Essa situação pode dificultar a utilização dos principais equipamentos nos EAS do Brasil.

Em um contexto de pandemia, como a da COVID-19, pode ser particularmente interessante o uso dos principais equipamentos também em ambientes de outras edificações, além dos EAS. Por exemplo, locais de habitação temporários ou fixos, como hotéis (com alta rotatividade de hóspedes) ou casas de repouso (com pessoas vulneráveis e potencialmente do grupo de risco).

Nesses locais a norma NBR 5410 também deve ser aplicada e estabelece no item 9.5.3.1 o seguinte sobre tomadas: “Todo ponto de utilização previsto para alimentar, de modo exclusivo ou virtualmente dedicado, equipamento com corrente nominal superior a 10 A deve constituir um circuito independente”.

Na prática, por causa dessa determinação da NBR 5410, nos locais de habitação as tomadas de 20 A são instaladas nos ambientes somente quando houver a previsão de alimentar um equipamento com corrente nominal superior a 10 A. Caso contrário, todas as tomadas daquele ambiente serão de 10 A.

Nesse caso, se o ambiente não tiver tomadas de 220 V, então o equipamento para desinfecção não poderá ser utilizado, por causa do limite de potência da tomada de 127 V. Assim como nos EAS, essa situação também pode dificultar a utilização dos principais equipamentos nos locais de habitação citados, por conta da elevada potência desses equipamentos.

As dificuldades mencionadas em utilizar os principais equipamentos em EAS e nos locais de habitação, como hotéis e casas de repouso, são ainda mais relevantes se ocorrem durante uma pandemia de uma doença infecciosa, como a COVID-19, por exemplo. Pois, são equipamentos que foram comprovados cientificamente, que podem reduzir a quantidade de micro-organismos patogênicos do ambiente e reduzir os casos de infecção hospitalar.

Como visto anteriormente, a pandemia de COVID-19 motivou o desenvolvimento de diversas pesquisas sobre desinfecção por radiação UVC. Além das linhas de pesquisas apresentadas, também é possível encontrar na literatura trabalhos sobre LEDs UVC [119] - [123].

Entretanto, a eficiência energética dos LEDs UVC disponíveis atualmente no mercado é baixa: cerca de apenas 5% [124] - [126]. Por isso, os LEDs UVC ainda não são uma alternativa mais eficiente do que as lâmpadas utilizadas nos principais equipamentos, que possuem eficiência de aproximadamente 35% [127] - [129].

2.2.5 Processo para desinfecção de ambientes usando equipamentos emissores de radiação UVC

Para avaliar como é possível tornar o processo de desinfecção de ambientes por radiação UVC mais eficiente energeticamente, é interessante observar como esse processo é realizado atualmente. Antes de um equipamento emissor de radiação UVC ser utilizado para realizar a desinfecção, é necessário executar uma limpeza no ambiente.

Na etapa de limpeza, as sujeiras visíveis como por exemplo poeira, embalagens plásticas ou gotas de sangue são removidas das superfícies e do chão. A importância da limpeza está no fato de que as sujeiras formam uma barreira impedindo que os micro-organismos sejam expostos à radiação UVC.

Após a limpeza do ambiente, o operador que é o profissional responsável pelo processo pode iniciar a desinfecção, movendo o equipamento para o interior do ambiente. Em seguida, o operador configura o tempo de desinfecção de acordo com as dimensões do ambiente. Essa configuração pode ser feita em um painel disponível no próprio equipamento ou por controle remoto. Em alguns modelos, o equipamento possui sensores que permite calcular o tempo de desinfecção automaticamente.

Por segurança, antes das lâmpadas UVC serem acionadas, o operador deve se retirar e fechar as portas do ambiente, para garantir que nenhuma pessoa seja exposta à radiação

UVC. A desinfecção é de fato iniciada quando as lâmpadas UVC são ligadas e então, as superfícies são expostas à radiação UVC.

A duração da desinfecção é o tempo configurado pelo operador no início do processo. Após esse período, as lâmpadas UVC são desligadas concluindo o processo de desinfecção. Assim, o ambiente pode voltar a ser usado normalmente. Se durante a desinfecção houver movimentação no interior do ambiente, sensores de movimento instalados no equipamento interrompem o processo.

Em geral, os equipamentos para desinfecção de ambientes por radiação UVC são construídos e operados de modo muito similar. Conforme ilustra as imagens da Tabela 2, os equipamentos são construídos a partir de uma plataforma móvel, onde lâmpadas UVC em formato geralmente tubular são instaladas. Por causa do aspecto visual desses equipamentos, eles também são chamados de robôs de desinfecção UVC.

Após observar como os principais equipamentos emissores de radiação UVC são usados para realizar a desinfecção de um ambiente, foi possível identificar que duas abordagens podem ser utilizadas durante esse processo. Neste trabalho as abordagens serão chamadas de centralizada e distribuída, as quais serão apresentadas a seguir.

2.2.5.1 Abordagem centralizada

Na abordagem centralizada, a desinfecção é realizada em um único ciclo, ou seja, um equipamento composto por um emissor de radiação UVC é posicionado apenas uma vez no ambiente. A posição do emissor é definida pelo operador de modo a alcançar as regiões de interesse, que geralmente são as superfícies de alto toque, como maçanetas, interruptores e as laterais da cama, por exemplo. Essas superfícies são frequentemente tocadas e por isso possuem grande potencial de contaminação. Por esse motivo, as superfícies de alto toque costumam ser as superfícies de interesse na desinfecção do ambiente.

A Figura 4 ilustra como a desinfecção de um ambiente é realizada através da abordagem centralizada. Nessa abordagem, o equipamento pode ser posicionado no centro do ambiente, por exemplo. Como radiação UVC possui comportamento similar à luz visível, não sendo capaz de contornar obstáculos, algumas regiões terão incidência direta da radiação e em outras, serão formadas regiões de sombra.

Entretanto, as regiões de sombra podem ser alcançadas indiretamente por reflexão das demais superfícies do ambiente. Mas apesar disso, as regiões com incidência direta da radiação UVC serão desinfectadas muito mais facilmente do que as regiões de sombra.

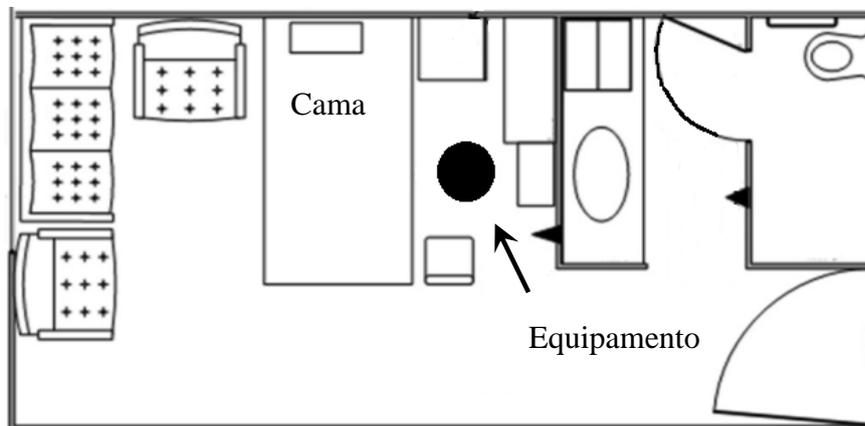


Figura 4 - Vista superior da desinfecção do ambiente - abordagem centralizada.

Fonte: adaptado de J.-H. Yang *et al.* [90].

A capacidade de um equipamento de realizar a desinfecção do ambiente está relacionada, com a aplicação da dose necessária para eliminar os micro-organismos que estão nas superfícies de interesse. Em outras palavras, a eliminação dos micro-organismos do ambiente, depende diretamente da dose de radiação UVC aplicada pelo equipamento nas superfícies.

De acordo com a equação (4) vista no capítulo anterior, a dose pode ser calculada pelo produto da irradiância com o tempo de duração da desinfecção. Dessa forma, a dose aplicada em um ponto sobre uma superfície ou em qualquer outra região do ambiente, será o produto da irradiância naquele ponto pelo tempo de duração da desinfecção em segundos.

Entretanto, a radiação UVC segue um comportamento aproximado com a lei do inverso do quadrado da distância. Assim, a energia UVC ou a irradiância decaem aproximadamente com o quadrado da distância à medida que se afasta da fonte emissora (lâmpada UVC). Como exemplo, a Figura 5 ilustra o comportamento da irradiância com a distância em relação a fonte emissora. A curva mostrada nessa figura é referente a uma lâmpada UVC tubular T8, de 25 W e 45 cm de comprimento.

Conforme pode ser observado na curva da Figura 5, o valor da irradiância decai muito rapidamente a medida em que se afasta da fonte emissora. Portanto, quanto maior a distância entre a fonte e o ponto de interesse, em que se deseja realizar a desinfecção, menor será a dose fornecida nesse ponto.

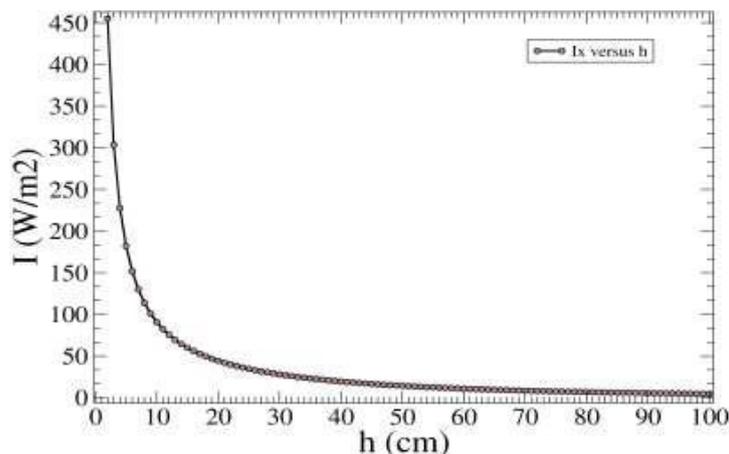


Figura 5 - Relação entre a irradiância e a distância.

Fonte: Rocha *et al.* [85].

Como a irradiância varia de acordo com a distância em relação à fonte, as dimensões do ambiente precisam ser consideradas no cálculo do tempo de desinfecção, a fim de garantir que a dose necessária para eliminar os micro-organismos seja aplicada até mesmo nos pontos mais distantes do ambiente.

O valor reduzido da irradiância nos pontos mais distantes do ambiente em relação a fonte emissora e até mesmo nas regiões de sombra, é um dos motivos pelos quais, a potência dos principais equipamentos precisa ser tão elevada. Na abordagem centralizada, os equipamentos são projetados para garantir que os pontos mais distantes do ambiente recebam a dose de radiação UVC necessária, para eliminar os micro-organismos de acordo com a taxa de desinfecção desejada.

Como nos pontos mais distantes a irradiância é reduzida, então os equipamentos precisam emitir mais radiação UVC, para compensar a forte atenuação da irradiância com a distância. Essa compensação por sua vez implica em um maior consumo de energia elétrica do equipamento.

2.2.5.2 Abordagem distribuída

Na abordagem distribuída, a desinfecção do ambiente é realizada em vários ciclos de desinfecção com um único equipamento emissor ou em um único ciclo com vários equipamentos emissores. A Figura 6 ilustra a implementação da abordagem distribuída em um ambiente que será realizada a desinfecção.

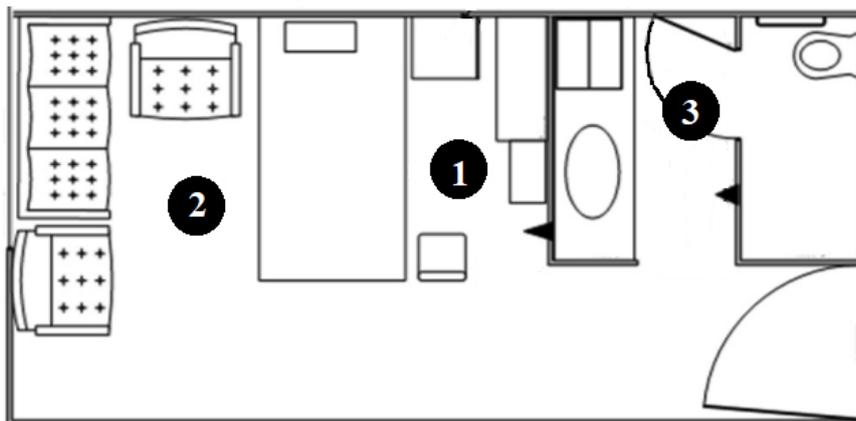


Figura 6 - Vista superior da desinfecção do ambiente - abordagem distribuída.

Fonte: adaptado de J.-H. Yang *et al.* [90].

As posições indicadas na Figura 6 podem ser entendidas como sendo o equipamento posicionado em três pontos e em momentos diferentes, ou como sendo um equipamento com três emissores independentes operando simultaneamente. Pois, ambas possibilidades são formas de implementação da abordagem distribuída.

Uma das principais vantagens da abordagem distribuída em relação à centralizada, é a maior flexibilidade para posicionar o equipamento o mais próximo possível dos pontos de interesse no ambiente. Por outro lado, na abordagem centralizada quando o equipamento se aproxima de um dos pontos de interesse, ele ao mesmo tempo se afasta de outro ponto de interesse do ambiente. Esse fato pode contribuir para que a abordagem centralizada seja menos eficiente energeticamente do que a abordagem distribuída, conforme será avaliado mais adiante neste trabalho.

Portanto, a abordagem distribuída consiste essencialmente em garantir que os pontos de interesse estejam o mais próximo possível das lâmpadas UVC. A hipótese de que essa aproximação pode tornar o processo de desinfecção mais eficiente energeticamente está baseada no fato de que a irradiância é mais intensa nas proximidades das lâmpadas UVC, conforme visto na Figura 5.

Por isso, a proposta da abordagem distribuída é utilizar múltiplos emissores para realizar a desinfecção em um único ciclo de desinfecção ou um único equipamento em vários ciclos de desinfecção. Assim, a abordagem distribuída pode permitir otimizar a irradiância nas superfícies em relação a potência elétrica do equipamento.

A Figura 7 mostra como a irradiância aumenta à medida em que o ponto de interesse se aproxima da fonte emissora a partir da distância D_1 para a distância D_2 , por exemplo.

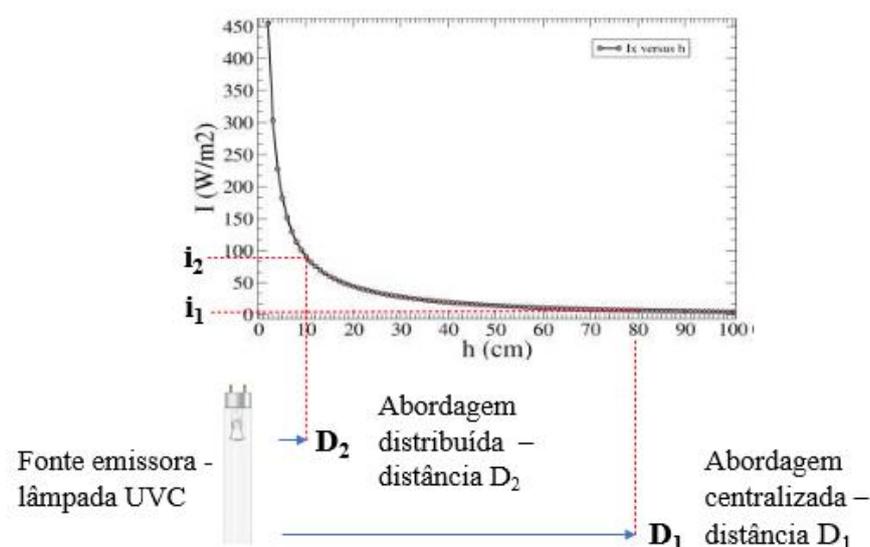


Figura 7 - Diferença da irradiância entre a abordagem centralizada e a distribuída.

Fonte: adaptado de Rocha *et al.* [85].

Assim, quando o ponto de interesse é movido para mais próximo da fonte, a irradiância recebida no ponto aumenta. Nesse cenário, pelo menos duas situações podem acontecer em seguida: na primeira, o tempo de desinfecção poderá ser reduzido, mas sem alterar o valor da dose recebida, de modo que o produto irradiância e tempo permaneça constante. Na segunda, a potência da lâmpada UVC poderá ser reduzida, trocando-a por uma outra lâmpada de potência menor, mas também sem alterar a dose recebida. Assim nessa segunda situação, a irradiância e o tempo de desinfecção permanecem aproximadamente constantes. De qualquer forma, em ambas as situações o consumo de energia será reduzido.

Portanto, a análise qualitativa realizada nesta seção sobre o consumo de energia elétrica da abordagem distribuída, parece indicar que essa abordagem é mais eficiente energeticamente do que a abordagem centralizada. Dessa forma, a abordagem distribuída pode ser uma alternativa para tornar o processo de desinfecção de ambientes por radiação UVC mais eficiente energeticamente e, com isso, viabilizar o uso de equipamentos com comprovação científica para esse processo no Brasil, sobretudo, em períodos de pandemia de uma doenças infecciosa.

Entretanto, não há na literatura trabalhos avaliando ou comparando a eficiência energética de ambas as abordagens. Nesse sentido, este trabalho visa verificar, através de simulações e modelos matemáticos, a eficiência energética da abordagem distribuída em relação à abordagem centralizada.

O uso de múltiplos emissores para desinfecção de ambientes por radiação UVC não é uma novidade. Inclusive, a patente [115] apresenta o uso de múltiplos emissores como uma solução para reduzir as regiões de sombra durante a desinfecção do ambiente. Entretanto, ainda não há literatura patentes apresentando uma relação entre o uso de múltiplos emissores e o consumo de energia elétrica do processo de desinfecção.

Capítulo 3 - Material e Métodos

Neste capítulo serão apresentados os meios utilizados para verificar se a abordagem distribuída é mais eficiente energeticamente do que a abordagem centralizada. Ou seja, será testado se a abordagem distribuída é capaz de alcançar a mesma taxa de desinfecção nos pontos de interesse do ambiente que a abordagem centralizada, porém consumindo menos energia.

Esse teste será realizado em um ambiente de controle simulado, onde após aplicação de ambas as abordagens, o consumo de energia elétrica de cada abordagem será comparado. Nesse processo, foram considerados alguns micro-organismos e valores de taxa de desinfecção. Foram considerados também diferentes níveis de potência elétrica do equipamento de desinfecção. Esses níveis de potência permitiram avaliar a eficiência energética das duas formas de implementar a abordagem distribuída, que serão descritas mais adiante na seção 3.3 deste capítulo.

A avaliação da eficiência energética da abordagem distribuída foi realizada a partir de simulações e de modelos matemáticos. Nessa avaliação, a potência e o consumo de energia de elétrica da abordagem centralizada foram usados como base de comparação. Além disso, para realizar as simulações foi necessário também desenvolver um modelo matemático para o equipamento de desinfecção. Esse modelo considera, entre outros parâmetros, a quantidade de lâmpadas instaladas no equipamento. Essa quantidade está diretamente relacionada com a potência total do equipamento.

3.1 Simulação: abordagem centralizada – Caso base

A simulação foi realizada considerando um ambiente de controle com 50 m² de área e com os lados iguais, medindo aproximadamente sete metros de comprimento. Nesse ambiente, a distância entre o centro e os cantos é de cinco metros. Essa será a maior distância entre o equipamento e os pontos de interesse considerados na simulação. Na Figura 8 é mostrado a vista superior do ambiente de controle simulado.

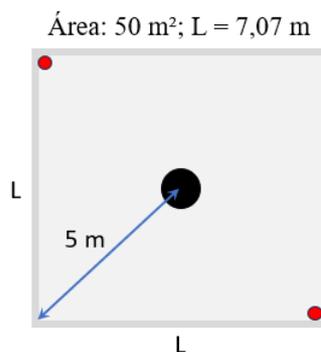


Figura 8 - Simulação: abordagem centralizada – Caso base.

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Durante a simulação, não foi necessário considerar um ambiente com obstáculos. Pois quando a desinfecção do ambiente é realizada através da abordagem centralizada, geralmente o equipamento é posicionado de forma aproximadamente equidistante das superfícies que serão desinfectadas. O posicionamento do equipamento considera também eventuais obstáculos presentes no ambiente, que quando possível, são removidos do espaço entre o equipamento e as superfícies a serem desinfectadas.

Para avaliar a eficiência energética da abordagem distribuída em relação a abordagem centralizada, serão comparados a potência e o consumo de energia elétrica de ambas as abordagens, ao eliminarem o mesmo percentual de micro-organismos das superfícies do ambiente de controle. Os micro-organismos e as taxas de desinfecção foram escolhidos de acordo com os valores de dose de radiação UVC disponíveis na literatura.

A simulação foi iniciada estabelecendo-se um caso base, onde a desinfecção do ambiente de controle foi realizada através da abordagem centralizada. Esse caso servirá como base de comparação para a potência e o consumo de energia elétrica das abordagens. O equipamento utilizado na abordagem centralizada será o de maior potência entre aqueles considerados na simulação.

Como mencionado anteriormente, na abordagem centralizada o equipamento é colocado em um ponto aproximadamente equidistante das superfícies que serão desinfectadas. Portanto, no caso base esse ponto corresponde ao centro do ambiente de controle. Assim, o círculo preto indicado na Figura 8 representa o equipamento posicionado no centro do ambiente. Foram escolhidos dois pontos de interesse para auxiliar na avaliação da eficiência energética da abordagem distribuída, que estão localizados em cantos opostos do ambiente. Esses pontos estão indicados em vermelho na Figura 8.

Entretanto, para calcular o consumo de energia elétrica do equipamento ao eliminar os micro-organismos situados nos pontos de interesse, é necessário primeiro estimar a irradiância nesses pontos. A partir dessa estimativa, será possível determinar o tempo de desinfecção necessário para alcançar a dose UVC nos pontos de interesse. O tempo de desinfecção é um dos parâmetros que determina o consumo de energia do equipamento. A irradiância no ponto de interesse pode ser estimada a partir de modelos matemáticos.

3.2 Modelagens

A modelagem é outro recurso utilizado na avaliação da eficiência energética da abordagem distribuída. Foram utilizados dois modelos matemáticos nessa avaliação. O primeiro modelo, chamado fator de visão da radiação, tem como objetivo estimar a irradiância produzida por uma lâmpada UVC. O segundo modelo foi desenvolvido neste trabalho. Seu objetivo foi modelar matematicamente um equipamento de desinfecção com uma ou mais lâmpadas UVC instaladas.

3.2.1 Modelo fator de visão da radiação

Diversos modelos disponíveis na literatura podem ser usados para estimar a irradiância produzida por uma lâmpada UVC em um determinado ponto. São exemplos de modelos: a lei do inverso do quadrado [130], a fonte linear [131], o fator de visão da radiação [132], entre outros modelos. A lei do inverso do quadrado, por exemplo, afirma que a irradiância diminui com o inverso do quadrado da distância com a fonte. Embora essa lei seja adequada para projetos de luminotécnica, quando aplicada à radiação UVC, ela apenas apresenta bons resultados para pequenas distâncias, ou seja, de até poucos centímetros da fonte [133].

O modelo fator de visão da radiação tem sido utilizado por apresentar boa correspondência com os dados experimentais, tanto para pequena quanto para grandes distância [79], [85], [134]. Por isso, esse modelo foi adotado neste trabalho. O gráfico da Figura 9 mostra uma comparação da correspondência da lei do inverso do quadrado e do modelo fator de visão da radiação com dados obtidos experimentalmente.

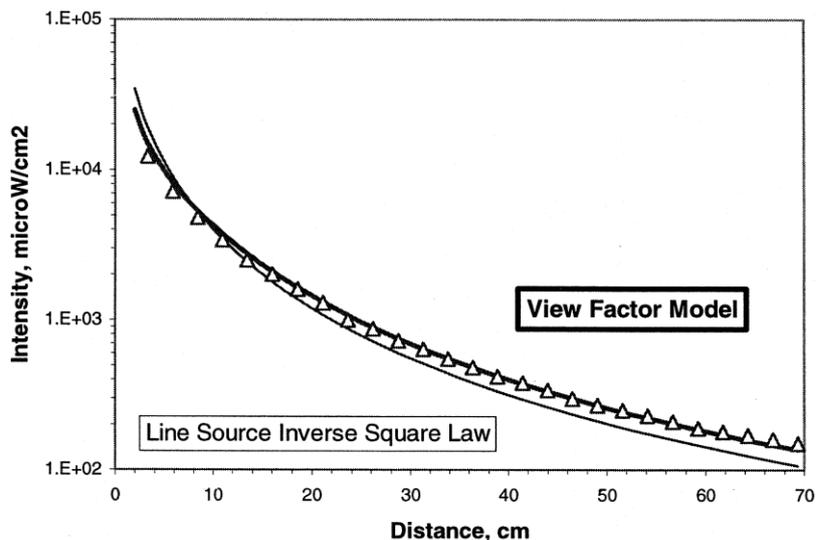


Figura 9 - Comparação entre os modelos e dados experimentais.

Fonte: Kowalski e Bahnfleth [133].

Conforme observado na Figura 9, a linha mais escura (fator de visão da radiação) apresenta melhor correspondência com os dados (triângulos), do que a linha mais fina (lei do inverso do quadrado). Enquanto este último modelo se ajusta melhor aos dados apenas nas distâncias curtas, o fator de visão possui bom ajuste também em outras distâncias.

Na literatura sobre modelagem da transferência de calor por radiação, o fator de visão é um modelo matemático usado para determinar a fração da energia radiativa emitida por uma superfície, e que é absorvida por outra superfície [132]. A Figura 10 ajuda na interpretação desse conceito, onde são mostradas duas superfícies A_1 e A_2 , sendo a primeira emissora e a segunda receptora.

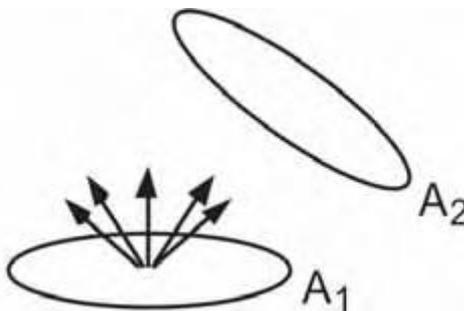


Figura 10 - Representação geométrica simplificada para interpretação do fator de visão da radiação.

Fonte: Santos *et al.* [134].

Na Figura 10, apenas uma fração da energia difusa emitida pela superfície A_1 incide sobre a superfície A_2 . O fator de visão é a fração da energia emitida pela superfície emissora que incide sobre a receptora. Esse fator é definido a partir da relação geométrica entre as duas superfícies. Uma vez que a lâmpada UVC pode ser vista como uma superfície emissora, então o fator de visão da radiação poderá ser usado para determinar a irradiância em uma superfície que será desinfetada.

Além disso, se a superfície emissora possui irradiância constante no tempo e a forma da superfície receptora ainda é desconhecida, então o fator de visão também pode ser usado para determinar a irradiância em um elemento de área diferencial da superfície receptora [133]. Dessa forma, é possível calcular a irradiância em um ponto de interesse de área infinitesimal de uma superfície receptora real ou imaginária, localizada a uma distância da superfície emissora.

O modelo fator de visão da radiação pode ser aplicado para diferentes geometrias e configurações de superfícies emissoras e receptoras. A Figura 11 ilustra uma configuração em particular, com uma superfície emissora tubular ou cilíndrica (como uma lâmpada UVC) e um elemento de área diferencial. Nessa configuração o cilindro finito possui raio r , comprimento l e a distância entre o seu centro e o elemento de área é igual a x .

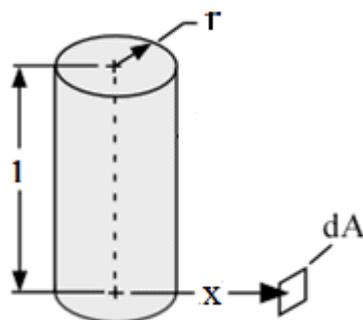


Figura 11 - Configuração superfície cilíndrica e elemento de área diferencial.

Fonte: Adaptado de Lienhard IV e Lienhard V [135].

Como a configuração mostrada na Figura 11 é similar à que será utilizada na desinfecção das superfícies, então as dimensões do cilindro finito podem corresponder as dimensões da lâmpada UVC. Além disso, como indica a Figura 11, o elemento de área dA deve ser perpendicular ao eixo da lâmpada e localizado em uma das suas extremidades. Para essa configuração, o fator de visão da radiação F pode ser calculado com a seguinte equação.

$$F(x, l, r) = \frac{L}{\pi H} \left[\frac{1}{L} ATAN\left(\frac{L}{\sqrt{H^2 - 1}}\right) - ATAN\left(\sqrt{\frac{H-1}{H+1}}\right) + \frac{X-2H}{\sqrt{XY}} ATAN\left(\sqrt{\frac{X(H-1)}{Y(H+1)}}\right) \right] \quad (5)$$

Os parâmetros da equação (5) são definidos de acordo com as equações (6), (7), (8) e (9) a seguir.

$$H = x/r \quad (6)$$

$$L = l/r \quad (7)$$

$$X = (1 + H)^2 + L^2 \quad (8)$$

$$Y = (1 - H)^2 + L^2 \quad (9)$$

Onde as medidas para x , l e r são dadas em centímetros. O fator de visão da radiação é adimensional.

Como a irradiância i_0 na superfície da lâmpada é dada pela relação entre a potência UVC P_{UVC} emitida com a área da sua superfície como mostra a equação (10), então de acordo com o modelo fator de visão da radiação, a irradiância i_x no elemento de área dA pode ser calculada com a equação (11). Onde i_0 e i_x são dadas em W/cm^2 .

$$i_0 = P_{UVC}/2\pi rl \quad (10)$$

$$i_x = i_0 F = (P_{UVC}/2\pi rl)F \quad (11)$$

Portanto, o modelo fator de visão da radiação permite calcular a irradiância de uma lâmpada UVC, em um ponto de interesse a uma distância x do seu centro e a partir de suas características como dimensões e potência UVC emitida.

O modelo de lâmpada UVC escolhida para ser usada na simulação possui 54 W de potência nominal, e seu formato é tubular conforme mostra a Figura 12.



Figura 12 - Modelo de lâmpada UVC tubular usada na simulação.

Fonte: Philips [128].

As principais características da lâmpada UVC escolhida, incluindo suas dimensões e potência UVC emitida, estão listadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Principais características da lâmpada UVC escolhida.

Nome do modelo	TUV 55W HO 1SL/6
Fabricante	Philips
Potência elétrica	54 W
Potência UVC emitida	18,5 W
Tempo de vida útil	9.000 horas
Comprimento	89,46 cm
Raio	1,4 cm

Fonte: Philips [128].

Assim, como a lâmpada UVC escolhida possui formato tubular e suas características como dimensões e potência UVC emitida são conhecidas, então o modelo fator de visão da radiação poderá ser aplicado nela. Além disso, o fabricante informa que a irradiância da lâmpada pode ser considerada constante no tempo. Dessa forma, a equação (4) poderá ser utilizada nessa lâmpada.

Esta seção mostrou como o modelo fator de visão da radiação pode ser usado para estimar a irradiância produzida por uma lâmpada UVC. Entretanto, algumas aplicações para desinfecção podem utilizar várias lâmpadas UVC. Nesse caso, é necessário modelar o equipamento de desinfecção para que todas as lâmpadas UVC sejam consideradas.

3.2.2 Modelagem do equipamento

Um equipamento para desinfecção de ambientes por radiação UVC é essencialmente formado por uma ou mais lâmpadas UVC. Assim, o equipamento pode ser entendido como sendo uma plataforma com uma ou mais lâmpadas UVC instaladas. Tendo isso em vista, a modelagem do equipamento tem como objetivo considerar o efeito de várias lâmpadas UVC para a irradiância total no ponto de interesse.

O modelo desenvolvido considera que todas as lâmpadas UVC instaladas no equipamento são do mesmo modelo. Ou seja, elas são iguais em dimensões e em potência elétrica. Essa consideração também é aplicada nos modelos de equipamentos comerciais e

da literatura. Dessa forma, quanto maior a quantidade de lâmpadas UVC consideradas no modelo, maior será a potência elétrica do equipamento modelado. Assim, a potência do equipamento é diretamente proporcional ao número de lâmpadas UVC instaladas. A Figura 13 ilustra como o modelo representa as lâmpadas UVC, a partir de uma vista superior.

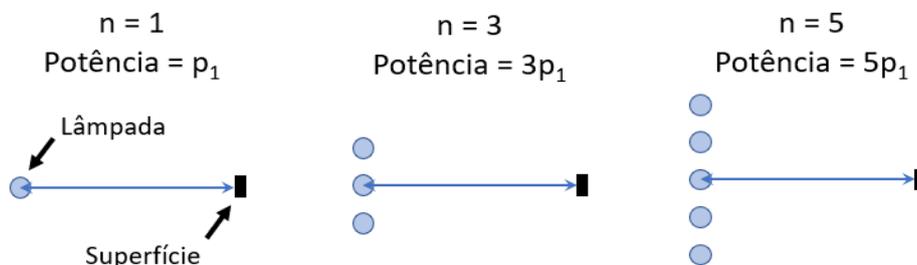


Figura 13 - modelagem do equipamento: representação das lâmpadas UVC no modelo desenvolvido.

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Apesar da Figura 13 mostrar até 5 lâmpadas UVC, o modelo pode facilmente ser aplicado para um número superior de lâmpadas. Entretanto, vale mencionar que não foi necessário considerar um número par de lâmpadas no modelo, mas apenas uma quantidade ímpar. Pois para o objetivo final dessa modelagem, que é a avaliação da eficiência energética da abordagem distribuída, foi suficiente considerar apenas um número ímpar de lâmpadas UVC. Por isso, o modelo não prevê uma quantidade par de lâmpadas.

Conforme pode ser visto na Figura 13, as lâmpadas UVC são dispostas linearmente, em uma direção perpendicular à distância entre a lâmpada central do conjunto e o ponto de interesse. O modelo considera também as lâmpadas igualmente espaçadas entre si. Além disso, a análise sobre o efeito da distância na irradiância total do conjunto será feita em uma dimensão, e ao longo da distância da lâmpada central e o ponto de interesse.

A Figura 14 mostra a modelagem de três equipamentos diferentes, mas que usam o mesmo modelo de lâmpada UVC. Os equipamentos possuem três níveis de potência diferentes, de acordo com a quantidade de lâmpadas UVC indicadas. Nos equipamentos com mais de uma lâmpada, a distância entre elas foi chamada de **d**. A distância entre a lâmpada central do conjunto e o ponto de interesse foi indicada por **x**.

No caso do equipamento mais simples ($n = 1$), a irradiância no ponto de interesse pode ser obtida a partir da aplicação direta do modelo fator de visão da radiação. No caso do equipamento com 3 lâmpadas UVC ($n = 3$), a irradiância total, ou seja, a irradiância devida ao conjunto com todas as 3 lâmpadas no ponto de interesse, será obtida a partir da soma de dois termos.

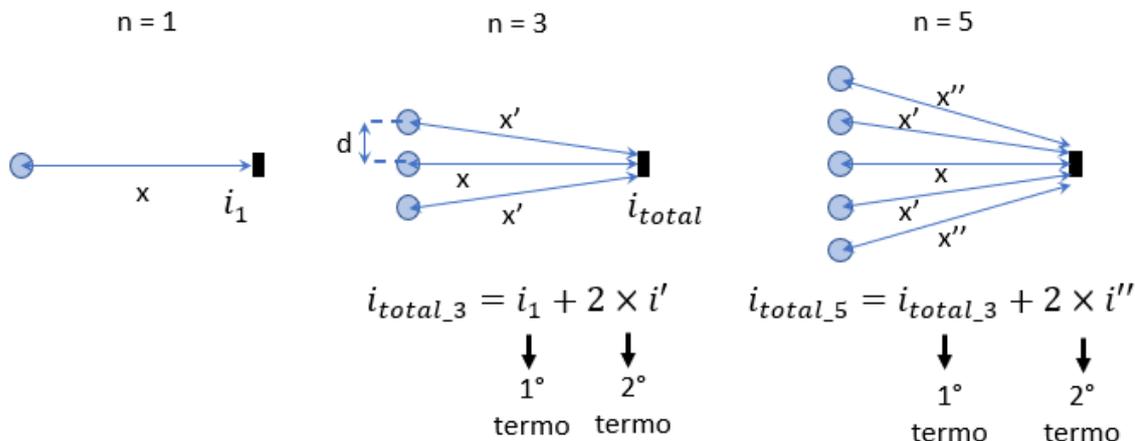


Figura 14 - modelagem do equipamento: níveis de potência de 3 equipamentos diferentes.

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

O primeiro termo é a irradiância devido a lâmpada UVC central do conjunto. É interessante observar que esse termo já foi obtido no caso anterior ($n = 1$). O segundo termo é a irradiância devido as outras duas lâmpadas UVC, que estão nas extremidades do conjunto. Como as lâmpadas UVC no modelo são iguais e existe simetria em relação a distância x , o segundo termo será a irradiância calculada para a distância x' multiplicada por 2. Assim, somando-se esses dois termos é possível calcular a irradiância total para o conjunto formado pelas 3 lâmpadas UVC.

No caso do equipamento com 5 lâmpadas UVC, a irradiância total também será obtida a partir da soma de dois termos. O primeiro termo é a irradiância devido as 3 lâmpadas UVC centrais do conjunto. Mais uma vez, observa-se que esse termo já foi obtido no caso anterior ($n = 3$), semelhante ao que foi observado para esse caso em relação ao caso $n = 1$. O segundo termo, assim como no caso anterior, é a irradiância devido as outras duas lâmpadas UVC das extremidades do conjunto. Mas agora calculada para a distância x'' e multiplicada por 2. Assim, semelhante ao caso anterior, a soma desses dois termos fornece a irradiância total do conjunto, mas dessa vez, formado pelas 5 lâmpadas UVC.

Estendendo essa análise para valores de n maiores que 5 e ímpares, o mesmo padrão poderá ser observado. Assim, é possível observar uma recursividade no cálculo da irradiância total do conjunto com n lâmpadas UVC. Onde, para calcular a irradiância de um equipamento com n lâmpadas UVC, é preciso conhecer antes a irradiância de todos os equipamentos menores.

O cálculo começa considerando a aplicação do modelo para o caso com n lâmpadas UVC até chegar o caso mais simples, com apenas 1 lâmpada UVC. Em seguida, fazendo-se o caminho de volta e partindo do caso mais simples, calcula-se as irradiâncias recursivamente até chegar ao número de n lâmpadas UVC desejado no modelo.

A partir do padrão observado, pode-se generalizar e deduzir que a expressão matemática do modelo é a seguinte:

$$i_{total\ n} = i_{total\ n-1} + 2 \times i \quad (\text{somente para } n \text{ ímpar}) \quad (12)$$

Onde,

$i_{total\ n}$ = Irradiância total para um equipamento com n lâmpadas UVC.

$i_{total\ n-1}$ = Valor da irradiância calculada no passo anterior e que corresponde a irradiância das lâmpadas UVC que não estão nas extremidades do conjunto no passo atual.

i = Valor da irradiância calculada no passo atual para uma das lâmpadas UVC que está em uma das extremidades do conjunto.

A implementação do modelo desenvolvido pode ser particularmente mais interessante se for realizada através de planilhas eletrônicas. Pois, os cálculos e os ajustes nos parâmetros do modelo, como por exemplo, a quantidade de lâmpadas UVC podem ser facilmente executados em uma planilha eletrônica. No desenvolvimento deste trabalho, foi utilizado o software Microsoft Excel para implementar o modelo desenvolvido.

Vale ressaltar que o modelo apresentado nesta seção considera um equipamento de desinfecção com um número ímpar de lâmpadas UVC e dispostas linearmente. Apesar dessas condições, o modelo apresentado pode de ser usado para avaliar eficiência da energética da abordagem distribuída em relação a abordagem centralizada.

Portanto, o modelo desenvolvido permite calcular a irradiância em um ponto de interesse para um equipamento de desinfecção com mais de uma lâmpada UVC. Conhecer a irradiância na superfície em que se deseja realizar a desinfecção, é uma das etapas para a avaliar a eficiência energética da abordagem distribuída. Pois, com base nessa irradiância será possível estimar o tempo de desinfecção, que está diretamente relacionado com o consumo de energia do processo.

O tempo de desinfecção é estimado também a partir da dose de radiação UVC necessária, a ser aplicada nas superfícies para alcançar a taxa de desinfecção desejada para um determinado micro-organismo. Assim como a irradiância produzida por uma lâmpada

UVC a uma certa distância foi obtida a partir de um modelo matemático, a dose UVC necessária para eliminar os micro-organismos desejados também pode ser obtida a partir de um modelo, que será apresentado a seguir.

3.2.3 Modelo dose resposta

O modelo dose resposta relaciona a dose de radiação UVC necessária para alcançar taxas de desinfecção para alguns micro-organismos. Essa relação está baseada na resposta dos micro-organismos após serem expostos a doses de radiação UVC. As respostas são obtidas a partir de testes relatados em estudos disponíveis na literatura [130].

Na referência [136] é possível encontrar uma tabela abrangente para diversos micro-organismos, onde são apresentados valores de dose UVC para realizar a desinfecção de bactérias, vírus, protozoários e algas. Em geral, para um dado micro-organismo, quanto maior a dose UVC aplicada, maior será a sua taxa de desinfecção. A Tabela 4 apresenta valores de doses UVC para alguns micro-organismos, de acordo com a taxa de desinfecção ou redução de log observados nas respectivas referências.

Tabela 4 - Doses necessárias para redução de micro-organismos.

MICRO-ORGANISMOS		DOSE UVC (mJ/cm ²)					REFERÊNCIA
Nome	Tipo	1 log ₁₀	2 log ₁₀	3 log ₁₀	4 log ₁₀	5 log ₁₀	
<i>Staphylococcus aureus</i> (MRSA)	Bactéria	4,5	7,2	8,8	10,0	-	[137]
<i>Pseudomonas aeruginosa</i> (MDRPA)	Bactéria	1,3	2,7	4,3	6,3	10,0	[137]
<i>Enterococcus faecium</i> (VRE)	Bactéria	7	9	11	13	15	[137]
<i>Listeria monocytogenes</i>	Bactéria	2,2	3,0	3,2	4,1	4,6	[138]
SARS-CoV-2	Vírus	2,55	3,40	4,24	-	-	[139]

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

De acordo com os valores apresentados na Tabela 4 e usando como exemplo o SARS-CoV-2, para eliminar 3 log₁₀ (99,9%) desse vírus de uma superfície, é necessário aplicar pelo menos 4,24 mJ/cm² de radiação UVC. Os micro-organismos indicados na Tabela 4 são os

mesmos, exceto o vírus SARS-CoV-2, que foram testados pelos principais equipamentos discutidos no capítulo anterior. E por isso, foram escolhidos para serem usados na avaliação da eficiência energética da abordagem distribuída.

Assim, com base nas doses fornecidas pela Tabela 4 e pela irradiância obtida através da modelagem do equipamento, é possível estimar o tempo de desinfecção utilizando a equação (4). Essa estimativa será utilizada para obter o consumo de energia de ambas as abordagens.

3.3 Simulação: abordagem distribuída – Casos 1 e 2

A implementação da abordagem distribuída pode ser feita de duas formas. Cada forma configura um caso, sendo chamados de casos 1 e 2. A simulação desses dois casos tem como objetivo avaliar não apenas a eficiência energética da abordagem distribuída em relação a abordagem centralizada, mas também de verificar se haverá diferenças na eficiência energética para as duas formas de implementar a abordagem distribuída.

No caso 1, a potência do equipamento é a mesma usada na abordagem centralizada. Com isso, espera-se que o tempo de desinfecção seja reduzido, pois a irradiância no ponto de interesse será maior, por causa da aproximação. No caso 2, a potência do equipamento é reduzida, mas a irradiância no ponto de interesse deve ser aproximadamente a mesma, também por causa da aproximação. Com isso, espera-se que o tempo de desinfecção nesse caso, se mantenha aproximadamente o mesmo em relação a abordagem centralizada.

Ambos os casos foram simulados considerando uma distância de dois metros entre o equipamento e o ponto de interesse. Na abordagem centralizada, essa distância foi de cinco metros. A distância d entre as lâmpadas UVC foi de cinco cm. A quantidade adotada de lâmpadas UVC para os equipamentos nos casos base e 1 foi de cinco lâmpadas ($n = 5$). No caso 2 foi de apenas uma lâmpada UVC ($n = 1$). A Figura 15 ilustra como os casos 1 e 2 foram simulados, e também o caso base apenas para efeito de comparação.

Na Figura 15, o tamanho do círculo preto representa o nível de potência do equipamento. Assim, nos casos base e 1, a potência dos equipamentos simulados é igual, mas é superior a potência do equipamento no caso 2.

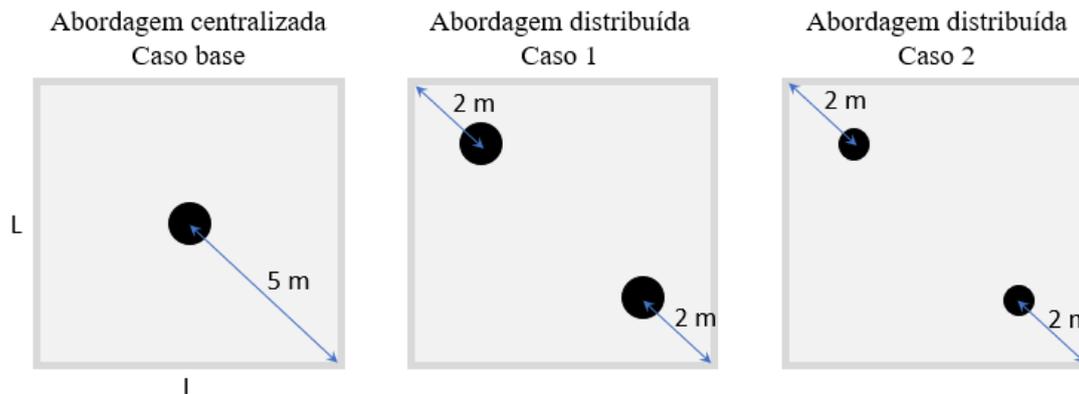


Figura 15 - Simulação: Abordagem distribuída - Casos 1 e 2.

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Ainda observando a Figura 15, pode-se perceber que à medida que um equipamento se aproxima de um dos pontos de interesse, ele ao mesmo tempo se afasta de outro ponto de interesse do ambiente. Por isso, a proposta da abordagem distribuída é utilizar múltiplos emissores para realizar a desinfecção em um único ciclo de desinfecção ou um único emissor em vários ciclos de desinfecção.

Dessa forma, os equipamentos indicados nos casos 1 e 2 podem ser entendidos como sendo dois emissores operando simultaneamente, ou o mesmo equipamento operando em dois instantes diferentes.

Capítulo 4 - Resultados e Discussão

Neste capítulo serão apresentados os resultados da avaliação da eficiência energética da abordagem distribuída. Esses resultados foram obtidos a partir da aplicação da metodologia descrita no capítulo anterior. Uma breve discussão desses resultados também será apresentada.

A Figura 16 mostra as curvas de irradiância para os três equipamentos considerados na simulação, que foram obtidas a partir da modelagem apresentada na seção 3.2.2 do capítulo anterior. As curvas indicam, em uma escala linear, o perfil da irradiância dos equipamentos para distâncias de até cinco metros. Os equipamentos possuem uma, três e cinco lâmpadas UVC e suas potências são respectivamente 54 W, 162 W (54x3) e 270 W (54x5); de modo semelhante como foi indicado nas Figura 14 e Figura 15.

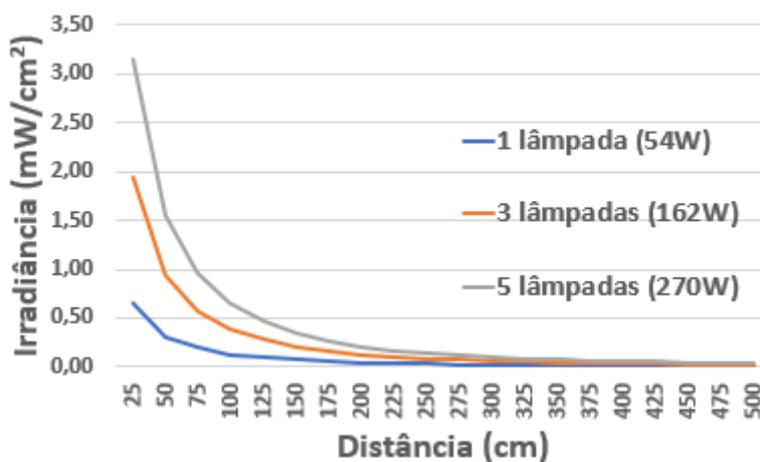


Figura 16 - Perfil da irradiância dos equipamentos simulados (escala linear).

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Como esperado, para regiões próximas ao equipamento, a irradiância é consideravelmente maior do que para as regiões mais distantes, e diminui à medida que se afasta do equipamento. O mesmo também pode ser observado nos equipamentos simulados com mais de uma lâmpada UVC.

Isso confirma que ao aproximar o equipamento do ponto de interesse, é possível aumentar significativamente a irradiância nesse ponto e manter a potência do equipamento constante. Assim, aumentando a irradiância no ponto de interesse, pela equação (4) pode-se diminuir o tempo de desinfecção, sem alterar o valor da dose UVC aplicada na superfície.

Ao reduzir o tempo de desinfecção, o equipamento ficará ligado por um tempo menor, consumindo assim menos energia elétrica e com isso tornando o processo mais eficiente energeticamente. Como mencionado anteriormente, essa situação configura o caso 1 considerado na simulação.

É interessante observar, como mostra a Figura 16, que nas proximidades dos equipamentos, ou seja, cerca de até dois metros de distância, a diferença absoluta entre as irradiâncias não é constante. Mas em vez disso, essa diferença é inversamente proporcional com a distância. Em outras palavras, quanto mais afastado o ponto de interesse estiver, menor é a diferença das irradiâncias dos equipamentos, pelo menos na região próxima ao equipamento.

Isso revela o seguinte resultado importante do ponto de vista energético: nas proximidades dos equipamentos, um aumento na quantidade de lâmpadas UVC produz um efeito cada vez menos significativo na irradiância total, a medida em que se afasta do equipamento. Ou seja, para realizar a desinfecção em pontos distantes, não é eficiente energeticamente aumentar a quantidade de lâmpadas UVC instaladas no equipamento, mas sim, aproximar na medida do possível, o equipamento de desinfecção desses pontos.

Como pode ser observado na Figura 16, a partir de três metros de distância, aproximadamente, as curvas estão tão próximas entre si que não é possível avaliar com precisão o que acontece nessa região. Exceto visualizar que o nível de irradiância dos equipamentos é muito similar quando comparado com a região mais próxima do equipamento.

Por isso, nesse caso em que as curvas estão muito próximas é mais adequado avaliar as irradiâncias dos equipamentos em uma escala logarítmica, em vez de uma escala linear. A Figura 17 mostra os mesmos valores da Figura 16 mas em uma escala logarítmica.

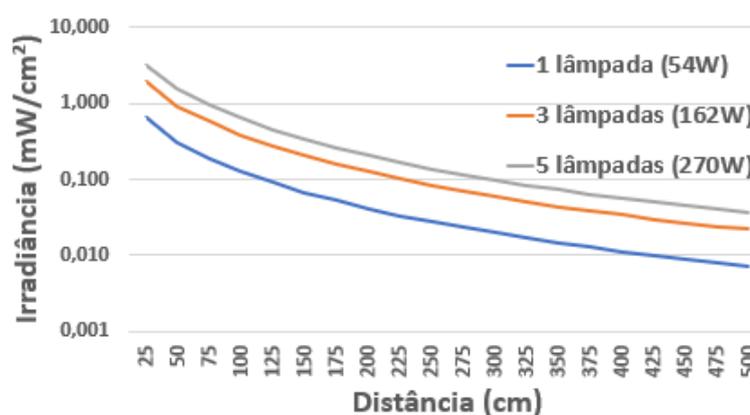


Figura 17 - Perfil da irradiância dos equipamentos simulados (escala logarítmica).

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Na Figura 17 é possível observar que a diferença entre as curvas é constante ao longo da distância considerada. Como em uma escala logarítmica espaçamentos iguais representam proporções também iguais, então a mesma proporção é observada ao longo dessa distância.

Isso significa que um aumento na quantidade de lâmpadas UVC no equipamento produz um aumento com a mesma proporção, tanto na região mais próxima como na mais afastada do equipamento. Entretanto, como a irradiância é maior nas proximidades do equipamento, então o aumento da irradiância é mais significativo em termos absolutos nessa região do que nos pontos mais distantes.

Observando a inclinação de cada curva em particular da Figura 17, é possível visualizar que, apesar da irradiância ser mais intensa próxima ao equipamento, a atenuação é maior nessa região. Na região mais distante ocorre o contrário, a irradiância é menos intensa e a atenuação é menor.

Os valores da Figura 16 e da Figura 17 também estão apresentados na Tabela 5. Nessa tabela uma escala de cores é mostrada de acordo com os seus valores. Em vermelho, amarelo e verde estão indicados, respectivamente, os valores altos, intermediários e baixos de irradiância. Como esperado, os valores mais altos de irradiância estão nas proximidades do equipamento mais potente e com mais lâmpadas UVC. Enquanto isso, os valores mais baixos são encontrados nos pontos mais distantes do equipamento menos potente e com apenas uma lâmpada UVC.

Na região intermediária em amarelo é possível observar, por exemplo, que o equipamento com cinco lâmpadas UVC e a 3,75 metros de distância, produz uma irradiância equivalente ao equipamento com apenas uma lâmpada UVC e a 1,5 metro. Ou seja, uma redução de aproximadamente dois metros de distância permitiu reduzir a potência do equipamento para um quinto do valor original, quase sem alterar a irradiância no ponto de interesse. Esse mesmo fato também pode ser observado em outros pontos e regiões da Tabela 5.

Esse resultado confirma que ao aproximar o equipamento do ponto de interesse, também é possível reduzir sua potência elétrica, mas sem alterar significativamente a irradiância nesse ponto. Como o tempo de desinfecção também deve permanecer aproximadamente constante em relação ao o equipamento mais potente, então o processo se torna mais eficiente energeticamente porque a potência elétrica foi reduzida. Como mencionado anteriormente, essa situação configura o caso 2 considerado na simulação.

Tabela 5 - Irradiância dos equipamentos simulados.

DISTÂNCIA x (cm)	IRRADIÂNCIA (mW/cm ²)		
	1 lâmpada (54W)	3 lâmpadas (162W)	5 lâmpadas (270W)
25	0,6534	1,9341	3,1451
50	0,3125	0,9340	1,5452
75	0,1916	0,5736	0,9524
100	0,1292	0,3870	0,6435
125	0,0922	0,2763	0,4598
150	0,0686	0,2057	0,3425
175	0,0528	0,1583	0,2636
200	0,0417	0,1252	0,2084
225	0,0337	0,1012	0,1686
250	0,0278	0,0834	0,1389
275	0,0233	0,0698	0,1163
300	0,0197	0,0592	0,0987
325	0,0170	0,0509	0,0848
350	0,0147	0,0441	0,0735
375	0,0129	0,0386	0,0644
400	0,0114	0,0341	0,0568
425	0,0101	0,0303	0,0505
450	0,0090	0,0271	0,0452
475	0,0081	0,0244	0,0407
500	0,0074	0,0221	0,0368

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Portanto, os resultados apresentados até o momento mostram que aumentar a quantidade de lâmpadas UVC instaladas no equipamento, para compensar a forte atenuação da irradiância nos pontos mais distantes não é eficiente energeticamente. Em vez disso, aproximar o máximo possível o equipamento desses pontos pode ser uma solução mais eficiente.

Além disso, os resultados mostraram que a aproximação do equipamento com o ponto de interesse, tende a tornar o processo mais eficiente energeticamente seja por causa da redução do tempo de desinfecção (caso 1), seja por causa da redução da potência do equipamento (caso 2).

Entretanto, esses resultados ainda não são suficientes para avaliar se a abordagem distribuída é mais eficiente energeticamente do que a abordagem centralizada. Pois é necessário verificar se a abordagem distribuída é capaz de alcançar nos pontos de interesse do ambiente simulado, a mesma taxa de desinfecção que a abordagem centralizada, porém consumindo menos energia.

Conforme mencionado anteriormente, o consumo de energia de uma desinfecção depende da potência do equipamento e do tempo de desinfecção. Como a potência dos equipamentos simulados é conhecida, então o tempo de desinfecção necessário para alcançar a taxa de desinfecção desejada nos pontos de interesse precisa ser estimado. Essa estimativa é obtida utilizando a equação (4) e a partir dos valores das doses indicadas na Tabela 4 e das irradiâncias dos equipamentos na Tabela 5.

Como exemplo de aplicação dessa metodologia, a Tabela 6 mostra o tempo de desinfecção em minutos e o respectivo consumo de energia para cada equipamento simulado ao eliminar $3 \log_{10}$ (99,9%) do vírus SARS-CoV-2.

Todos os valores da Tabela 6 correspondem a uma dose de $4,24 \text{ mJ/cm}^2$ de radiação UVC sendo aplicada nas distâncias indicadas. De acordo com a referência [139], essa é a dose UVC necessária para eliminar 99,9% do SARS-CoV-2. Os valores da Tabela 6 mostram que quanto menor a distância entre o equipamento e o ponto de interesse, menor é o tempo de desinfecção e conseqüentemente menor o consumo de energia.

Em particular, para as distâncias consideradas na simulação para a abordagem centralizada de cinco metros e para a abordagem distribuída de dois metros, o consumo de energia no processo de desinfecção reduziu de 8,65 Wh para 1,53 Wh.

Entretanto, pelos motivos mencionados no final da seção 3.3, a aplicação da abordagem distribuída pode requerer o uso de múltiplos equipamentos funcionando simultaneamente ou um único equipamento funcionando em vários ciclos de desinfecção. A quantidade de equipamentos ou de ciclos de desinfecção depende do número de pontos de interesse do ambiente. Como o ambiente de controle possui dois pontos de interesse, então o consumo indicado na Tabela 6 deve ser multiplicado por dois.

Dessa forma, a abordagem distribuída pode alcançar a mesma taxa de desinfecção que a abordagem centralizada nos pontos de interesse e o consumo de energia poderá ser comparado. Sendo assim, o consumo de energia para eliminar 99,9% do SARS-CoV-2 nos pontos de interesse do ambiente controlado foi de 8,65 Wh para a abordagem centralizada e 3,06 Wh para a abordagem distribuída.

Tabela 6 - Tempo e consumo para eliminar 3 log₁₀ (99,9%) do SARS-CoV-2.

DISTÂNCIA x (cm)	TEMPO (min)			CONSUMO (Wh)		
	1 lâmpada (54W)	3 lâmpadas (162W)	5 lâmpadas (270W)	1 lâmpada (54W)	3 lâmpadas (162W)	5 lâmpadas (270W)
25	0,11	0,04	0,02	0,0973	0,0986	0,1011
50	0,23	0,08	0,05	0,2035	0,2043	0,2058
75	0,37	0,12	0,07	0,3320	0,3326	0,3339
100	0,55	0,18	0,11	0,4924	0,4930	0,4942
125	0,77	0,26	0,15	0,6899	0,6905	0,6916
150	1,03	0,34	0,21	0,9269	0,9274	0,9286
175	1,34	0,45	0,27	1,2046	1,2052	1,2063
200	1,69	0,56	0,34	1,5239	1,5244	1,5256
225	2,09	0,70	0,42	1,8849	1,8854	1,8866
250	2,54	0,85	0,51	2,2879	2,2885	2,2896
275	3,04	1,01	0,61	2,7331	2,7337	2,7348
300	3,58	1,19	0,72	3,2205	3,2211	3,2222
325	4,17	1,39	0,83	3,7502	3,7508	3,7519
350	4,80	1,60	0,96	4,3223	4,3228	4,3240
375	5,49	1,83	1,10	4,9366	4,9372	4,9383
400	6,21	2,07	1,24	5,5933	5,5939	5,5950
425	6,99	2,33	1,40	6,2924	6,2930	6,2941
450	7,82	2,61	1,56	7,0339	7,0344	7,0356
475	8,69	2,90	1,74	7,8177	7,8183	7,8194
500	9,60	3,20	1,92	8,6439	8,6445	8,6456

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Esse resultado mostra que a implementação da abordagem distribuída reduziu o consumo de energia em 5,59 Wh. Essa redução corresponde uma economia de 64,7% de energia elétrica em relação à abordagem centralizada, na desinfecção do ambiente de controle considerado na simulação.

Além disso, a Tabela 6 mostra que para uma mesma distância, o consumo de energia dos três equipamentos pode ser considerado igual. Isso indica que a eficiência energética da abordagem distribuída tende ser a mesma para as duas formas de ser implementada, ou seja, os casos 1 e 2.

Na prática, a diferença entre os casos 1 e 2 é que enquanto no primeiro, o tempo de desinfecção é reduzido e a potência do equipamento é mantida constante, no segundo caso ocorre o contrário, ou seja, o tempo de desinfecção é mantido constante e a potência do equipamento é reduzida, tudo isso em relação à abordagem centralizada.

Como o balanço entre esses parâmetros ocorre na mesma proporção, então a eficiência energética tende a ser a mesma nos casos 1 e 2. Ou seja, para uma mesma distância, enquanto um parâmetro aumenta o outro diminui em igual proporção, de modo que o produto entre eles se mantém constante, que nesse caso é o consumo de energia. Por esse motivo, para uma dada distância, o consumo de energia é igual para os três equipamentos considerados na simulação.

Sendo assim, verifica-se que a eficiência energética proporcionada pela abordagem distribuída ocorre por causa da aproximação do equipamento com o ponto de interesse. No caso 1, essa aproximação aumenta a irradiância no ponto de interesse e permite diminuir o tempo de desinfecção, gerando assim redução de consumo. No caso 2, a aproximação permite reduzir a potência do equipamento em relação àquela usada na abordagem centralizada, gerando assim também redução de consumo.

A Tabela 7 mostra o consumo de energia e a redução do consumo entre as abordagens na desinfecção do ambiente, para os demais micro-organismos considerados na simulação. Na coluna consumo de energia estão os valores da energia elétrica consumida para eliminar os micro-organismos nas distâncias e taxas de desinfecção indicadas. A partir desses valores, foi calculado a redução relativa e absoluta do consumo de energia na desinfecção do ambiente com a implementação da abordagem distribuída em relação à abordagem centralizada.

Os valores na coluna consumo de energia mostram que quanto mais resistente for o micro-organismo e mais distante ele estiver do equipamento, maior é a energia necessária para eliminá-los. Assim, verifica-se que a energia consumida no processo de desinfecção está relacionada com a taxa de desinfecção e com a distância entre o equipamento e o ponto de interesse.

Na coluna redução do consumo é possível observar que a redução absoluta proporcionada pela abordagem distribuída, também varia de acordo com a taxa de desinfecção. Mas, a redução absoluta varia principalmente de acordo com o micro-organismo que se pretende eliminar na desinfecção.

Tabela 7 - Consumo de energia elétrica e redução do consumo com a abordagem distribuída.

MICRO-ORGANISMOS	DISTÂNCIA (cm)	CONSUMO DE ENERGIA (Wh)		REDUÇÃO DO CONSUMO			
				Relativa (%)		Absoluta (Wh)	
		3 log ₁₀	4 log ₁₀	3 log ₁₀	4 log ₁₀	3 log ₁₀	4 log ₁₀
<i>Staphylococcus aureus</i> (MRSA)	200	3,17	3,60	64,71	64,71	11,61	13,19
	500	17,94	20,39				
<i>Pseudomonas aeruginosa</i> (MDRPA)	200	1,55	2,27	64,71	64,71	5,67	8,31
	500	8,77	12,85				
<i>Enterococcus faecium</i> (VRE)	200	3,96	4,68	64,71	64,71	14,51	17,15
	500	22,43	26,51				
<i>Listeria monocytogenes</i>	200	1,15	1,48	64,71	64,71	4,22	5,41
	500	6,53	8,36				
SARS-CoV-2	200	1,53	-	64,71	-	5,59	-
	500	8,65	-				

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Ainda na coluna redução do consumo, mas dessa vez observando a redução relativa proporcionada pela abordagem distribuída em relação à abordagem centralizada, é possível notar o mesmo percentual de redução para todos os micro-organismos e taxas de desinfecção considerados na simulação.

Isso parece indicar que na verdade, a redução relativa do consumo de energia está relacionada com a diferença entre as distâncias consideradas na simulação das abordagens. Para o valor de redução relativa indicado na Tabela 7 essa diferença foi de três metros, pois as abordagens centralizada e distribuída foram simuladas, respectivamente, com cinco e dois metros. Ou seja, a mesma diferença para todos os micro-organismos simulados, como mostra a coluna distância da Tabela 7. A fim de verificar se a redução relativa do consumo possui relação com a diferença entre as distâncias das abordagens, a Tabela 8 apresenta o consumo e redução relativa para várias distâncias da abordagem distribuída.

Tabela 8 - Consumo de energia elétrica e redução relativa do consumo.

DISTÂNCIA x (cm)	CONSUMO DE ENERGIA (Wh) - 3 LOG ₁₀					REDUÇÃO RELATIVA (%)
	MRSA	MDRPA	VRE	LIST. MON.	SARS- CoV-2	
25	0,21	0,10	0,26	0,08	0,10	97,66
50	0,43	0,21	0,53	0,16	0,21	95,24
75	0,69	0,34	0,87	0,25	0,33	92,28
100	1,03	0,50	1,28	0,37	0,49	88,57
125	1,44	0,70	1,79	0,52	0,69	84,00
150	1,93	0,94	2,41	0,70	0,93	78,52
175	2,50	1,22	3,13	0,91	1,21	72,09
200	3,17	1,55	3,96	1,15	1,53	64,71
225	3,92	1,91	4,89	1,42	1,89	56,36
250	4,75	2,32	5,94	1,73	2,29	47,03
275	5,68	2,77	7,10	2,06	2,73	36,74
300	6,69	3,27	8,36	2,43	3,22	25,46
325	7,79	3,81	9,73	2,83	3,75	13,21
350	8,97	4,39	11,22	3,26	4,32	-0,03
375	10,25	5,01	12,81	3,73	4,94	-14,24
400	11,61	5,67	14,52	4,22	5,60	-29,43
425	13,06	6,38	16,33	4,75	6,29	-45,60
450	14,60	7,14	18,25	5,31	7,04	-62,75
475	16,23	7,93	20,29	5,90	7,82	-80,89
500	17,94	8,77	22,43	6,53	8,65	-

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Os valores apresentados na Tabela 8 são referentes a uma taxa de desinfecção de 3 log₁₀, mas os mesmos valores de redução relativa de consumo também foram observados para uma desinfecção de 4 log₁₀. Nessa tabela, o cálculo da redução relativa foi feito da mesma forma que na Tabela 7, mas considerando também outras distâncias além de dois metros para a abordagem distribuída.

De acordo com os valores da Tabela 8, verifica-se que de fato, a redução relativa do consumo possui relação com a distância em que a abordagem distribuída é implementada. O valores da redução relativa mostram que quanto mais próximo o equipamento estiver do ponto de interesse, mais a abordagem distribuída é eficiente energeticamente na desinfecção do ambiente em relação a abordagem centralizada.

A Tabela 8 também indica que a abordagem distribuída quando implementada nas condições simuladas, é mais eficiente energeticamente que a abordagem centralizada, se a distância entre o equipamento e o ponto interesse for de no máximo 3,25 metros.

Isso significa que se o deslocamento do equipamento na abordagem distribuída for pequeno em relação ao seu posicionamento original na abordagem centralizada, então a abordagem distribuída poderá não ser eficiente energeticamente. Assim, quanto maior for a proximidade do equipamento com o ponto interesse, maior será a eficiência energética da abordagem distribuída.

Além disso, vale mencionar que a redução do consumo de energia com a implementação da abordagem distribuída, também depende da quantidade de pontos de interesse no ambiente. Assim, quanto mais pontos de interesse o ambiente tiver e mais afastados eles estiverem entre si, menor será a redução de consumo, tanto relativa quando absoluta. Por exemplo, se o ambiente de controle simulado tivesse quatro pontos de interesse, um em cada canto do ambiente, a redução relativa não seria de 64,71% como indica a Tabela 7 e Tabela 8, mas sim de 29,42%.

Assim, como visto pelos resultados da simulação, a implementação da abordagem distribuída proporcionou uma economia de 64,71% no consumo de energia elétrica, na desinfecção de um ambiente de 50 m². Nesse ambiente com dois pontos de interesse, essa economia observada foi devida a redução da distância de cinco para dois metros entre o equipamento e os pontos de interesse.

A economia no consumo de energia elétrica apresentada na Tabela 8 é válida para ambas as formas de implementar a abordagem distribuída, ou seja, caso 1 e 2. Os valores negativos para a redução relativa de consumo presentes na Tabela 8, indicam que a abordagem distribuída de fato se torna mais eficiente energeticamente do que a centralizada, quando é possível aproximar o equipamento dos pontos de interesse.

Embora os valores de potência, consumo absoluto e tempo de desinfecção vistos na simulação não sejam tão elevados quanto dos principais equipamentos, a redução relativa do consumo observada na simulação, indica que se a abordagem distribuída for implementada utilizando os principais equipamentos, a desinfecção do ambiente poderá ser realizada de forma muito mais eficiente energeticamente.

Os resultados apresentados neste capítulo mostraram que de fato a abordagem distribuída pode ser mais eficiente energeticamente do que a abordagem centralizada. Isso significa que ambas as abordagens podem alcançar as mesmas taxas de desinfecção nos pontos

de interesses nas superfícies do ambiente, porém a abordagem distribuída realiza a desinfecção do ambiente consumindo menos energia.

Jelden *et al.* [109] avaliaram a efetividade de um equipamento ao realizar a desinfecção de algumas amostras de superfícies de plástico, aço inoxidável, tampa cromada de interruptor de luz e porcelana. A potência do equipamento avaliado é de 640 W e as amostras foram contaminada com as bactérias MRSA e VRE.

Cada amostra foi colocada em seis locais diferentes dentro de um quarto de hospital, com distâncias variando entre 1 e 3,5 metros do equipamento. A altura das amostras variou entre 0 e 0,9 metro, sendo a altura do equipamento de 1,7 metro, medidos a partir do piso. Todas as amostras foram expostas à radiação UVC por 10 minutos, exceto a amostra de controle, que serviu como base de comparação.

Embora o objetivo principal do trabalho tenha sido avaliar a efetividade do equipamento, considerando variações entre bactérias e tipo de superfícies, foi possível também avaliar o efeito da distância na taxa de desinfecção das amostras. Os resultados indicaram que as amostras tiveram uma redução de pelo menos $5 \log_{10}$ e $4 \log_{10}$ para as bactérias MRSA e VRE, respectivamente.

Esse resultado mostra que apesar da baixa potência do equipamento, quando comparada com a potência dos principais equipamentos, é possível realizar satisfatoriamente a desinfecção das superfícies que estão próximas das lâmpadas UVC.

Bentancor *et al.* [112] desenvolveram um protótipo de equipamento para desinfecção de ambientes por radiação UVC de baixo custo. O protótipo foi desenvolvido com objetivo de realizar a desinfecção de salas de culturas de plantas. De acordo com os autores, essas salas são projetadas para fornecer as condições ideais para o crescimento das plantas.

Entretanto, essas mesmas condições também favorecem o crescimento de micro-organismos indesejados, como bactérias e fungos. Além disso, os autores escolheram usar radiação UVC para desinfetar as superfícies para evitar a utilização de produtos químicos, que segundo os autores, são potencialmente agressivos às superfícies das salas de cultura.

A potência elétrica do protótipo desenvolvido é de apenas 120 W, ou seja, um valor muito inferior a potência dos principais equipamentos. Após desenvolvido, o protótipo passou por diversos testes. Em um deles, uma placa de Petri com a bactéria *E. coli* foi colocada a um metro de distância. Após 15 minutos de exposição à radiação UVC, a presença da bactéria na placa foi reduzida para níveis indetectáveis.

Esse resultado mostra que de fato, quando o equipamento está próximo à superfície em que será realizada a desinfecção, a potência do equipamento pode ser reduzida sem comprometer a desinfecção. Em outras palavras, um equipamento de baixa potência também pode realizar a desinfecção satisfatoriamente do ambiente, desde que as superfícies estejam próximas ao equipamento.

Portanto, os resultados dos trabalhos [109] e [112] confirmam, a partir de análises microbiológicas e medições de irradiância, que é possível ter equipamentos de baixa potência e com comprovação científica, para desinfecção de ambientes por radiação UVC.

Capítulo 5 - Conclusão

A radiação UVC pode ser usada como método complementar às práticas tradicionais de desinfecção de ambientes. Dessa forma, quando utilizada nos EAS, ela pode contribuir na prevenção de infecções hospitalares, tornando os ambientes mais seguros para pacientes e profissionais da saúde.

A importância da radiação UVC como método para desinfecção de ambientes se torna ainda mais evidente, quando se considera um cenário de pandemia de uma doença infecciosa, como a COVID-19. Nesse contexto, esse método de desinfecção pode ser usado não apenas em hospitais, mas também em outros EAS, por exemplo, hospitais de campanha, postos de saúde, UPAs, além de casas de repouso.

Entretanto, os equipamentos atualmente disponíveis no mercado para desinfecção de ambientes por radiação UVC, e que apresentam comprovação científica de desinfecção operam em potência elétrica elevada. Por causa do elevado nível de potência desses equipamentos, eles podem ter dificuldades para serem usados em alguns ambientes dependendo da tensão elétrica e do limite de corrente das tomadas disponíveis.

Essa dificuldade é ainda mais relevante se ocorrer durante uma pandemia de uma doença infecciosa, uma vez que a radiação UVC pode, comprovadamente, tornar os ambientes mais seguros. Diante disso, este trabalho avaliou a eficiência energética das duas abordagens que podem ser utilizadas na desinfecção de ambientes por radiação UVC.

A avaliação foi realizada a partir de simulações e de modelos matemáticos. Do ponto de vista energético, os primeiros resultados contribuíram para o entendimento de que aumentar a quantidade de lâmpadas UVC instaladas no equipamento, tem pouco efeito na irradiância nos pontos mais distantes do equipamento. Pois, o aumento da irradiância tende a ser cada vez menos significativo à medida que se afasta do equipamento, conforme visto no capítulo 4.

Além disso, o fato da irradiância ser consideravelmente maior nas proximidades das lâmpadas UVC sugere que a desinfecção tende a ser mais eficiente energeticamente, se a superfície estiver nessa região. De fato, os resultados indicam que ao aproximar o equipamento do ponto de interesse, tanto a potência do equipamento quanto o tempo de desinfecção podem ser reduzidos.

No entanto, apesar da abordagem distribuída aumentar a irradiância no ponto de interesse, isso não é suficiente para avaliar sua eficiência energética em relação a abordagem

centralizada. Pois na verdade, a avaliação precisa verificar a eficiência energética das abordagens ao aplicar a mesma dose de radiação UVC nos pontos de interesse considerados na simulação. O modelo dose resposta permite relacionar a dose UVC aplicada no ponto de interesse com a taxa de desinfecção dos micro-organismos.

A avaliação mostrou que a abordagem distribuída é capaz de alcançar as mesmas taxas de desinfecção que a abordagem centralizada, porém consumindo menos energia e com menor potência elétrica. Dessa forma, foi verificado que a abordagem distribuída é mais eficiente energeticamente do que a abordagem centralizada. Também foi verificado que quanto maior a aproximação entre o equipamento e ponto de interesse, maior é a eficiência energética do processo de desinfecção. Isso ocorre por conta da forte atenuação da irradiância com a distância.

Portanto, este trabalho contribuiu para demonstrar que é possível a otimização do processo de desinfecção de ambientes por radiação UVC. Essa otimização é possível através da implementação da abordagem distribuída, que permite otimizar a irradiância nas superfícies do ambiente em relação a potência elétrica do equipamento.

Dessa forma, a otimização pode viabilizar o uso de equipamentos para desinfecção de ambiente por radiação UVC no Brasil. Pois, pode reduzir a consideravelmente a potência dos equipamentos que possuem comprovação científica, sem comprometer a capacidade de desinfecção. Assim, o equipamento pode ser conectado em qualquer tomada elétrica disponível no ambiente, independente da sua tensão ou limite de corrente.

Além disso, um equipamento de desinfecção operando de forma mais otimizada possui diversas outras vantagens. A primeira delas seria a possibilidade de se utilizar mais equipamentos simultaneamente sem sobrecarregar a instalação elétrica do EAS. Ao utilizar mais equipamentos ao mesmo tempo e no mesmo ambiente, é possível aumentar a área de cobertura da desinfecção e reduzir as regiões de sombra causadas por obstáculos presentes no ambiente.

Quando mais equipamentos são utilizados ao mesmo tempo, mas em ambientes diferentes, eles podem aumentar a disponibilidade desses ambientes. Isso é particularmente interessante em períodos de pandemia de uma doença infecciosa. Em períodos assim, a maior disponibilidade de ambientes não apenas em hospitais, mas também em outros locais com grande potencial de transmissão do agente infeccioso, pode ser fundamental no combate à pandemia.

Outro aspecto interessante decorrente da otimização da desinfecção de ambientes por radiação UVC, é a possibilidade de reduzir a quantidade de lâmpadas UVC instaladas nos principais equipamentos, sem alterar a taxa de desinfecção desejada. Assim, com menos lâmpadas UVC no equipamento, ele pode se tornar menor, facilitando o transporte e a manutenção. Além disso, o equipamento pode ter seu custo reduzido, pois a lâmpada UVC costuma ser o componente mais caro do equipamento, como visto no projeto apresentado em [108].

5.1 Trabalhos Futuros

As conclusões e os resultados deste trabalho foram obtidos a partir de simulações e modelagens. Entre os modelos utilizados, um deles foi desenvolvido com o objetivo de calcular a irradiância em um ponto de interesse para um equipamento de desinfecção com mais de uma lâmpada UVC. Esse modelo considerou um equipamento com um número ímpar de lâmpadas UVC dispostas linearmente.

Assim, como sugestão para trabalhos futuros, pode-se desenvolver um modelo que considere também uma quantidade par de lâmpadas UVC. Esse modelo pode considerar também uma disposição circular das lâmpadas, que é a forma mais comum presentes nos equipamentos de desinfecção.

Os valores de irradiância calculados através do modelo de equipamento desenvolvido foram realizados para distâncias variando em uma dimensão. Programas computacionais podem ser desenvolvidos para realizar o cálculo da irradiância em duas ou até mesmo em três dimensões.

Dessa forma, os valores podem ser apresentados de modo a visualizar a distribuição espacial da irradiância de um ambiente. Essa forma de apresentar os dados permite comparar visualmente, o perfil da irradiância das abordagens centralizada e distribuída no ambiente. Também é interessante a realização de procedimentos experimentais para medir e comparar a irradiância das ambas abordagens no ambiente.

Além disso, estudos microbiológicos utilizando micro-organismos reais podem ser realizados, de modo a verificar experimentalmente, a maior eficiência energética da abordagem distribuída em relação a abordagem centralizada. Mas para isso, esses estudos precisam também realizar medições de potência e consumo de energia elétrica.

Referências

- [1] Centers for Disease Control and Prevention (CDC), “Guideline for Disinfection and Sterilization in Healthcare Facilities,” North Carolina, 2019.
- [2] Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA), “RESOLUÇÃO DE DIRETORIA COLEGIADA – RDC Nº 59, DE 17 DE DEZEMBRO DE 2010,” Brasília, 2010.
- [3] Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA), “Segurança do paciente em serviços de saúde: limpeza e desinfecção de superfícies,” Brasília, 2012.
- [4] Scientific Committee on Health, Environmental and Emerging Risks (SCHEER), “Biological effects of UV C radiation relevant to health with particular reference to UV-C lamps,” Bruxelas, 2017.
- [5] J. Yao, W. Chen e K. Fan, “Recent advances in light irradiation for improving the preservation of fruits and vegetables: A review,” *Food Bioscience*, p. 103206, 26 Setembro 2023.
- [6] V. S. Bagnato, T. Q. Corrêa, K. C. Blanco e N. M. Inada, “Descontaminação dos locais de trabalho por UV,” em *Feridas: um desafio para a saúde pública*, São Carlos, IFSC/USP, 2019, pp. 213-219.
- [7] H. Kitagawa, M. Mori, R. Kawano, T. Hara, S. Kashiya e Y. Hayashi, “Combining pulsed xenon ultraviolet disinfection with terminal manual cleaning helps reduce the acquisition rate of methicillin-resistant *Staphylococcus aureus*,” *American Journal of Infection Control*, pp. 1048-1051, 2021.
- [8] P. Murphy, L. Kang, M. Fleming, C. Atkinson, R. Pryor, K. Cooper, E. Godbout, M. P. Stevens, M. Doll e G. Bearman, “Effect of ultraviolet-C light disinfection at terminal patient discharge on hospital-acquired infections in bone marrow transplant and oncology units,” *American Journal of Infection Control*, p. 705–707, 2020.
- [9] ASHRAE, “CHAPTER 62: Ultraviolet air and surface treatment,” em *2019 ASHRAE Handbook*, Peachtree Corners, Georgia, ASHRAE, 2019.
- [10] Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA), “NOTA TÉCNICA nº 32/2021,” Brasília, 2021.
- [11] M. S. d. Silva, “Grandezas e unidades radiométricas,” *Revista de Ciência Elementar*, vol. 3, 2015.
- [12] International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC), *Compendium of Chemical Terminology*, Blackwell Scientific Publications, 1997.
- [13] R. S. Breed e W. D. Dotterer, “The Number of Colonies Allowable On Satisfactory Agar Plates,” *Journal of Bacteriology*, pp. 321-331, maio 1916.
- [14] T. Q. Corrêa, K. C. Blanco, J. D. Vollet-Filho, V. S. Morais, W. R. Trevelin, S. Pratavieira e V. S. Bagnato, “Efficiency of an air circulation decontamination device for micro-organisms using ultraviolet radiation,” *Journal of Hospital Infection*, pp. 32-43, 12 junho 2021.
- [15] A. M. W. Downes e T. P. Blunt, “Researches on the Effect of Light upon Bacteria and other Organisms,” *Proceedings of the Royal Society of London*, pp. 488-500, 1877.
- [16] W. Kowalski, *Ultraviolet Germicidal Irradiation Handbook*, Berlin: Springer, 2009.

- [17] P. E. Hockberger, "A history of ultraviolet photobiology for humans, animals, and microorganisms," *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, p. 561–579, 2002.
- [18] E. J. Widmark, "De l'influence de la lumiere sur la peau," *Biol Foren Forhandl Verhandlungen Biolog Vereins*, pp. 9–13, 131–134, 1889.
- [19] E. J. Widmark, "Uber den einfluss des lichtetes auf die haut," *Hygiea*, p. 1–23, 1889.
- [20] H. M. Ward, "Experiments on the action of light on Bacillus anthracis," *Proceedings of the Royal Society of London*, pp. 393-400, 1893.
- [21] J. E. Barnard e H. R. Morgan, "The physical factors in phototherapy," *British medical journal*, p. 1269, 1903.
- [22] O. Ehrismann e W. Noethling, "Ueber die bactericide Wirkung monochromatischen Lichtes," *Zeitschrift für Hygiene und Infektionskrankheiten*, pp. 597-628, 1932.
- [23] W. F. Wells e M. W. wells, "Air-borne infection," *Journal of the American Medical Association*, pp. 1698-1703, 1936.
- [24] D. Hart e P. W. Sanger, "Effect on wound healing of bactericidal ultraviolet radiation from a special unit: Experimental study," *Archives of Surgery*, pp. 797-805, 1939.
- [25] E. C. Robertson, M. E. Doyle, F. F. Tisdall, L. R. Koller e F. S. Ward, "Air contamination and air sterilization," *American Journal of Diseases of Children*, pp. 1023-1038, 1939.
- [26] C. J. Kraissl, J. G. Cimiotti e F. L. Meleney, "Considerations in the use of ultraviolet radiation in operating rooms," *Annals of surgery*, p. 161, 1940.
- [27] R. H. Overholt e R. H. Betts, "A comparative report on infection of thoracoplasty wounds: experiences with ultraviolet irradiation of operating room air," *Journal of Thoracic Surgery*, pp. 520-529, 1940.
- [28] R. L. Riley, W. F. Wells, C. C. Mills, W. Nyka e R. L. McLean, "Air Hygiene in Tuberculosis: Quantitative Studies of Infectivity and Control in a Pilot Ward," *American Review of Tuberculosis and Pulmonary Diseases*, p. 20–431, 1957.
- [29] J. B. Harstad, H. M. Decker e A. G. Wedum, "Use of ultraviolet irradiation in a room air conditioner for removal of bacteria," *Applied microbiology*, pp. 148-151, 1954.
- [30] K. Anderson, "Pseudomonas pyocyanea disseminated from an air-cooling apparatus," *Medical Journal of Australia*, p. 529, 1959.
- [31] C. W. Walter, "Ventilation and air conditioning as bacteriologic engineering," *The Journal of the American Society of Anesthesiologists*, pp. 186-192, 1969.
- [32] L. J. Buttolph e H. Haynes, "Ultraviolet air sanitation," General Electric, Cleveland, OH, 1953.
- [33] General Electric, "Germicidal Lamps and Applications," General Electric, 1950.
- [34] Philips, "UVGI Catalog and Design Guide: Catalog No. U.D.C. 628.9," Philips, 1985.
- [35] M. Nicas e S. L. Miller, "A multi-zone model evaluation of the efficacy of upper-room air ultraviolet germicidal irradiation," *Applied Occupational and Environmental Hygiene*, pp. 317-328, 1999.
- [36] R. L. Riley, M. Knight e G. Middlebrook, "Ultraviolet Susceptibility of BCG and Virulent Tubercle Bacilli," *American Review of Respiratory Disease*, pp. 413-418, 1975.

- [37] C. B. Beggs e P. A. Sleight, “A quantitative method for evaluating the germicidal effect of upper room UV fields,” *Journal of Aerosol Science*, pp. 1681-1699, 2002.
- [38] S. L. Miller e J. M. MacHer, “Evaluation of a methodology for quantifying the effect of room air ultraviolet germicidal irradiation on airborne bacteria,” *Aerosol Science & Technology*, pp. 274-295, 2000.
- [39] Centers for Disease Control and Prevention (CDC), “Environmental Control for Tuberculosis: Basic Upper-Room Ultraviolet Germicidal Irradiation Guidelines for Healthcare Settings,” National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH), 2009.
- [40] A. Bianco, M. Biasin, G. Pareschi, A. Cavalleri, C. Cavatorta, F. Fenizia, P. Galli e L. Lessio, “UV-C Irradiation Is Highly Effective in Inactivating and Inhibiting SARS-CoV-2 Replication,” *SSRN*, pp. 1-9, 20 Junho 2020.
- [41] S. E. Simmons, R. Carrion Jr, K. J. Alfson, H. M. Staples e C. Jinadatha, “Deactivation of SARS-CoV-2 with pulsed-xenon ultraviolet light: Implications for environmental COVID-19 control,” *Infection Control & Hospital Epidemiology*, p. 127–130, 3 Agosto 2021.
- [42] H. Kitagawa, T. Nomura, T. Nazmul, K. Omori, N. Shigemoto, T. Sakaguchi e H. Ohge, “Effectiveness of 222-nm ultraviolet light on disinfecting SARS-CoV-2 surface contamination,” *American Journal of Infection Control*, p. 299–301, 4 Setembro 2020.
- [43] J.-J. Liang, C.-C. Liao, C.-S. Chang, C.-Y. Lee, S.-Y. Chen e S.-B. Huang, “The Effectiveness of Far-Ultraviolet (UVC) Light Prototype Devices with Different Wavelengths on Disinfecting SARS-CoV-2,” *Applied Sciences*, pp. 1-8, 12 Novembro 2021.
- [44] J. J. Lowe, K. D. Paladino, J. D. Farke, K. Boulter e K. Cawcutt, “N95 Filtering Facepiece Respirator Ultraviolet Germicidal Irradiation (UVGI) Process for Decontamination and Reuse,” Nebraska Medicine, Omaha, 2020.
- [45] D. M. Ozog, S. Narla, C. D. Preto-Kernahan, H. W. Lim, C. Mirabelli, J. Z. Sexton, H. W. Lim, I. H. Hamzavi, R. J. Tibbetts e Q.-S. Mi, “The effect of ultraviolet C radiation against different N95 respirators inoculated with SARS-CoV-2,” *International Journal of Infectious Diseases*, pp. 224-229, 28 Agosto 2020.
- [46] M. Bentancor, S. Fernández, F. Viera, S. Etcheverry, C. Poradosú e P. D'Angelo, “LUCIA: An open source device for disinfection of N95 masks using UV-C radiation,” *HardwareX*, p. 2021, 21 Fevereiro 2021.
- [47] W. G. Lindsley, S. B. Marti, R. E. Thewlis, K. Sarkisian, J. O. Nwoko, K. R. Mead e J. D. Noti, “Effects of Ultraviolet Germicidal Irradiation (UVGI) on N95 Respirator Filtration Performance and Structural Integrity,” *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, p. 509–517., 12 agosto 2015.
- [48] C.-C. Tseng e C.-S. Li, “Inactivation of Viruses on Surfaces by Ultraviolet Germicidal Irradiation,” *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, pp. 400-405, 2007.
- [49] A. A. Semenov e T. V. Sakhnoa, “Disinfection of Swimming Pool Water by UV Irradiation and Ozonation,” *Journal of Water Chemistry and Technology*, p. 491–496, 24 Dezembro 2021.
- [50] M. Z. Afifi e E. R. Blatchley III, “Effects of UV-based treatment on volatile disinfection byproducts in a chlorinated, indoor swimming pool,” *Water Research*, pp. 167-177, 29 Agosto 2016.

- [51] N. Cimetiere e J. De Laat, “Effects of UV-dechloramination of swimming pool water on the formation of disinfection by-products: A lab-scale study,” *Microchemical Journal*, p. 34–41, 1 outubro 2014.
- [52] A. Spiliotopoulou, K. M. Hansen e H. R. Andersen, “Secondary formation of disinfection by-products by UV treatment of swimming pool water,” *Science of the Total Environment*, p. 96–105, 22 Março 2015.
- [53] M. Uyğun, M. K. Firat, O. Antepli, F. N. Bulat, M. A. Hekimoğlu, F. Güleç, C. Suzer, İ. Köse, Ş. Saka, B. Kılınç e M. K. Bağcı, “The Water Disinfection with Different Type UV Lamp Systems on Bacterial Load in Small Scale Recirculating Aquaculture Systems,” *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, p. TRJFAS23785, 9 Agosto 2023.
- [54] G.-L. Lu, B. Jiang, Z.-C. Li e A.-X. Li, “Ultraviolet light and ozone controls *Cryptocaryon irritans* infection in,” *factory aquaculture*, pp. 1-9, 9 Agosto 2022.
- [55] L. Zhou, J. Wu, T. Kang, L. Wang, Y. Yuan, L. Jiang, Y. Yu, X. Xie e F. Yin, “Sustainable development of factory aquaculture through automation of ultraviolet parasiticide for the prevention and control of cryptocaryoniasis,” *Pest Manag Sci*, pp. 1372-1380, 1 Dezembro 2023.
- [56] W. V. Bonn, . F. J. Oliaro e L. J. Pinnell , “Ultraviolet light alters experimental aquarium water microbial communities,” *Zoo Biol*, pp. 133-141, 9 Maio 2023.
- [57] D. Leong, H. Chen e G. Wang, “Application of UVC-LED/H₂O₂ in wastewater treatments: treatment efficacy on disinfection byproduct precursors and micropollutants,” *Sustainable Environment Research*, pp. 1-12, 6 Outubro 2023.
- [58] J. Zheng, C. Su, J. Zhou, L. Xu, Y. Qian e H. Chen, “Effects and mechanisms of ultraviolet, chlorination, and ozone disinfection on antibiotic resistance genes in secondary effluents of municipal wastewater treatment plants,” *Chemical Engineering Journal*, p. 309–316, 15 Fevereiro 2017.
- [59] S. Ghosh, Y. Chen e J. Hu, “Application of UVC and UVC based advanced disinfection technologies for the inactivation of antibiotic resistance genes and elimination of horizontal gene transfer activities: Opportunities and challenges,” *Chemical Engineering Journal*, pp. 1-17, 22 Julho 2022.
- [60] F. d. R. Santos e J. Urbanetz Junior, “Rain Water Treatment by Ultraviolet Radiation Using Photovoltaic Energy,” *Engineering, Technology and Techniques*, pp. 1-12, 23 Maio 2022.
- [61] C. J. Ley, . C. R. Proctor, . K. Jordan, . K. Ra, . Y. Noh, . T. Odimayomi, . R. Julien, . I. Kropp, . J. Mitchell, . A. P. Nejadhashemi e . A. J. Whelton, “Impacts of Municipal Water–Rainwater Source Transitions on Microbial and Chemical Water Quality Dynamics at the Tap,” *American Chemical Society*, p. 11453–11463, 13 Agosto 2020.
- [62] K. U. Sikder, “Ultraviolet disinfection of potable water in rainwater harvesting systems,” *International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology*, pp. 557-563, Março 2020.
- [63] A. Capetillo, C. J. Noakes, P. A. Sleigh e A. Khan, “In-Duct UVGI air sterilisation: Optimisation study for high performance energy efficient systems,” em *Indoor Air*, 2014.
- [64] C. Wang, S. Lu e Z. Zhang, “Inactivation of airborne bacteria using different UV sources: Performance modeling, energy utilization, and endotoxin degradation,” *Science of the Total Environment*, p. 787–795, 20 Novembro 2019.

- [65] H. Luo e L. Zhong, “Ultraviolet germicidal irradiation (UVGI) for in-duct airborne bioaerosol disinfection: Review and analysis of design factors,” *Building and Environment*, pp. 1-15, 6 Abril 2021.
- [66] M. Kanaan, “CFD optimization of return air ratio and use of upper room UVGI in combined HVAC and heat recovery system,” *Case Studies in Thermal Engineering*, pp. 1-9, 22 Setembro 2019.
- [67] M. Kanaan, N. Ghaddar, K. Ghali e G. Araj, “New airborne pathogen transport model for upper-room UVGI spaces conditioned by chilled ceiling and mixed displacement ventilation: Enhancing air quality and energy performance,” *Energy Conversion and Management*, p. 50–61, 12 Junho 2014.
- [68] M. Kanaan, N. Ghaddar e K. Ghali, “Localized air-conditioning with upper-room UVGI to reduce airborne bacteria cross-infection,” *Build. Simul.*, p. 63–74, 14 Agosto 2016.
- [69] D. Guimera, J. T. PharmD, J. Joyner e N. D. Hysmith, “Effectiveness of a shielded ultraviolet C air disinfection system in an inpatient pharmacy of a tertiary care children’s hospital,” *American Journal of Infection Control*, pp. 223-225, 31 Agosto 2018.
- [70] E. G. P. Bock, G. N. Margarido, M. M. d. Oliveira, P. F. Poveda, R. J. Nascimento e W. L. Fotoran, “Utilização de radiação UVC para desinfecção do ar nos ambientes,” *Brazilian Applied Science Review*, pp. 792-801, 23 março 2021.
- [71] Y. Wang, C. Sekhar, W. P. Bahnflethb, K. W. Cheonga e J. Firrantello, “Effectiveness of an ultraviolet germicidal irradiation system in enhancing cooling coil energy performance in a hot and humid climate,” *Energy and Buildings*, p. 321–329, 24 Agosto 2016.
- [72] J.-I. Bang, J.-Y. Park, Y.-L. Jo, J.-W. Jeong, A. Choi e M. Sung, “Sterilization effectiveness of in-duct ultraviolet germicidal irradiation system in liquid desiccant and indirect/direct evaporative cooling-assisted 100% outdoor air system,” *Building and Environment*, pp. 1-11, 30 Setembro 2020.
- [73] J. C. Luongo e S. L. Miller, “Ultraviolet germicidal coil cleaning: Decreased surface microbial loading and resuspension of cell clusters,” *Building and Environment*, pp. 50-55, 19 Maio 2016.
- [74] H. Zhang, X. Jin, S. S. Nunayon e A. C. K. Lai, “Disinfection by in-duct ultraviolet lamps under different environmental conditions in turbulent airflows,” *Indoor Air*, pp. 500-511, 5 Janeiro 2020.
- [75] X. Fan, R. Huang e H. Chen, “Application of ultraviolet C technology for surface decontamination of fresh produce,” *Trends in Food Science & Technology*, pp. 9-19, 12 Outubro 2017.
- [76] M. Garvey e N. J. Rowan, “Pulsed UV as a potential surface sanitizer in food production processes to ensure consumer safety,” *Current Opinion in Food Science*, pp. 65-70, 15 Março 2019.
- [77] A. Calle, M. Fernandez, B. Montoya, M. Schmidt e J. Thompson, “UV-C LED Irradiation Reduces Salmonella on Chicken and Food Contact Surfaces,” *Foods*, pp. 1-15, 24 Junho 2021.
- [78] H. Singh, S. K. Bhardwaj, M. Khatri, K.-H. Kim e N. Bhardwaj, “UVC radiation for food safety: An emerging technology for the microbial disinfection of food products,” *Chemical Engineering Journal*, pp. 1-16, 15 Dezembro 2020.

- [79] M. A. S. Pessôa, F. M. Silva, M. P. Lima Jr., G. Galhardo, P. H. M. Olynthoand e A. A. R. Neves, “A Física de um Desinfector com Radiação UV-C,” *Revista Brasileira de Ensino de Física*, pp. 1-10, 16 Junho 2021.
- [80] A. P. Momesso, C. R. Fazani, D. B. Vilela e R. S. Fernandes, “Avaliação da utilização de cabines ultravioletas como descontaminantes de carrinhos de compras em supermercados durante a pandemia de sars-cov2. aspectos técnicos e de segurança,” *Higiene Alimentar*, pp. 1-14, 18 Janeiro 2020.
- [81] H. R. D. Couto, W. S. Lima, J. A. Q. Romaniello, L. G. Giarola, D. C. S. Silva, D. B. Rocha e B. R. G. M. Couto, “Eficácia e efetividade do UVC para desinfecção de materiais hospitalares de pacientes com COVID-19,” *Revista De Epidemiologia E Controle De Infecção*, pp. 1-7, 20 Janeiro 2022.
- [82] A. Gostine, D. Gostine, C. Donohue e L. Carlstrom, “Evaluating the effectiveness of ultraviolet-C lamps for reducing keyboard contamination in the intensive care unit: A longitudinal analysis,” *American Journal of Infection Control*, pp. 1089-1094, 2016.
- [83] M. d. C. A. Rossi, T. Q. Corrêa, K. C. Blanco, V. S. Bagnato e A. G. Salvio, “Physiotherapy elastic band disinfection by UV-C irradiation in an intensive care unit,” *Photodiagnosis and Photodynamic Therapy*, pp. 1-6, junho 2021.
- [84] G. S. Boigues, L. R. Veiga, R. Bratfich, J. Pucci Neto e F. C. Fajoni, “Protótipo de uma camara de radiação uv-c para desinfecção de objetos,” *Colloquium Exactarum*, p. 71 –81, Outubro 2020.
- [85] A. S. da Rocha, C. A. da Silva, R. L. de Souza, N. M. S. Choque e D. B. Soares, “Efficiency verification of a UV-C radiation disinfection device,” *Research, Society and Development*, pp. 1-11, 30 maio 2021.
- [86] M. M. Nerandzic, P. Thota, T. Sankar, A. Jencson, J. L. Cadnum, A. J. Ray, R. A. Salata, R. R. Watkins e C. J. Donskey, “Evaluation of a Pulsed Xenon Ultraviolet Disinfection System for Reduction of Healthcare-Associated Pathogens in Hospital Rooms,” *Infection Control & Hospital Epidemiology*, pp. 192-197, 05 Janeiro 2015.
- [87] C. R. Kovach, Y. Taneli, T. Neiman, E. M. Dyer, A. J. A. Arzaga e S. T. Kelber, “Evaluation of an ultraviolet room disinfection protocol to decrease nursing home microbial burden, infection and hospitalization rates,” *BMC infectious diseases*, pp. 1-9, 3 Março 2017.
- [88] C. McGinn, R. Scott, N. Donnelly, K. L. Roberts, M. Bogue, C. Kiernan e M. Beckett, “Exploring the Applicability of Robot-Assisted UV Disinfection in Radiology,” *Frontiers in Robotics and AI*, pp. 1-12, 06 Janeiro 2021.
- [89] F. Astrid, Z. Beata, V. d. N. Miriam, E. Julia, P. Elisabeth e D. Magda, “The use of a UV-C disinfection robot in the routine cleaning process: a field study in an Academic hospital,” *Antimicrob Resist Infect Control*, pp. 1-10, 29 Maio 2021.
- [90] J.-H. Yang, U.-I. Wu, H.-M. Tai e W.-H. Sheng, “Effectiveness of an ultraviolet-C disinfection system for reduction of healthcare associated pathogens,” *Journal of Microbiology, Immunology and Infection*, pp. 487-493, junho 2019.
- [91] J. M. Boyce, P. A. Farrel, D. Towle, R. Fekieta e M. Aniskiewicz, “Impact of Room Location on UV-C Irradiance and UV-C Dosage and Antimicrobial Effect Delivered by a Mobile UV-C Light Device,” *Infection control & hospital epidemiology*, p. 667–672, Junho 2016.
- [92] L. H. Shen e E. A. Gonzales, “Reducing Hospital-Onset Clostridium Difficile Infections,” em *SHEA Conference*, Denver, 2017.

- [93] K. Bedell, A. H. Buchaklian e S. Perlman, “Efficacy of an Automated Multiple Emitter Whole-Room Ultraviolet-C Disinfection System Against Coronaviruses MHV and MERS-CoV,” *Infection Control & Hospital Epidemiology*, vol. 37, pp. 598-599, 2016.
- [94] V. Masse, M. J. Hartley, M. B. Edmond e D. J. Diekema, “Comparing and optimizing ultraviolet germicidal irradiation systems use for patient room terminal disinfection: an exploratory study using radiometry and commercial test cards,” *Antimicrobial Resistance and Infection Control*, pp. 1-8, 22 Fevereiro 2018.
- [95] J. J. Weirich, “sistema de esterilização para ambientes hospitalares, utilizando radiação uvc,” em *Engenharias mecânica e industrial: tecnologias e tendências em pesquisa*, São Paulo, Editora científica digital, 2022, pp. 169-186.
- [96] UVC Cleaning Systems Inc., “UVC Cleaning Systems M15 Antimicrobial Report,” 05 Dezembro 2014. [Online]. Available: <https://www.uvccleaningsystems.com/pdf/UVC%20Cleaning%20Systems%20M15%20Antimicrobial%20Report%20NG5622%2021NOV2014.pdf>. [Acesso em 22 Novembro 2023].
- [97] UVC Cleaning Systems Inc., “UVC Cleaning Systems M20 Antimicrobial Report,” 03 Dezembro 2014. [Online]. Available: <https://www.uvccleaningsystems.com/pdf/UVC%20Cleaning%20Systems%20M20%20Antimicrobial%20Report%20NG5622%2021NOV2014.pdf>. [Acesso em 22 Novembro 2023].
- [98] Antimicrobial Test Laboratories, “Study Report: Antibacterial Activity and Efficacy Evaluation of UVC Cleaning System's UV Device,” 19 novembro 2014. [Online]. Available: <https://bitly.com/BIJ13B>. [Acesso em 8 outubro 2021].
- [99] M. R. Saad e A. R. , “A Cost Effective UV Robot for Disinfecting Hospital and Factory Spaces for Covid-19 and Other Communicable Diseases,” em *IEEE World AI IoT Congress*, 2021.
- [100] D. Conte, S. Leamy e T. Furukawa, “Design and Map-based Teleoperation of a Robot for Disinfection of COVID-19 in Complex Indoor Environments”.
- [101] S. S. Chempolil, R. M. Basaiawmoit, S. Saji e K. Raj V, “Design of a Medical Prototype Robot for Nurse Assistance,” em *Seventh International conference on Bio Signals, Images, and Instrumentation*, Chennai, India, 2021.
- [102] I. T. Kurniawan e W. Adiprawita, “A Method of Ultraviolet-C Surface Irradiation Simulation and Evaluation,” em *International Symposium on Electronics and Smart Devices*, Bandung, Indonesia, 2021.
- [103] A. Pierson, J. W. Romanishin, H. Hansen, L. Z. Yanez e D. Rus, “Designing and Deploying a Mobile UVC Disinfection Robot,” em *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Praga, República Tcheca, 2021.
- [104] A. E. M. d. Alba, M. B. Rubio, M. E. Morán-Diez, C. Bernabéu, R. Hermosa e E. Monte, “Microbiological Evaluation of the Disinfecting Potential of UV-C and UV-C Plus Ozone Generating Robots,” *Microorganisms*, pp. 1-12, 15 Janeiro 2021.
- [105] S. Perminov, N. Mikhailovskiy, A. Sedunin, I. Okunevich, I. Kalinov, M. Kurenkov e D. Tsetserukou, “UltraBot: Autonomous Mobile Robot for Indoor UV-C Disinfection,” em *International Conference on Automation Science and Engineering*, Lion, França, 2021.
- [106] M. Guettari, I. Gharbi e S. Hamza, “UVC disinfection robot,” *Environmental Science and Pollution Research*, pp. 1-6, 7 outubro 2020.

- [107] L. Tiseni, D. Chiaradia, M. Gabardi, M. Solazzi, D. Leonardis e A. Frisoli, "Algorithm Design and On-Field Measurements to Improve Surface Disinfection Against SARS-CoV-2," *IEEE Robotics & Automation Magazine*, pp. 59-70, Março 2021.
- [108] A. Zaman, M. S. Majib, S. A. Tanjim, S. A. Siddique, S. Islam, S. Aadeeb, N. I. Khan, R. Haque, R. U. Islam, R. F. Faisal, S. Malik e M. N. Islam, "UVC-PURGE: A Novel Cost-Effective Disinfection Robot for Combating COVID-19 Pandemic," *IEEE Access*, pp. 1-22, 13 Abril 2022.
- [109] K. C. Jelden, S. G. Gibbs, P. W. Smith, A. L. Hewlett, P. C. Iwen, K. K. Schmid e J. J. Lowe, "Comparison of hospital room surface disinfection using a novel ultraviolet germicidal irradiation (UVGI) generator," *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, pp. 690-698, 15 Julho 2016.
- [110] M. M. Nerandzic, J. L. Cadnum, M. J. Pultz e C. J. Donskey, "Evaluation of an automated ultraviolet radiation device for decontamination of *Clostridium difficile* and other healthcare-associated pathogens in hospital rooms," *BMC Infectious Diseases*, pp. 1-9, Julho 2010.
- [111] B. Casini, B. Tuvo, M. L. Cristina, A. S. Maria, M. Totaro, A. Baggiani e G. P. Privitera, "Evaluation of an Ultraviolet C (UVC) Light-Emitting Device for Disinfection of High Touch Surfaces in Hospital Critical Areas," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, pp. 1-10, 24 Setembro 2019.
- [112] M. Bentancor e S. Vidal, "Programmable and low-cost ultraviolet room disinfection device," *HardwareX*, pp. 1-13, 30 Outubro 2018.
- [113] W. A. Rutala, M. F. Gergen e D. J. Weber, "Room Decontamination with UV Radiation," *Infection Control and Hospital Epidemiology*, pp. 1025-1029, 31 Outubro 2010.
- [114] M. Lindblad, E. Tano, C. Lindahl e F. Huss, "Ultraviolet-C decontamination of a hospital room: Amount of UV light needed," *Burns*, pp. 842-849, 2 Outubro 2020.
- [115] W. J. Lyslo, M. H. Schwartz e S. B. Pettis, "Hard-Surface Disinfection System". Estados Unidos Patente US 10,568,981 B2, 25 fevereiro 2020.
- [116] Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), "Plugues e tomadas para uso doméstico e análogo até 20 A/250 V em corrente alternada - Padronização," ABNT, Rio de Janeiro, 2021.
- [117] Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), "Instalações elétricas de baixa tensão NBR 5410," ABNT, Rio de Janeiro, 2004.
- [118] Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), "Instalações elétricas de baixa tensão - Requisitos específicos para instalação em estabelecimentos assistenciais de saúde NBR 13534," ABNT, Rio de Janeiro, 2008.
- [119] S.-K. Park, D.-M. Jo, M.-G. Kang, F. Khan, S. D. Hong, C. Y. Kim, Y.-M. Kim e U.-C. Ryu, "Bactericidal effect of ultraviolet C light-emitting diodes: Optimization of efficacy toward foodborne pathogens in water," *Journal of Photochemistry & Photobiology, B: Biology*, pp. 1-8, 21 Julho 2021.
- [120] F. J.-I. A., A. g. Soriano-sánchez, M. R.-I. A. e F. J. Perez-pinal, "Design and Implementation of a Germicidal UVC-LED Lamp," *IEEE Access*, pp. 1-12, 28 Outubro 2020.
- [121] Y. Cao, W. Chen, M. Li, B. Xu, J. Fan e G. Zhang, "Simulation Based Design of Deep Ultraviolet LED Array Module Used in Virus Disinfection," em *21st*

- International Conference on Electronic Packaging Technology*, Guangzhou, China, 2020.
- [122] F. Piva, M. Buffolo, C. D. Santi, G. Meneghesso, E. Zanoni, M. Meneghini e N. Trivellin, “Status of Performance and Reliability of 265 nm Commercial UV-C LEDs in 2023,” *IEEE Transactions on electron devices*, pp. 5696-5700, 11 Novembro 2023.
- [123] T. Mathebula, F. W. Leuschner e S. P. Chowdhury, “The use of UVC-LEDs for the disinfection of Mycobacterium tuberculosis,” em *2018 IEEE PES/IAS PowerAfrica*, Cape Town, Africa do Sul, 2018.
- [124] ams-OSRAM AG, “OSLON® UV 3535,” 18 Dezembro 2023. [Online]. Available: <https://look.ams-osram.com/m/1ac875d09772cda8/original/SU-CULDP1-VC.pdf>. [Acesso em 20 Dezembro 20].
- [125] ams-OSRAM AG, “OSRAM OSLON® UV 3636,” 04 Abril 2023. [Online]. Available: <https://look.ams-osram.com/m/6fa67be33267686f/original/SU-CULDN1-VC.pdf>. [Acesso em 20 Dezembro 2023].
- [126] ams-OSRAM AG, “OSRAM OSLON® UV 6060,” 19 Junho 2023. [Online]. Available: <https://look.ams-osram.com/m/4793fe5b740f812/original/SU-CZHEF1-VC.pdf>. [Acesso em 20 Dezembro 2023].
- [127] Philips lighting, “TUV PL-L 55W/4P HF 1CT/25,” 14 Dezembro 2023. [Online]. Available: https://www.lighting.philips.com.br/api/assets/v1/file/PhilipsLighting/content/fp927908704007-pss-pt_br/Localized_Commercial_Leaflet.pdf. [Acesso em 20 Dezembro 2023].
- [128] Philips lighting, “TUV T8 55W HO 1SL/6,” 4 Setembro 2023. [Online]. Available: https://www.lighting.philips.com/prof/conventional-lamps-and-tubes/special-lamps/purificationwater-and-air/commercial-and-professional-air/tuv-t8/928049504003_EU/product. [Acesso em 13 Setembro 2023].
- [129] Philips lighting, “TUV XPT Amalgama 130W XPT SE UNP/20,” 14 Dezembro 2023. [Online]. Available: https://www.lighting.philips.com.br/api/assets/v1/file/PhilipsLighting/content/fp928101805112-pss-pt_br/Localized_Commercial_Leaflet.pdf. [Acesso em 20 Dezembro 2023].
- [130] S. M. Jacobm e J. S. Dranoff, “Light intensity profiles in a perfectly mixed photoreactor,” *AICHE Jorunal*, pp. 359-363, Maio 1970.
- [131] R. G. Qualls e J. D. Johnson, “Modeling and efficiency of ultraviolet disinfection systems,” *Water Research*, pp. 1039-1046, 1985.
- [132] M. F. Modest, Radiative heat transfer, Nova York: McGraw-Hill, 1993.
- [133] W. Kowalski e W. Bahnfleth, “Effective UVGI System Design Through Improved Modeling,” *ASHRAE Transactions*, p. 106, 2000.
- [134] V. C. d. Santos, R. C. C. Fonseca e D. D. Cardoso, “Fator de visão da radiação: aplicação na determinação da irradiância de lâmpada ultravioleta de bronzamento artificial,” *Revista Militar de Ciência e Tecnologia*, pp. 67-72, 2008.
- [135] J. H. Lienhard IV e J. H. Lienhard V, A heat transfer textbook, Cambridge: Phlogiston Press, 2019.

- [136] A. H. Malayeri, M. Mohseni, B. Cairns e J. R. Bolton, “Fluence (UV Dose) Required to Achieve Incremental Log Inactivation of Bacteria, Protozoa, Viruses and Algae,” *IUVA News*, n° 3, pp. 1-41, 2016.
- [137] C. W. McKinney e A. Pruden, “Ultraviolet disinfection of antibiotic resistant bacteria and their antibiotic resistance genes in water and wastewater,” *Environ. Sci. Technol.*, vol. 46, p. 13393–13400, 2012.
- [138] F. M. Collins, “Relative susceptibility of acid-fast and non-acid-fast bacteria to ultraviolet light,” *Appl. Microbiol.*, vol. 21, n° 3, p. 411–413, 1971.
- [139] N. Storm, L. G. A. McKay, S. N. Downs, R. I. Johnson, D. Birru, M. Samber, W. Willaert, G. Cennini e A. Griffiths, “Rapid and complete inactivation of SARS-CoV-2 by ultraviolet-C irradiation,” *Scientific Reports*, pp. 1-5, 30 Dezembro 2020.