



**Universidade do Estado do Rio de Janeiro**  
Centro de Tecnologia e Ciências  
Instituto de Física Armando Dias Tavares

Roberta Manon de Paula Sales Borges

**Desenvolvimento e caracterização de uma câmara de  
radiação UVC para inativação de microrganismos em superfícies**

Rio de Janeiro

2022

Roberta Manon de Paula Sales Borges

**Desenvolvimento e caracterização de uma câmara de radiação UVC  
para inativação de microrganismos em superfícies**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Física, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Catarine Canellas Gondim Leitão

Coorientador: Prof. Dr. Luís Cristóvão de Moraes Sobrino Pôrto

Rio de Janeiro

2022

CATALOGAÇÃO NA FONTE  
UERJ/ REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/D

B732d Borges, Roberta Manon de Paula Sales .  
Desenvolvimento e caracterização de uma câmara de radiação UVC  
para inativação de microrganismos em superfícies / Roberta Manon de Paula  
Sales Borges. – 2022.  
142 f. : il.

Orientadora: Catarine Canellas Gondim Leitão .  
Coorientador: Luís Cristóvão de Moraes Sobrino Pôrto .  
Dissertação (mestrado) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro,  
Instituto de Física Armando Dias Tavares.

1. Radiação ultra-violeta – Desinfecção e desinfetantes - Teses.  
2. Dispositivos de proteção respiratória – Esterilização – Teses 3. COVID-19  
(Doença) – Equipamento de proteção individual – Desinfecção – Teses.  
I. Leitão, Catarine Canellas Gondim (Orient.) . II. Pôrto, Luís Cristóvão de  
Moraes Sobrino (Coorient.). III. Universidade do Estado do Rio de Janeiro.  
Instituto de Física Armando Dias Tavares. IV. Título.

CDU 535-31:614.48

Bibliotecária: Teresa da Silva CRB7/5209

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta  
dissertação, desde que citada a fonte.

---

Assinatura

---

Data

Roberta Manon de Paula Sales Borges

**Desenvolvimento e caracterização de uma câmara de radiação UVC para inativação de microrganismos em superfícies**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Física, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

Aprovada em 13 de dezembro de 2022.

Banca Examinadora:

---

Prof. Dra. Catarine Canellas Gondim Leitão (Orientadora)  
Instituto de Física Armando Dias Tavares – UERJ

---

Prof. Dr. Luís Cristóvão de Moraes Sobrino Pôrto (Coorientador)  
Instituto de Biologia Roberto Alcântara Gomes – UERJ

---

Prof. Dr. Joaquim Teixeira de Assis  
Instituto Politécnico – UERJ

---

Prof. Dr. Elicardo Alves de Souza Gonçalves  
Instituto Federal do Rio de Janeiro

---

Prof. Dr. Davi Ferreira de Oliveira  
Universidade Federal do Rio de Janeiro

---

Dr. Hamilton Santos Gama Filho  
Instituto de Física Armando Dias Tavares – UERJ

---

Dr. Diogo Santos Silva da Costa  
Brasil. Marinha

Rio de Janeiro

2022

## DEDICATÓRIA

Dedico esta dissertação a todas as mulheres que vieram antes de mim, desbravando e pavimentando o caminho, contribuindo para o desenvolvimento da ciência e a partir das quais foi possível que muitas outras mulheres, como eu, pudessem também ter voz e contribuir para a sociedade.

Dedico a todas as pessoas que buscam construir um mundo para além da norma cis hétero, dos excluídos, dos dissidentes que tudo questionam e se reinventam a cada dia sem medo do novo, divergentes que anseiam as mudanças e buscam um mundo mais igualitário, justo e democrático.

Dedico a todas as pessoas que ao longo da minha história confiaram em mim e contribuíram para que eu chegasse até aqui.

Dedico à minha filha Catarina, aos filhos do coração Sara, Rafaela e Lucas, a todas as crianças e às gerações que estão por vir porque deles é o futuro.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Prof. Dr. Marcelino José dos Anjos por lembrar de mim e me convidar para um novo projeto, dando a oportunidade que eu adquirisse mais conhecimento e desenvolvesse esse trabalho. Obrigada também pela colaboração na construção do equipamento, pelas conversas, pelo incentivo e por acreditar em mim.

À Prof. Dra. Catarine Canellas Gondim Leitão pela parceria, apoio, paciência, presteza, empatia e orientação. Obrigada por compreender as mensagens enviadas tão tarde da noite, pelo voto de confiança e acreditar nesse trabalho. Obrigada por ficar atenta aos detalhes, dar o seu melhor e me dar a liberdade para arriscar.

Ao Prof. Dr. Luís Cristóvão de Moraes Sobrino Pôrto por aceitar uma coorientação de uma aluna de outro instituto da UERJ, a partir de uma apresentação rápida feita numa tarde pandêmica de um projeto audacioso. Aquele projeto foi adaptado, fizemos um protótipo mais simples e agradeço o voto de confiança.

Ao Dr. Hamilton Santos Gama Filho sem o qual esse trabalho não teria acontecido. Obrigada pela parceria, amizade, horas e horas trabalhando na construção da câmara em todas as suas fases, na criação do sistema embarcado – você é pai dele. Obrigada por ser esse parceiro inigualável e incansável na busca de soluções dos problemas conforme apareciam – e não foram poucos. Que possamos trabalhar juntos em muitos outros projetos.

Ao Dr. Diogo Santos Silva da Costa que também foi fundamental para o desenvolvimento do equipamento. Seus conhecimentos em eletrônica e programação foram cruciais para que o projeto saísse do papel e se concretizasse. Obrigada pela amizade, atenção, carinho, sugestões e parceria. Que o destino possa fazer nos caminhos se cruzarem e que possamos trabalhar juntos em outras oportunidades.

A todos os membros do LIETA – técnicos, alunos, professores e colaboradores – que criam um excelente ambiente de trabalho pautado na colaboração mútua, na leveza das relações de trabalho, na descontração e que fazem as horas que passamos dentro do laboratório passarem voando. Sempre com muito café.

Ao Samir e a Ranna por serem sempre tão solícitos e pacientes com as dúvidas em relação à parte burocrática ligada à secretaria da pós-graduação, sobretudo no período da pandemia quando a comunicação sempre feita à distância poderia deixar tudo mais complicado, mas que no final sempre dava certo, com soluções rápidas e simples.

A todos os membros ligados ao Instituto de Física da UERJ – bibliotecários, professores e funcionários – por toda ajuda e conhecimento ensinado desde a minha graduação.

Aos meus pais Kate e Roberto e minhas irmãs Jacqueline e Priscila – eternos admiradores e incentivadores dos meus projetos.

Ao meu companheiro Willians, que me acompanha desde a graduação. Com quem primeiramente compartilho minhas ideias, sempre incentivador e que não mede esforços para que eu alcance meus objetivos.

Ao amigo Luciano que sempre tem um gesto ou uma palavra tranquilizadora nos momentos difíceis, que sempre levanta o meu astral e me acalma. Obrigada pela admiração, apoio, incentivo, carinho e cuidado.

A todos os meus companheiros de jornada da vida, à minha rede de apoio, pessoas amigas e fundamentais que na minha vida, no dia-a-dia, contribuíram enormemente nesses últimos dois anos para que eu pudesse reunir as condições para me expandir e desenvolver um trabalho do qual me orgulhasse. Todos vocês são a minha aldeia.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Não se pode escrever nada com indiferença.

*Simone de Beauvoir*



## RESUMO

BORGES, R. M. P. S. *Desenvolvimento e caracterização de uma câmara de radiação UVC para inativação de microrganismos em superfícies*. 2022. 142 f. Dissertação (Mestrado em Física) - Instituto de Física Armando Dias Tavares, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022.

Este trabalho realizou um estudo sobre o desempenho da radiação UVC na inativação de microrganismos, a partir do desenvolvimento de uma câmara de desinfecção de superfície automatizada com a utilização da radiação UVC. O mapeamento da irradiância no interior da câmara foi realizado para determinar as condições mínimas de operação garantindo desinfecções eficientes. O desenvolvimento de um equipamento próprio, ainda que existam outras opções disponíveis no mercado comercial, atende às demandas específicas de pesquisadores científicos e de profissionais de instituições da área de saúde que podem ser modificadas a qualquer momento. No caso específico da pandemia da COVID-19, a interrupção de cadeias de suprimentos globais levou a um cenário de escassez de EPIs, sobretudo respiradores N95 que são fundamentais para o controle de transmissão de doenças respiratórias. Na pandemia deflagrada em março de 2020, a sociedade se viu mediante a necessidade de reaproveitar respiradores N95 para profissionais da área de saúde e assim estava criado o cenário onde esses EPIs precisavam ser desinfetados para serem reutilizados. Este trabalho, por sua vez, busca desenvolver um sistema formatado para a desinfecção de respiradores N95, de alguns EPIs e de qualquer outro material de interesse que o equipamento comporte em seu interior. A câmara foi projetada para operação otimizada de modo a irradiar o maior número de peças simultaneamente. Para esta finalidade foi projetada uma estrutura no interior dessa câmara com nove eixos em rotação destinados a comportar, no máximo, nove objetos suspensos além de outros que podem ser dispostos na base interna do equipamento. O equipamento é automatizado e conta com uma estrutura eletrônica e uma interface de controle via *WiFi* (2,4 GHz). Foram realizados testes de repetibilidade para avaliar a irradiância em 27 pontos escolhidos em 3 níveis distintos. A partir dessa avaliação, foi feita a caracterização da distribuição do fluxo de energia radiante no interior da câmara por meio de interpolação por *thin-plate splines* e foi identificado o ponto de mínima irradiância no valor de 2,03 mW/cm<sup>2</sup>. Os testes foram realizados com concomitante registro e acompanhamento das variações de temperatura e umidade do ar, uma vez que essas variáveis podem interferir na susceptibilidade dos microrganismos à radiação UVC. A partir de dados disponíveis na literatura que identificam as doses de radiação UVC para inativar o SARS-CoV-2, é possível estimar que a câmara desenvolvida é capaz de inativar o novo coronavírus com menos de 1 minuto de operação.

Palavras-Chave: Desinfecção. Radiação ultravioleta C. Desenvolvimento de equipamento. Instrumentação científica. Instrumentação eletrônica. SARS-CoV-2.

## ABSTRACT

BORGES, R. M. P. S. *Development and characterization of a UVC radiation chamber for the inactivation of microorganisms on surfaces*. 2022. 142 f. Dissertação (Mestrado em Física) - Instituto de Física Armando Dias Tavares, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022.

This work aims to conduct out a study on the performance of UVC radiation in the inactivation of microorganisms, based on the development of an automated surface disinfection chamber using UVC radiation. Irradiance mapping inside the chamber was performed to determine the minimum operating conditions ensuring efficient disinfections. The development of its equipment, even though there are other options available on the commercial market, meets the specific demands of scientific researchers and professionals from institutions in the health area, which can be modified at any time. In the specific case of the COVID-19 pandemic, the disruption of global supply chains has led to a shortage of PPE, especially N95 respirators, which are essential for controlling the transmission of respiratory diseases. In the pandemic that broke out in March 2020, society was faced with the need to reuse N95 respirators for health professionals and thus created the scenario where these PPE needed to be disinfected to be reused. This work, in turn, seeks to develop a formatted system for the disinfection of N95 respirators, other PPE's and any other material of interest that the equipment contains inside. The chamber was designed to operate optimally in order to irradiate the greatest number of parts simultaneously. For this purpose, a structure was designed inside a chamber with nine rotating axes intended to hold a maximum of nine suspended objects, in addition to others that can be placed on the internal base of the equipment. The equipment is automated and has an electronic structure and a control interface via WiFi (2,4 GHz). Repeatability tests were performed to assess irradiance at 27 points chosen at 3 different levels. Based on this evaluation, the distribution of radiant energy flux inside the chamber was characterized through interpolation using thin-plate splines, and the point of minimum irradiance was identified at a value of 2.03 mW/cm<sup>2</sup>. The tests were performed with simultaneous recording and monitoring of changes in temperature and air humidity, since these variables can interfere with the susceptibility of microorganisms to UVC radiation. Based on data available in the literature that identify the doses of UVC radiation to inactivate SARS-CoV-2, it is possible to estimate that the developed chamber is capable of inactivating the new coronavirus in less than 1 minute of operation.

Keywords: Ultravioleta C radiation. Disinfection. Equipment development. Scientific instrumentation. Eletronic instrumentation. SARS-CoV-2.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Mecanismos de penetração do aerossol através das máscaras....	30
Figura 2 – Região do espectro eletromagnético destacando as faixas de UV	33
Figura 3 – Esquema dos níveis de fotoproteção de um vírus envelopado, incluindo envelope e o nucleocapsídeo.....	35
Figura 4 – Variações da susceptibilidade à UV dos vírus em baixa umidade do ar, em alta umidade do ar e na água.....	41
Figura 5 – Comparação dos espectros de resposta para os quatro nucleotídeos principais.....	42
Figura 6 – Comparação dos espectros de absorção de timina e uracila.....	42
Figura 7 – Visão frontal da CHC em construção.....	54
Figura 8 – Processo de revestimento com papel alumínio.....	55
Figura 9 – Câmara com a pintura concluída.....	55
Figura 10 – Distribuição espectral das lâmpadas livres de ozônio.....	56
Figura 11 – Esquema da base da área de irradiação da CHC.....	57
Figura 12 – Visão frontal das lâmpadas UVC instaladas na área de irradiação da CHC.....	57
Figura 13 – Radiômetro MRUR-203.....	58
Figura 14 – Microtubos de aço inox.....	60
Figura 15 – Visão dos ganchos no interior do equipamento.....	60
Figura 16 – Rolamentos.....	61
Figura 17 – Polias utilizadas na estrutura mecânica.....	61
Figura 18 – Correia dentada de 6mm.....	62
Figura 19 – Estrutura de fixação dos eixos das polias GT2.....	62
Figura 20 – Esquema com a indicação das projeções de A a I dos eixos na base da área de irradiação da CHC.....	64
Figura 21 – Polias conectadas ao motor e ao primeiro eixo de rotação.....	65
Figura 22 – Microcontrolador ESP32.....	67
Figura 23 – Módulo <i>step down</i> utilizado na CHC.....	67
Figura 24 – Sensor DHT22.....	68
Figura 25 – Interruptor magnético <i>reed switch</i> e esquema de funcionamento...	69
Figura 26 – <i>Buzzer</i> piezoelétrico.....	71
Figura 27 – Módulo relé de um canal.....	72

Figura 28 – Motor de passo Wotiom, modelo WS23-0150-30-4.....	73
Figura 29 – Driver de Motor TB6560.....	74
Figura 30 – Fita de LED instalada na parte frontal do equipamento.....	75
Figura 31 – Módulo RTC com bateria CR2032 inserida .....	76
Figura 32 – Fonte chaveada.....	77
Figura 33 – Projeto da placa do circuito gerada no aplicativo <i>Fritzing</i> .....	77
Figura 34 – Etapas de fabricação artesanal da placa do circuito da CHC.....	78
Figura 35 – Tela de operação da CHC.....	80
Figura 36 – Interior da câmara com posicionamento do suporte e sensor.....	82
Figura 37 – Esquema dos pontos de mapeamento da irradiância em visão vertical da base da CHC.....	84
Figura 38 – Geometria de iluminação de um plano por uma lâmpada linear.....	86
Figura 39 – Curvas de tendência dos valores teóricos de irradiância no interior da CHC .....	89
Figura 40 – Comparação das curvas dos valores teóricos e dos dados experimentais obtidos para avaliação da estabilização do sensor do radiômetro MRUR-203.....	92
Figura 41 – Curvas dos valores teóricos e dos dados experimentais obtidos para o mapeamento da irradiância no interior da CHC.....	98
Figura 42 – Dispersão dos pontos de irradiância no plano 1 e interpolação por <i>thin-plate spline</i> .....	100
Figura 43 – Mapeamento da irradiância com superfície interpolada e indicação de ponto de mínimo no plano 1.....	101
Figura 44 – Dispersão dos pontos de irradiância no plano 2 e interpolação por <i>thin-plate spline</i> .....	102
Figura 45 – Dispersão dos pontos de irradiância no plano 3 e interpolação por <i>thin-plate spline</i> .....	103
Figura 46 – Mapeamento da irradiância com superfície interpolada e indicação de ponto de mínimo no plano 2.....	104
Figura 47 – Mapeamento da irradiância com superfície interpolada e indicação de ponto de mínimo no plano 3.....	105
Figura 48 – Avaliação e interpolação de dados da variação da temperatura apenas nos pequenos intervalos de operação da CHC.....	109

Figura 49 – Avaliação e interpolação de dados da variação da umidade relativa do ar nos intervalos de operação da CHC.....	111
Figura 50 – Sistema de duas polias conectadas por correia.....	121
Figura 51 – Deslocamento ds de uma polia que gira no sentido horário.....	122

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Indicação percentual dos logs de redução de população microbiana.....	38
Tabela 2 –	Dados de dose de inativação do SARS-CoV-2 relatados pela literatura em 2021.....	45
Tabela 3 –	Linhas de emissão do mercúrio.....	48
Tabela 4 –	Dados de escala, resolução e precisão do radiômetro MRUR-203.....	59
Tabela 5 –	Altura dos planos internos da CHC.....	81
Tabela 6 –	Distâncias entre as lâmpadas e os pontos de medidas.....	85
Tabela 7 –	Valores de irradiância previstos pelo cálculo do parâmetro FRI ordenados do maior para o menor valor no plano 1.....	88
Tabela 8 –	Irradiância média para os pontos mapeados nas três alturas.....	91
Tabela 9 –	Quantidade de medidas de irradiância, temperatura e umidade do ar aferidas nos intervalos avaliados nos testes de repetibilidade....	94
Tabela 10 –	Quantidade de medidas válidas por bateria de medidas com respectivos totais.....	94
Tabela 11 –	Valores de irradiância média por intervalo analisado e por ponto de mapeamento.....	95
Tabela 12 –	Valores de mapeamento da irradiância e respectivos erros associados.....	97
Tabela 13 –	Variação de temperatura nos intervalos de operação da CHC e erros associados.....	108
Tabela 14 –	Variação de umidade do ar nos intervalos de operação da CHC e erros associados.....	109
Tabela 15 –	Doses de referência de inativação do SARS-CoV-2, irradiância considerada e estimativa de tempo de operação da CHC.....	112
Tabela 16 –	Valores de irradiância média por intervalo analisado e por ponto de mapeamento com indicação dos respectivos desvios.....	136
Tabela 17 –	Relação dos materiais utilizados na construção da CHC com os respectivos custos estimados.....	138

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANVISA	Agência Nacional de Vigilância Sanitária
CDC	Centros de Controle e Prevenção de Doenças (Centers for Disease Control and Prevention)
CHC	Câmara Harriette Chick
DNA	Ácido Desoxirribonucleico
ECDC	Centro Europeu de Prevenção e Controle de Doenças (European Centre for Disease Prevention and Control)
EPA	Agência de Proteção Ambiental (Environmental Protection Agency)
EPI	Equipamento de Proteção Individual
EUA	Estados Unidos da América
FRI	Irradiância Radioativa Fracional (Fractional Radiative Irradiance)
HID	Descarga de Alte Intensidade (High Intensity Discharge)
HTML	Linguagem de Marcação de Hipertexto (HyperText Markup Language)
IDE	Ambiente de Desenvolvimento Integrado (Integrated Development Environment)
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IoT	Internet das Coisas (Internet of Things)
LED	Diodo Emissor de Luz (Light-Emitting Diode)
LIETA	Laboratório de Instrumentação Eletrônica e Técnicas Analíticas
UERJ	Universidade do Estado do Rio de Janeiro
MB	Megabyte
MDF	Placa de Fibra de Média Densidade (Medium Density Fiberboard)
NCBI	Centro Nacional de Informações sobre Biotecnologia (National Center for Biotechnology Information)
NIST	Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia (National Institute of Standards and Technology)
OMS	Organização Mundial da Saúde
PTFE	Politetrafluoretileno
PWM	Modulação por Largura de Pulso (Pulse Width Modulation)
PyNNFV	Valor de Frequência do Dinucleotídeo de Pirimidina
RBF	Função de Base Radial (Radial Basis Function)

RNA	Ácido Ribonucleico
RTC	Relógio de Tempo Real (Real Time Clock)
RUV	Radiação ultravioleta
RUVC	Radiação Ultravioleta C
TLV	Valor Limite de Exposição (Theresold Limit Value)
TPS	Thin-Plate Spline
UERJ	Universidade do Estado do Rio de Janeiro
UV	ultravioleta
UVA	ultravioleta A
UVB	ultravioleta B
UVC	ultravioleta C
A	Ampère
cm	centímetro
J/m <sup>2</sup>	Joule por metro quadrado
K	Kelvin
kgf.cm	quilograma força centímetro
min	minuto
mJ/cm <sup>2</sup>	milijoule por centímetro quadrado
mm	milimetro
mW/cm <sup>2</sup>	miliwatt por centímetro quadrado
nm	nanometro
ppm	partes por milhão
V	Volt
W	Watt
W/m	Watt por metro
W/m <sup>2</sup>	Watt por metro quadrado
μJ/cm <sup>2</sup>	microjoule por centímetro quadrado
μm	micrometro
μW/cm <sup>2</sup>	microwatt por centímetro quadrado
°C	grau Celsius



## SUMÁRIO

	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	17
1	<b>REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	21
1.1	<b>Aplicação da RUVC para desinfecção de superfícies e amostras aerossóis</b> .....	21
2	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	27
2.1	<b>Pandemia do SARS-CoV-2 e o controle de transmissão</b> .....	27
2.1.1	<u>Respiradores N95 e PFF2, sua composição e os mecanismos de filtração de micropartículas</u> .....	29
2.2	<b>Radiação UVC e o efeito germicida</b> .....	32
2.2.1	<u>Breve histórico da desinfecção ultravioleta</u> .....	32
2.2.2	<u>Fundamentos da desinfecção por UVC</u> .....	33
2.2.3	<u>Mecanismos de fotoproteção</u> .....	34
2.2.4	<u>Características inerentes e o modelo matemático da desinfecção por UVC</u> .....	36
2.2.5	<u>Características do meio e a desinfecção de superfícies</u> .....	43
2.2.6	<u>Cinética de inativação</u> .....	44
2.2.7	<u>Lâmpadas de UVC</u> .....	47
2.2.8	<u>Radiometria ultravioleta</u> .....	49
2.2.9	<u>Considerações de segurança</u> .....	50
3	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	53
3.1	<b>Estrutura da câmara</b> .....	53
3.1.1	<u>Lâmpadas</u> .....	56
3.1.2	<u>Radiômetro MRUR-203</u> .....	58
3.2	<b>Estrutura mecânica</b> .....	59
3.2.1	<u>Sistema de rolamentos, correias e polias GT2</u> .....	59
3.2.2	<u>Eixo de rotação para desinfecção de máscaras</u> .....	63
3.3	<b>Estrutura eletrônica</b> .....	66
3.3.1	<u>Microcontrolador ESP32</u> .....	66
3.3.2	<u>Sensor de temperatura e umidade do ar: DHT22</u> .....	68
3.3.3	<u>Interruptor magnético <i>reed switch</i></u> .....	69
3.3.4	<u>Buzzer piezoelétrico</u> .....	70

3.3.5	<u>Módulo relé</u> .....	71
3.3.6	<u>Motor de passo</u> .....	72
3.3.7	<u>Driver do motor – TB6560</u> .....	74
3.3.8	<u>Fitas de LED</u> .....	75
3.3.9	<u>Módulo RTC</u> .....	75
3.3.10	<u>Fonte chaveada</u> .....	76
3.3.11	<u>Confecção da placa do circuito</u> .....	77
3.4	<b>Sistema Embarcado</b> .....	78
3.4.1	<u>Sistema de controle</u> .....	79
3.4.2	<u>Interface de operação</u> .....	79
3.5	<b>Tomada de medidas</b> .....	81
4	<b>APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS</b> .....	84
4.1	<b>Irradiância</b> .....	84
4.1.1	<u>Valores esperados</u> .....	84
4.1.2	<u>Valores experimentais: avaliação da estabilidade do sensor do radiômetro</u> .....	89
4.1.3	<u>Valores experimentais: testes de repetibilidade dos valores de irradiância em diferentes intervalos de tempo</u> .....	93
4.1.4	<u>Mapeamento tridimensional da irradiância no interior da CHC</u> .....	96
4.2	<b>Temperatura e Umidade do Ar</b> .....	106
4.3	<b>Inativação do SARS-CoV-2</b> .....	111
	<b>CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS</b> .....	114
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	116
	<b>APÊNDICE A – Transmissão de movimento entre polias</b> .....	121
	<b>APÊNDICE B – Código de programação do sistema de controle da CHC</b> .....	124
	<b>APÊNDICE C – Código de programação da interface de operação da CHC</b> .....	131
	<b>APÊNDICE D – Tabela com os valores de irradiância média com indicação dos desvios</b> .....	136
	<b>APÊNDICE E – Estimativa de Custo da CHC</b> .....	138
	<b>ANEXO A – Manual da lâmpada OSRAM</b> .....	139

## INTRODUÇÃO

Com a pandemia do SARS-CoV-2 e o fechamento de fronteiras por todo o mundo, houve a interrupção das cadeias de suprimento globais de inúmeros insumos nos mais diversos setores da economia. Assim, como já havia sido identificado anteriormente na pandemia de 2009, de H1N1, o surgimento de uma nova emergência sanitária aumenta a demanda de consumo de equipamentos de proteção individual (EPIs) por profissionais de saúde. O número que refletiu a demanda de máscaras N95 em 2009 não é claro nem exato, mas, a escassez desses respiradores foi percebida nos centros médicos e registrado pelo *Centers for Disease Control and Prevention* (CDC). Posteriormente a situação de crise foi avaliada por diferentes estudos que mostraram que a taxa de uso desses EPIs durante a pandemia de H1N1 (2009) foi 51% superior à linha de base histórica de consumo desses equipamentos, por exemplo, na região de Vancouver (COULLIETTE, 2013).

A pandemia da COVID-19, como esperado, aumentou a procura por produtos essenciais. A alta demanda por EPIs para profissionais de saúde criou um cenário de escassez desses equipamentos. Se por um lado, como estratégia de controle de transmissão do SARS-CoV-2 foram realizados diferentes regimes de *lockdown* pelo mundo e fechamento de fronteiras, o resultado imediato dessas medidas é o impacto, mais uma vez, nas cadeias de suprimento e abastecimento globais. O fechamento temporário de fábricas associado às características econômicas da globalização atual que dá preferência por centralizar a produção de insumos em regiões de baixo custo e alta produtividade visando apenas o ganho de competitividade nesses mercados, com a pandemia de 2020 rapidamente fez com que se levantaram dúvidas e desconfiança sobre essa centralização de produção, fazendo surgir o debate a respeito de uma transição para cadeias de suprimento mais sustentáveis e resilientes (SARKIS, 2020).

Enquanto uma parte da sociedade debatia as cadeias de suprimento, o desabastecimento com a pandemia de 2020 já era um cenário de crise real em poucas semanas. Com o número de infecções por SARS-CoV-2 aumentando e levando um grande número de pessoas aos hospitais, a falta de EPIs para profissionais de saúde torna-se um problema chave, uma vez que esses profissionais, em situações de emergência sanitária são os mais demandados. A cada dia, mais e mais pessoas adoeciam infectadas por um novo vírus para o qual havia memória imunológica prévia

e, nesse cenário, era prioridade máxima a disponibilidade de profissionais de saúde habilitados e em condições de segurança para o desempenho de suas atividades de maneira sustentável num panorama de grande imprevisibilidade uma vez que não era possível estimar a duração da pandemia decretada. Dado este cenário de escassez, como medida de contingência para contornar a crise da capacidade de abastecimento de máscaras – respiradores PPF2/N95 – órgãos como o CDC sugeriram tanto o uso prolongado desses EPIs assim como processos de descontaminação, tais como a irradiação ultravioleta e vapor de peróxido de hidrogênio – ainda que essas orientações não se encontrassem em conformidade com as orientações de uso dadas pelos fabricantes (CENTERS FOR DISEASE CONTROL AND PREVENTION, 2020).

A pandemia levou os profissionais de saúde e gestores dos centros médicos a uma situação atípica: ainda que sem protocolos definidos, mas tendo em vista a necessidade emergencial, foi necessário fazer uma flexibilização de normas e boas práticas de segurança. Mas, flexibilizar as orientações dos fabricantes de máscaras N95 ou PPF2 coloca toda a sociedade em uma situação obscura uma vez que não há protocolos ou numerosos estudos robustos que garantam que, por exemplo, esses EPIs possam, de fato, serem reutilizados e por quantas vezes essa reutilização é segura de modo a garantir que profissionais de saúde não fiquem em maior risco e sujeitos à auto contaminação.

Segundo a Organização Mundial da Saúde (2018), desde 1970 mais de 1500 novos patógenos foram descobertos, sendo que, cerca de 70% destes provaram ser de origem animal e, portanto, zoonóticos. Os chamados patógenos zoonóticos são aqueles que migram de reservatórios animais infectando humanos e que segue em transmissão sustentada de humano para humano. O surgimento de um número expressivo de patógenos zoonóticos está intimamente ligado ao estilo de vida atual da humanidade (ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE, 2018). Os efeitos da globalização, o contato constante com animais de criação intensiva, a alta mobilidade das populações e a urbanização crescente produzem um cenário propício para o surgimento de novos vírus com uma propagação rápida e de longo alcance. Assim, um surto, que acontece em uma região geográfica limitada, rapidamente evolui com aumento expressivo no número de casos tornando-se uma epidemia e, uma vez que a doença se espalha por diversos países e continentes, afetando um número ainda maior de pessoas, se estabelece uma pandemia. E a partir desses efeitos da

globalização, avanço territorial sobre os espaços selvagens considerando, ainda, o cenário de mudança climática é possível afirmar que eventos epidêmicos e pandêmicos passam a ser mais prováveis, ainda que não seja possível prever quando acontecerão, a natureza do próximo vírus ou sua origem.

Assim, tendo em vista uma maior ocorrência de surtos, epidemias e pandemias, faz-se necessário que sejam traçadas estratégias não farmacológicas de contenção de transmissão de novos vírus. Em cenários de ausência de medicamentos para tratamentos efetivos de novas doenças e ausência de vacinas é preciso que a sociedade utilize outras formas de controle de transmissão e, nessas situações, a utilização da radiação ultravioleta C é promissora uma vez que seu efeito germicida não apresenta risco químico residual após a irradiação – e desde que sejam considerados os riscos de exposição à UVC e respeitadas as devidas medidas de segurança para este tipo de radiação.

Nesse sentido, o presente trabalho desenvolveu a construção de uma câmara de desinfecção por radiação ultravioleta C – UVC – que atendesse uma demanda emergencial não apenas para o cenário da COVID-19, mas para qualquer surto, nova epidemia ou pandemia que possa nos conduzir a uma nova situação de escassez de equipamentos de proteção individual para profissionais de saúde.

## **Objetivo**

Dado todo o contexto exposto, essa dissertação tem por objetivo construir uma câmara de radiação ultravioleta C para a desinfecção de superfície com suportes suspensos que rotacionam, automatizar o equipamento e mapear a irradiância interna do equipamento.

O desenvolvimento deste trabalho foi dividido entre os seguintes tópicos:

- a) Capítulo 1: Revisão da literatura sobre trabalhos desenvolvidos utilizando a radiação ultravioleta C para desinfecção de superfícies e amostras aerossóis.
- b) Capítulo 2: Fundamentação teórica utilizada para o desenvolvimento deste trabalho.
- c) Capítulo 3: Materiais e metodologia utilizados no desenvolvimento da câmara de radiação ultravioleta C.

- d) Capítulo 4: Apresentação e análise dos resultados.
- e) Conclusões e perspectivas futuras.

## 1 REVISÃO DA LITERATURA

A utilização da radiação ultravioleta para fins germicidas é conhecida e comprovada desde o início do século XX: seja com a aplicação de doses letais para bactérias e fungos ou na inativação de vírus. As ações bactericida, viricida e fungicida da radiação ultravioleta C foram quantificadas respectivamente a partir de trabalhos científicos realizados entre os anos 1927 e 1929 em trabalhos de Bedford (1927), Rivers e Gates (1928) e Gates (1929). Desde então, diversos estudos foram realizados com diferentes esquemas experimentais para a identificação das doses letais e de inativação de microrganismos em meio aquoso, em superfícies ou no ar.

### 1.1 Aplicação da RUVVC para desinfecção de superfícies e amostras aerossóis

Nesse capítulo serão apresentados trabalhos sobre a aplicação da RUVVC para desinfecção de superfícies e amostras aerossóis, artigos estes que ampararam a idealização do equipamento que é objeto de estudo dessa dissertação, assim como estudos a respeito da inativação de microrganismos demonstrando a eficácia da utilização da radiação UVC germicida.

Ko *et al.* (2000) construíram uma câmara onde bactérias *Serratia marcescens* e *Mycobacterium bovis* BCG foram aerolizadas e expostas às diferentes irradiâncias de UVC e em diferentes intervalos de tempo. As amostras aerolizadas foram recolhidas em um coletor Andersen para avaliação de crescimento dos microrganismos em culturas de modo a identificar a fração sobrevivente à irradiação aplicada. As doses aplicadas variaram de 57 a 829  $\mu\text{J}/\text{cm}^2$  e o percentual de sobreviventes de ambos os microrganismos mostraram que a bactéria *Serratia marcescens* é mais susceptível à radiação UVC do que a bactéria BCG sob determinadas condições. Pelo menos 95% das partículas aerossóis se encontravam no intervalo de 1,1 a 4,7  $\mu\text{m}$  de diâmetro, mas essas partículas tinham o tamanho aumentado na medida em que também aumentava a umidade do ar. Para os maiores valores de umidade do ar foram observadas reduções mais significativa da susceptibilidade de *Serratia marcescens* quando comparado com a taxa de sobreviventes para irradiações realizadas em baixa umidade do ar. O estudo mostrou que diferentes doses de radiação, a espécie do microrganismo, o tamanho da

partícula aerossol e a umidade do ar afetaram a susceptibilidade das bactérias estudadas.

Lai *et. al* (2003) construíram um esquema experimental para avaliar a influência de fatores ambientais na susceptibilidade da bactéria *Serratia marcescens* à radiação UVC quando aerolizada a partir de cinco diferentes meios: água destilada, tampão fosfato, 10% de soro fetal bovino, tampão fosfato-salino e saliva sintética (uma mistura de tampão fosfato-salino e soro fetal bovino). Foi verificado que à baixa umidade (36%) *S. marcescens* aerolizada a partir de água foi a que apresentou maior susceptibilidade à radiação UVC, seguida da aerolização a partir de soro fetal. A bactéria aerolizada a partir dos demais meios apresentou similar susceptibilidade à radiação UVC. Foi observado ainda que com o aumento da umidade do ar (68%), o tamanho das partículas aerossóis aumentou enquanto que a susceptibilidade da bactéria à radiação UVC reduziu e que esses fatores também estavam correlacionados ao meio a partir do qual o microrganismo foi aerolizado. O estudo concluiu que a escolha do meio de suspensão influencia tanto o tamanho do aerossol quanto a susceptibilidade da *S. marcescens* à radiação UVC.

Tseng e Li (2005) criaram um aparato experimental, uma câmara para teste em laboratório para estudar e avaliar a efetividade da radiação UVC na inativação de vírus com diferentes tipos de ácido nucleico. Foram irradiadas amostras aerossóis de vírus de DNA e RNA de fita simples e vírus de DNA e RNA de fita dupla. As doses ( $D_{90}$ ) aferidas para inativação de pelo menos 90% das amostras foram de 339 a 423  $\mu\text{J}/\text{cm}^2$  para vírus de RNA de fita simples; 444 a 494  $\mu\text{J}/\text{cm}^2$  para vírus de DNA de fita simples; 662 a 863  $\mu\text{J}/\text{cm}^2$  para vírus de RNA de fita dupla e 910 a 1196  $\mu\text{J}/\text{cm}^2$ . Para inativação de 99% das amostras a dose necessária foi de duas vezes o valor da dose  $D_{90}$ . O estudo conclui que vírus aerotransmissíveis de ácido nucleico de fita simples são mais susceptíveis à inativação por UVC do que aqueles que possuem RNA e DNA de fita dupla. Verificaram ainda que a dose de inativação em umidade do ar a 85% era maior que a dose necessária e suficiente para inativação à umidade do ar de 55%. Portanto, foi identificado que a susceptibilidade dos vírus estudados diminuiu com o aumento da umidade do ar.



McDevitt *et al.* (2007) interessados na transmissão de varíola e na sua utilização como potencial arma biológica propuseram a utilização da radiação UVC em prédios públicos como mecanismo primário de contenção de agentes biológicos. Tendo em vista esse cenário, construíram uma câmara de bancada para exposição de amostras aerossóis do vírus vaccínia às doses de UVC que variaram entre 0,1 a 3,2 J/m<sup>2</sup>, três diferentes valores de umidade do ar (20%, 60% e 80%) e aerolização a partir de meio aquoso e de fluido respiratório sintético. A dose-resposta foi que a susceptibilidade do vírus vaccínia aumenta conforme decresce a umidade do ar. Neste estudo não foi observada correlação entre o tamanho da partícula viral e a susceptibilidade do vírus vaccínia à UVC.

Tseng e Li (2007) construíram um esquema experimental para desinfecção de microrganismos em superfícies em meio com base gelatinosa onde as amostras virais foram dispostas. Diferentes vírus foram avaliados e categorizados de acordo com o tipo de ácido nucleico. Foi observado que os vírus de DNA e RNA de fita simples demandaram uma dose menor de inativação do que os vírus de DNA e RNA de fita dupla. Foram ainda testadas doses em diferentes valores de umidade relativa do ar e foi aferido que para inativação de vírus em superfícies quanto maior a umidade do ar, menor a susceptibilidade dos microrganismos estudados à inativação por radiação UVC.

Walker e Ko (2007) idealizaram e construíram um aparato experimental para medir a susceptibilidade de vírus em amostras aerossóis que foram submetidas a diferentes doses de radiação UVC e predeterminados níveis de umidade do ar. Os vírus analisados foram bacteriófago MS2, adenovírus e MHV coronavírus. Nesse estudo foram caracterizadas as susceptibilidades dos microrganismos assim como foi verificado que tanto o MS2 quanto o adenovírus se mostraram resistentes à desinfecção no ar com uma taxa de desinfecção menor que 1 log de redução de aerossol viral viável quando submetidos à dose de 2608 µJ/cm<sup>2</sup>. Foi verificado que a susceptibilidade do MHV coronavírus aerolizado era entre 7 a 10 vezes maior que a susceptibilidade do MS2 e adenovírus aerossol. O estudo confirmou também que a taxa de desinfecção é dependente do meio – os resultados mostraram que a susceptibilidade viral à UVC é maior em aerossóis virais do que em suspensões virais líquidas.

Kowalski (2009) fez uma revisão bibliográfica extensa a respeito da utilização da radiação UVC na inativação de microrganismos: vírus, bactérias e fungos em diferentes meios (ar, água e superfície). Em seu livro compila a origem histórica da utilização da radiação UVC para fins germicidas, a teoria de inativação e seus processos moleculares, a modelagem matemática envolvida e tipos de sistemas de aplicação.

McDevitt *et al.* (2015) utilizaram a bancada confeccionada para a avaliação do vírus vaccínia em 2007 para aferir a susceptibilidade do vírus influenza, H1N1, à radiação UVC. A susceptibilidade viral foi avaliada mediante a aplicação de doses que variaram de 4 a 12 J/m<sup>2</sup> em três diferentes níveis de umidade do ar (25%, 50% e 70%). O estudo mostra que os valores de susceptibilidade do vírus influenza à radiação UVC aumentam conforme diminui a umidade do ar.

Welch *et al.* (2018) construíram uma câmara de bancada para avaliação da radiação UVC conhecida como UVC distante, a qual apresenta comprimento de onda de 222 nm. Os estudos anteriores apresentados utilizaram radiação de comprimento de onda de 254 nm, que possui efeito carcinogênico e cataratogênico. O estudo aponta que, em contraste, a radiação de comprimento de onda de 222 nm eficientemente inativa bactérias resistentes a medicamentos sem aparentemente causar dano ao tecido de mamíferos. Especificamente o estudo mostrou que a UVC distante é eficiente também na inativação de amostras de vírus H1N1 aerolizado e indicam a baixa dose de 2 mJ/cm<sup>2</sup> como suficiente para inativação de pelo menos 95% da amostra viral inicial aerolizada. Apontaram a utilização da radiação UVC distante como uma opção promissora e segura na redução de propagação de doenças aera transmissíveis.

Biasin *et al.* (2021) avaliaram o efeito da radiação UVC, com diferentes doses, em diferentes concentrações de SARS-CoV-2 *in vitro*. A dose de 3,7 mJ/cm<sup>2</sup> foi suficiente para atingir 3 logs de redução nos lisados celulares irradiados de concentração intermediária (MOI = 5), sem sinal de replicação viral posterior. O estudo indicou que a completa inativação do vírus se deu com uma dose de 16,9 mJ/cm<sup>2</sup> para a maior concentração analisada (MOI = 1000).

Ma *et al.* (2021) determinaram a inativação do SARS-CoV-2 em solução aquosa a partir da irradiância de comprimentos de onda de UVC de 222 a 282 nm usando uma lâmpada de cloreto de criptônio (KrCl), uma lâmpada de vapor de mercúrio de baixa pressão e de dois diodos emissores de UVC. Mostraram que a lâmpada de KrCl apresentou a maior taxa de inativação, sendo a constante de inativação  $k$  obtida no valor de  $1,52 \text{ cm}^2/\text{mJ}$ . A boa performance da lâmpada de KrCl é promissora porque emite UVC de comprimento de onda de 222 nm, que é considerado um comprimento de onda seguro para ser utilizado em espaços ocupados. Usando uma fonte de lâmpada de mercúrio de baixa a pressão, a dose de inativação foi de  $1,30 \text{ mJ}/\text{cm}^2$  e suficiente para a provocar a redução de 1 log na amostra de SARS-CoV-2 irradiada.

Ruetalo *et al.* (2021) investigaram a exposição do SARS-CoV-2 à RUVVC e determinaram as doses de redução e inativação usando uma câmara de desinfecção por UVC comercial alemã chamada *Soluva pro* que emite 254 nm de comprimento de onda. Verificaram que uma dose de  $1,75 \text{ mJ}/\text{cm}^2$  são suficientes para atingir uma inativação de 93% e que uma dose de  $3,50 \text{ m}/\text{cm}^2$  provoca 6 logs de redução em títulos virais irradiados.

Bello-Perez *et al.* (2022) fizeram um estudo sobre a eficiência e métodos rápidos de desinfecção de superfícies contaminadas com três diferentes coronavírus humanos (HCoV-229E, MERS-CoV e SARS-CoV-2) utilizando uma fonte ultravioleta de xenônio pulsado (PX-UV). Compararam a eficácia da inativação utilizando PX-UV ao uso das lâmpadas UVC convencionais de mercúrio de baixa pressão. Nas condições experimentais desta pesquisa, a luz PX-UV inativou os CoVs provocando 3,8 logs de redução nas superfícies irradiadas por 4 minutos, com a fonte posicionada a uma distância de 1,5 m e uma dose acumulada de UVC de  $5,402 \text{ mJ}/\text{cm}^2$ . Por outro lado, a utilização de uma lâmpada convencional de mercúrio de baixa pressão, no mesmo intervalo de 4 minutos provocou 1,9 logs de redução nas amostras irradiadas, com a fonte de UVC posicionada a 2 m e com dose acumulada de  $5,634 \text{ mJ}/\text{cm}^2$ .

Gracheva *et al.* (2022) demonstram que a RUVVC inativa a infectividade do SARS-CoV-2 preservando sua morfologia, propriedades antigênicas e capacidade de induzir a produção de anticorpos neutralizantes de vírus em camundongos por meio de imunização. Assim, a inativação UV do SARS-CoV-2 possibilita a obtenção

de material viral semelhante em suas propriedades antigênicas e imunogênicas ao antígeno nativo, que pode ser utilizado tanto para o desenvolvimento de sistemas de testes diagnósticos quanto para o desenvolvimento de uma vacina inativada contra a COVID-19. Nesse estudo amostras aquosas de SARS-CoV-2 em placas de Petri foram irradiadas com o comprimento de onda de 253,7 nm produzido por uma lâmpada de mercúrio de baixa pressão e uma irradiância de 0,29 mW/cm<sup>2</sup>. Com 30 segundos de irradiação e uma dose de 8,7 mJ/cm<sup>2</sup> foi possível observar uma redução de 2 logs da amostra inicial. Dois minutos de exposição à RUV da lâmpada de mercúrio nas mesmas condições experimentais produziram, por sua vez, uma redução de 4 log da amostra controle.

## **2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

Neste capítulo serão apresentadas a contextualização da pandemia do SARS-CoV-2 e a sua transmissão, além da fundamentação teórica sobre a radiação UVC e seu efeito germicida, a modelagem matemática envolvida, o funcionamento das lâmpadas UVC, sua radiometria e condições de segurança necessárias para operação.

### **2.1 Pandemia do SARS-CoV-2 e o controle de transmissão**

O século XXI se inicia e em apenas duas décadas o mundo presenciou o surgimento de vários surtos, epidemias e duas pandemias. Em 2009, a propagação do vírus H1N1 provocou a primeira pandemia desse século e dez anos depois, em dezembro de 2019, o mundo viu surgir um novo vírus, o SARS-CoV-2, causador da COVID-19. Rapidamente, o novo vírus se espalhou pelo mundo fazendo com que a Organização Mundial da Saúde (OMS) decretasse em 11 de março de 2020 a segunda pandemia do século (ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE, 2020a).

Ainda que a segunda metade do século XX tenha sido caracterizada pelo intenso desenvolvimento de vacinas, fármacos, tratamentos e tecnologias, o mundo permanece vulnerável a doenças infecciosas. Considerando as epidemias e pandemias entre os anos de 2001 e 2020, tivemos sete eventos virais de origem zoonótica: SARS-CoV-1 (2003), H5N1 (2004), H1N1 (2009), MERS-CoV (2012), H7N9 (2013), Ebola (2014) e SARS-CoV-2 (2019).

Ao longo de 2020, o SARS-CoV-2 se mostrou um vírus de rápida transmissão, com sintomas iniciais semelhantes à gripe. Com o passar dos meses, a COVID-19 passou a ser entendida como uma doença sistêmica (CAMPOS, 2020), com múltiplas rotas de transmissão: contato direto, contato indireto, grandes gotículas e aerossóis – sendo algumas rotas mais prevalentes e eficientes dependendo das condições ambientais (ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE, 2020b).

Portanto, com base em práticas já conhecidas para o controle de transmissão de doenças respiratórias e, tendo em mente as possíveis rotas de transmissão do SARS-CoV-2, fica estabelecido que para um efetivo controle da disseminação do vírus faz-se necessária a implantação dos seguintes protocolos sanitários: distanciamento

social, higienização, utilização de barreiras (máscaras e óculos) e ventilação (em ambientes internos).

O SARS-CoV-2, responsável pela COVID-19, é o sétimo coronavírus documentado que causa infecções em humanos. Com a decretação da pandemia, em março de 2020, as primeiras orientações dadas por diferentes países e principais organizações, tais como a OMS, o CDC e o ECDC, estipularam que as principais rotas de transmissão da doença ocorriam através de grandes gotículas, contato direto ou fômites. A exceção foi a China que estipulou a rota aérea como via possível de transmissão (TANG, 2020).

Com o passar dos meses e o concomitante crescimento de evidências de que a transmissão por aerossóis do SARS-CoV-2 era plausível em condições favoráveis – em particular em ambientes fechados, com pouca ventilação e longa exposição a altas concentrações de aerossóis – fez com a OMS e outras agências revisassem suas orientações iniciais (ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE, 2021; EUROPEAN CENTRE FOR DISEASE PREVENTION AND CONTROL, 2021; CENTERS FOR DISEASE CONTROL AND PREVENTION, 2021).

Os aerossóis são gotículas com tamanho inferior a 100  $\mu\text{m}$  (TANG, 2021) e são expelidos pelas pessoas quando elas respiram, falam, cantam, tosse e espiram. São produzidos ao longo de todo o sistema respiratório: pelos pulmões, brônquios, pela vibração da laringe e pelo movimento de articulação oral durante a fala (MORAWSKA, 2020). São produzidos nos mais diversos tamanhos na faixa 0,2 a 100  $\mu\text{m}$  (MARR, 2020). Cabe ressaltar que o tamanho estimado do SARS-CoV-2 é de aproximadamente 0,1  $\mu\text{m}$  e que quando é expelido, assim como qualquer vírus respiratório, é lançado em gotículas juntamente com água, sal e muco.

A transmissão por aerossóis, por exemplo, é a explicação mais plausível para diversos surtos registrados em várias localidades. É interessante destacar dois casos: o surto em um *Call Center* da Coreia do Sul em 08 de março de 2020 (PARK, 2020) e o surto ocorrido durante um ensaio de coral em *Skagit Valley*, Washington nos EUA em 10 de março de 2020 (MILLER, 2020). A conclusão de que a transmissão por aerossol é prevalente em ambos os casos se dá na medida em que é muito improvável a explicação por outras rotas de transmissão (MARR, 2020). A quantidade de aerossóis emitida é elevada durante eventos de intensa vocalização (ASADI, 2019) como no caso do *Call Center* e no caso do ensaio de coral provocando saturação

desses aerossóis no ambiente aumentando expressivamente a probabilidade de contaminação em ambientes com ventilação insuficiente (MARR, 2020).

É preciso destacar que diferentemente do SARS-CoV-1 e do MERS-CoV, o SARS-CoV-2 é transmitido por pessoas pré-sintomáticas e assintomáticas. Portanto, além da concentração de aerossóis, outro fator a ser considerado é o tamanho dessas partículas produzidas pelas pessoas em todas as atividades respiratórias (respirar, falar, cantar, tossir, espirrar). Como os processos de respiração e fala ocorrem mais frequentemente do que tosse ou espirro, essas atividades têm um papel crítico na transmissão do vírus, em particular nos casos pré-sintomáticos e assintomáticos. A tosse, por exemplo, produz cerca de 3000 gotículas enquanto o espirro produz cerca de 40000 sendo que a maioria dessas gotículas são pequenas, na faixa dos aerossóis entre 1 e 10  $\mu\text{m}$  enquanto que a respiração normal e falar, por sua vez, produzem majoritariamente aerossóis menores que 1  $\mu\text{m}$  (TANG, 2020).

Ainda que a maior parte dos aerossóis tenha tamanho inferior a 10  $\mu\text{m}$ , há partículas maiores produzidas que podem alcançar até 100  $\mu\text{m}$ . Mas, diferentes faixas de comprimentos de aerossóis se comportam de maneira distinta: as partículas menores até 10  $\mu\text{m}$  podem ficar suspensas no ar por horas, enquanto que as partículas maiores, na faixa de 50 a 100  $\mu\text{m}$ , se comportam como projéteis balísticos e rapidamente se depositam no solo.

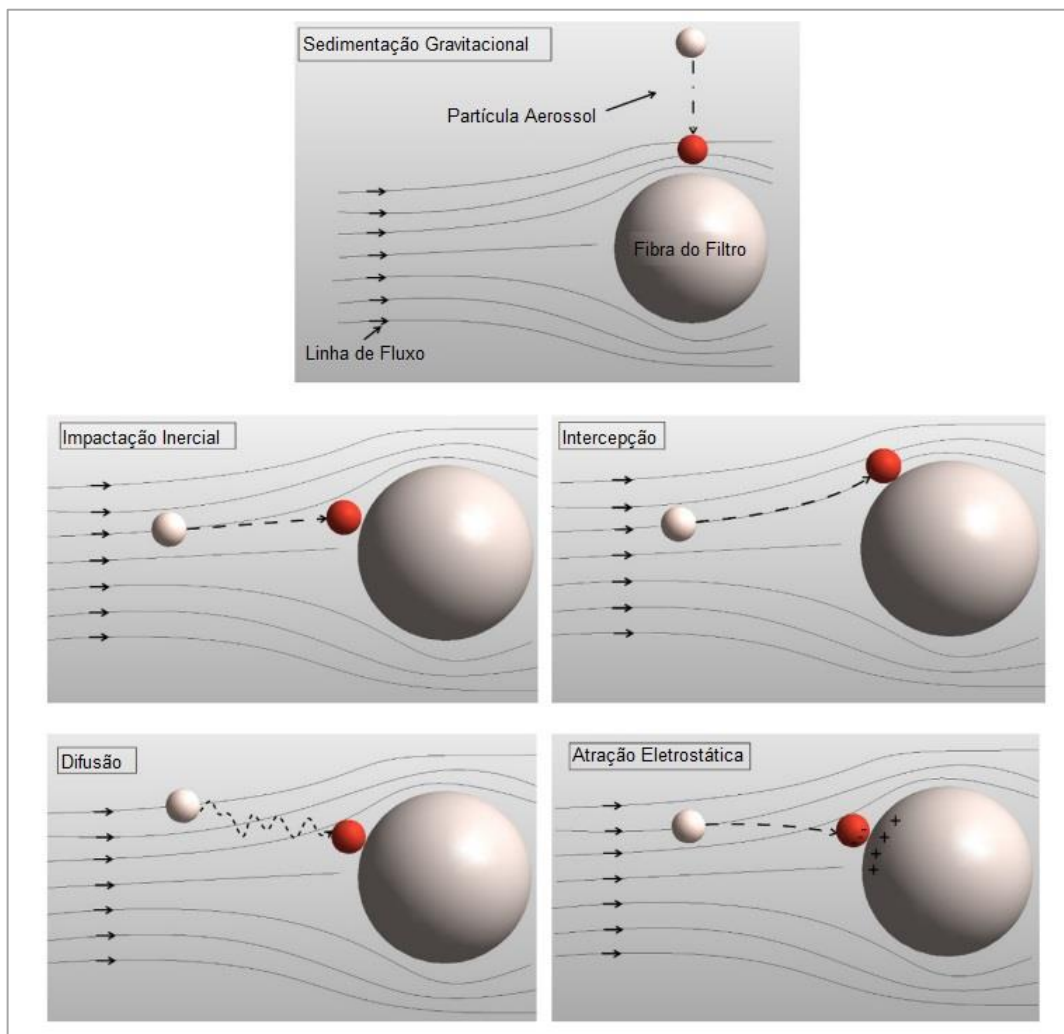
### 2.1.1 Respiradores N95 e PFF2, sua composição e os mecanismos de filtração de micropartículas

Em um cenário de doença infecciosa de transmissão aérea, equipamentos de proteção respiratória são cruciais para limitar a transmissão da doença entre toda a população assim como proteger os profissionais de saúde. Respiradores do tipo N95, que é um padrão adotado nos Estados Unidos, são capazes de capturar pelo menos 95% das partículas com, no mínimo, 0,3  $\mu\text{m}$  de diâmetro. Já os respiradores do tipo FFP2, que é o típico equipamento de proteção individual europeu e equivalente ao respirador N95, apresentam eficiência de 94% (AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA, 2021). Os respiradores identificados como KN95 correspondem ao equivalente chinês dos equipamentos PFF2 e N95 e também apresentam eficiência de 95% para as partículas de, pelo menos 0,3  $\mu\text{m}$ .

Assim, dada a capacidade de filtração desses respiradores, o objetivo principal da utilização desses equipamentos relaciona-se à prevenção de inalação assim como o aprisionamento em suas camadas de partículas aerotransportadas e organismos biológicos transmissíveis pelo ar (bactérias, vírus, príons e fungos).

O SARS-CoV-2 tem se mostrado com transmissão mais eficiente e prevalente pelo ar (GREENHALGH, 2021). Portanto, um cenário de doença respiratória demanda utilização de respiradores (EPIs) com capacidade adequada de filtração. A captura de aerossóis e de partículas contidas do fluxo de ar pelas fibras de máscaras e respiradores ocorrem por diferentes mecanismos como sedimentação gravitacional, impactação inercial, interceptação, difusão e atração eletrostática (TCHARKHTCHI, 2021).

**Figura 1 – Mecanismos de penetração do aerossol através das máscaras.**



Fonte: TCHARKHTCHI, 2021, p.113. Adaptado pela autora.



A sedimentação gravitacional é predominante em partículas entre 1 e 10  $\mu\text{m}$ , pois, estas são grandes o suficiente para atingirem as fibras dos respiradores ficando aderidas nelas, após a ação gravitacional predominante e ao movimento de queda. A impactação inercial ocorre quando partículas com tamanho em torno de 1  $\mu\text{m}$  possuem inércia suficiente para se desprenderem da corrente de fluxo de ar, atingirem as fibras do material e ficarem nelas aderidas. A interceptação afeta partículas de 0,6 a 1  $\mu\text{m}$  e acontece quando a partícula segue o fluxo de ar ao redor da fibra e se deposita nela.

A difusão é o mecanismo predominante para partículas menores que 0,2  $\mu\text{m}$ , escala do movimento Browniano quando essas partículas se movimentam de forma aleatória, o que aumenta a probabilidade de colisões com as fibras. O movimento aleatório das partículas de tamanho igual ou inferior a 0,2  $\mu\text{m}$  aumenta o tempo de permanência dessas partículas no meio, o que por sua vez aumenta a eficiência de filtração para esses tamanhos. A atração eletrostática possui efetividade para uma variedade de tamanho de partículas e é um método empregado em respiradores de maior eficiência tais como N95 e PFF2. A presença de fibras carregadas atrai partículas de todos os tamanhos.

Vale destacar que para toda máscara existe um tamanho de partícula mínimo para o qual a eficiência de filtragem também é mínima – a chamada *Most Penetrating Particle Size (MPPS)*. Em máscaras não carregadas eletrostaticamente, esse tamanho está em torno de 0,3  $\mu\text{m}$  e para respiradores carregados padrão N95 está em torno de 0,05  $\mu\text{m}$  (MARTIN, 2014).

Para compor as fibras presentes em respiradores e máscaras são utilizados diversos polímeros tais como polipropileno, polietileno, poliésteres, poliamidas, policarbonatos, óxido de polifenileno. A preferência pelas fibras de polipropileno (PP) se dá devido as suas propriedades não absorventes e, conseqüentemente não absorve umidade do ar. A capacidade de filtragem dos respiradores assim, também é definida pela pelas propriedades dos materiais usados na constituição das fibras, assim como a espessura e a densidade das camadas utilizadas na composição desses equipamentos.

## 2.2 Radiação UVC e o efeito germicida

### 2.2.1 Breve histórico da desinfecção ultravioleta

As primeiras observações do efeito germicida da radiação ultravioleta ocorreram no século XIX. Kowalski (2009) indicou como primeiro trabalho científico a avaliação feita por Downes e Blunt em 1877 na qual reportaram a inativação de bactérias pela luz do Sol. Em seguida, citou outros trabalhos ainda do século XIX que demonstravam que raios do espectro UV provenientes de lâmpadas de arco eram letais a bacilos, como no caso do *Bacillus anthracis* e, m trabalho publicado por Ward em 1892 e no caso do caso do *Bacillus typhosus* verificado no estudo de Geisler, trabalho datado também de 1892. O espectro em torno de 250 nm foi identificado como germicida por Barnard e Morgan em 1903 e já em 1906 a radiação UV é utilizada, pela primeira vez, para desinfecção de água. Entre os anos de 1909 e 1910 é utilizada e radiação UV para desinfecção de sistemas de água na França na cidade de Marseilles. Aplicações semelhantes em sistemas de água começam a ser vistos nos EUA em 1916.

Entre 1927 e 1929, as ações bactericida, viricida e fungicida da radiação UV foram, pela primeira vez, quantificadas nos trabalhos de Bedford (1927), Rivers e Gates (1928) e Gates (1929). Aplicações em locais públicos começam a acontecer a partir da década de 1930: sistemas de UV são instalados em hospitais para controle de infecções. Nos anos 40 é idealizada e publicada a primeira aplicação de um sistema de desinfecção de ar acoplado a sistemas de ventilação e são registradas tentativas da aplicação da UV para controle de surto de sarampo em escolas e controle de infecções respiratórias em quartéis.

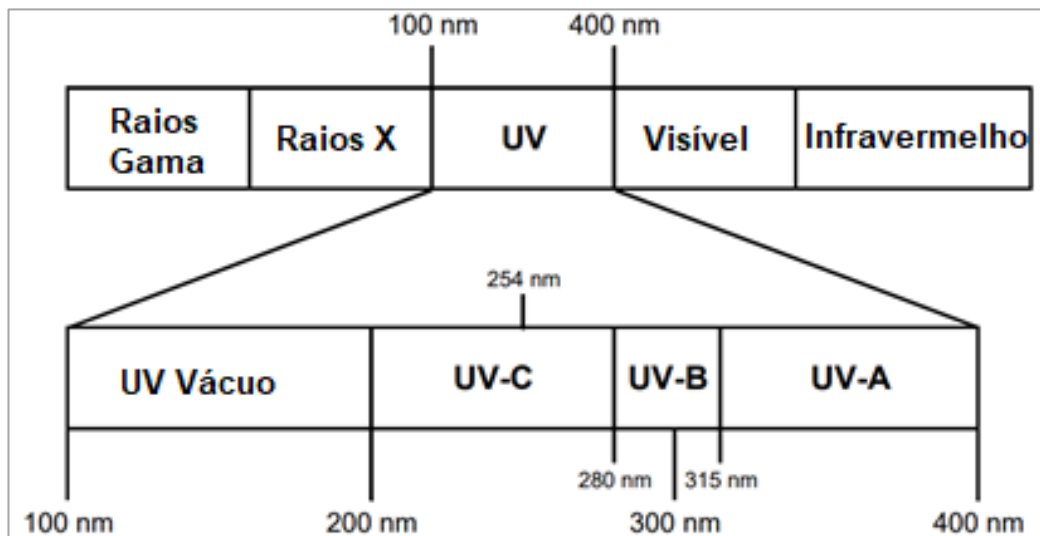
A segunda metade do século XX é relatada por Kowalski (2009) como um período no qual a desinfecção por irradiação UV está bem estabelecida e sistemas comerciais de desinfecção são inicialmente produzidos e vendidos por grandes empresas, tais a General Electric. E ao longo do século XX e nessas duas décadas do século XXI, diversos trabalhos foram desenvolvidos para a identificação das doses de letalidade e inativação de diversas espécies de vírus, bactérias e fungos. Mas, apesar de sistemas de desinfecção por UVC serem utilizados em hospitais desde 1936, somente em 2003 que o CDC reconheceu que os sistemas de UV são efetivos e que podem ser usados em hospitais como complemento de outros sistemas de

limpeza de ar. Foi somente, também, em 1994 que o CDC reconheceu a efetividade da utilização da radiação UVC para controle de surtos de tuberculose.

### 2.2.2 Fundamentos da desinfecção por UVC

O espectro de radiação ultravioleta pode ser dividido em quatro faixas de comprimentos de ondas: UVA de 315 a 400 nm, UVB de 280 a 315 nm, UVC de 200 a 280 nm e UVV de 100 a 200 nm. Todos os comprimentos de onda da radiação ultravioleta (RUV) causam efeitos fotoquímicos, entretanto, comprimentos de onda na faixa da UVC (200 a 280 nm) são tanto prejudiciais às células humanas quanto aos microrganismos (vírus, bactérias, fungos e protozoários) porque são absorvidos por proteínas e ácidos nucleicos (RNA e DNA) provocando danos ao material genético.

**Figura 2 – Região do espectro eletromagnético destacando as faixas de UV.**



Fonte: ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 2006. Adaptado pela autora.

A interação da radiação UVC com a matéria se dá por meio de excitação de tal forma que a energia quantizada dos fótons interagentes é absorvida, provocando transições eletrônicas nos orbitais (atômicos ou moleculares). Nesse processo de transferência de energia, chamado fotossensibilização, fotoprodutos são criados, tais como fotodímeros, hidratos, adutos e ligações do tipo *cross-linking*.

O principal fotoproduto resultado do processo de fotossensibilização dos ácidos nucleicos é formação de dímeros de pirimidinas (preferencialmente de timinas no DNA e de uracilas no RNA). Pirimidinas são estruturas orgânicas que eficientemente

absorvem a radiação UVC, pois possuem grandes orbitais  $\pi$  deslocalizados, que fazem com que toda a estrutura da base nitrogenada funcione como cromóforo absorvendo a energia no comprimento da onda incidente (CUTLER, 2011). Vale ressaltar que um orbital  $\pi$  é a componente orbital ligante de uma ligação  $\pi$  e que orbitais  $\pi$  deslocalizados acontecem em ligações conjugadas, o que implica que os elétrons são compartilhados por mais de dois átomos da molécula, provocando uma alteração da densidade eletrônica e, conseqüentemente na distribuição de probabilidade nesses orbitais.

Assim, o fóton da radiação UVC ao interagir com as pirimidinas tem a sua energia convertida em energia vibracional e em muitos modos de vibração que se estendem por toda a molécula (OKUNO, 2005). Se a energia vibracional é suficiente, o orbital passa para um estado eletrônico instável. Essas vibrações provocam a transição de um elétron de orbital  $\pi$  ligante para um orbital  $\pi^*$  antiligante, que enfraquece a ligação e, ao mudar de orbital, a excitação leva ao desemparelhamento dos elétrons. Assim, a radiação UVC excita a molécula provocando transição eletrônica: o orbital molecular passa do estado de singleto fundamental para o estado de singleto excitado e se o tempo de permanência do elétron no estado de singleto excitado é longo o suficiente, ocorre uma inversão do spin e o elétron passa ao estado de tripleto. Os dímeros de pirimidinas são formados tendo como produto intermediário uma pirimidina no estado tripleto que se torna capaz de reagir criando uma ligação covalente com a pirimidina adjacente. A dimerização é, portanto, um dano ao material genético e estas lesões impedem a transcrição e replicação e, em última análise, levam à inativação dos microrganismos. Teoricamente cada espécie deve ter uma taxa característica da inativação que é função da probabilidade de dimerização. (KOWALSKI, 2009).

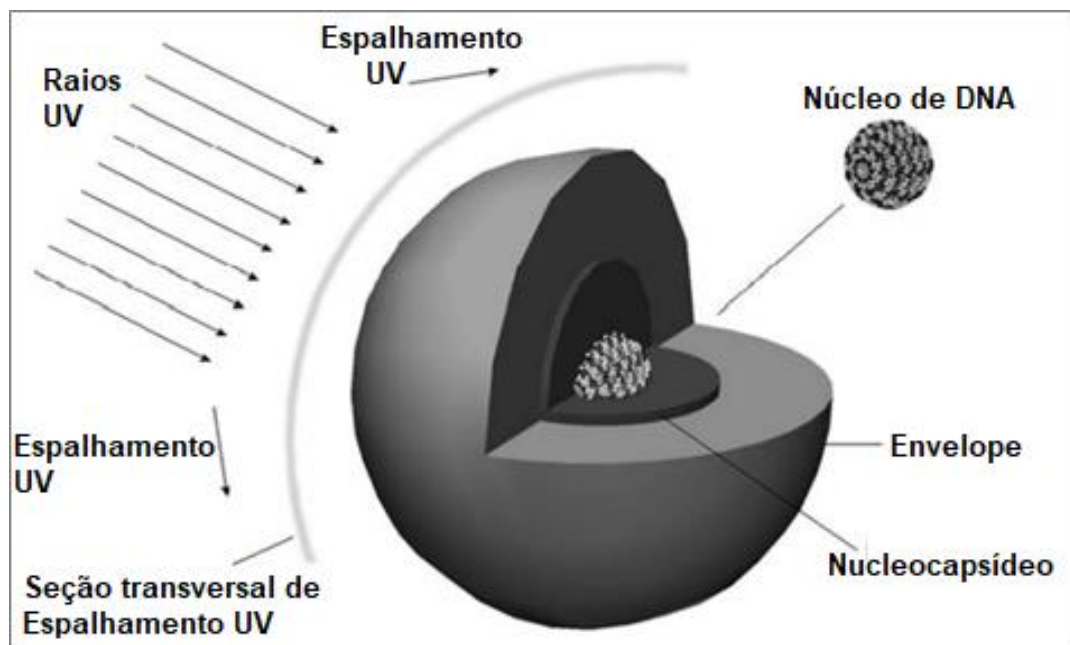
### 2.2.3 Mecanismos de fotoproteção

Se por um lado a radiação UV provoca danos ao material genético de microrganismos, por outro lado, as espécies possuem mecanismos de fotoproteção. Em vírus, o envelope e nucleocapsídeo, quando presentes, atuam como fatores de proteção a UV. No caso de bactérias, o citoplasma pode conter proteínas absorvedoras de UV. Qualquer que seja o mecanismo de fotoproteção de um

microrganismo, o resultado é que a densidade de fótons que atingem o material genético é menor, uma vez que parte desses fótons é absorvida por proteínas que estão ao redor, as chamadas proteínas escuras que possuem grupos moleculares cromóforos. Fungos, por sua vez, podem ter em sua constituição pigmentos que contêm melanina, que é uma proteína que tem a função de proteger contra os raios UV e também está presente em tecidos humanos.

No caso dos vírus, além da absorção que podem ocorrer no envelope e no nucleocapsídeo, outro mecanismo de fotoproteção observado é o espalhamento da radiação UV incidente. Para partículas de tamanho comparável ao comprimento da onda da radiação incidente o espalhamento do tipo Mie é a forma dominante. O espalhamento Mie, por sua vez, corresponde às soluções de Lorenz – Mie – Debye para as equações de Maxwell e descreve o espalhamento de uma onda eletromagnética plana por uma esfera homogênea e depende fortemente do material da partícula, da presença de dipolos, quadrupolos, ou ainda de outras configurações de distribuição de cargas elétricas e campos magnéticos no material analisado.

**Figura 3 – Esquema dos níveis de fotoproteção de um vírus envelopado, incluindo envelope e o nucleocapsídeo.**



Fonte: KOWALSKI, 2009, p.29. Adaptado pela autora.

Por outro lado, ainda que o espalhamento dependa do material que constitua a partícula, os microrganismos possuem índices de refração similares e, portanto, o

espalhamento não depende das proteínas encontradas em nucleocapsídeos ou paredes celulares. O que se observa é uma redução do espalhamento quando o índice de refração do microrganismo se aproxima do índice de refração do meio onde ele se encontra – seja o ar ou a água (KOWALSKI, 2009).

Uma vez que o espalhamento em microrganismos é uma função do tamanho exclusivamente, a interação entre o comprimento de onda da radiação ultravioleta e o microrganismo analisado, para fins de análise de espalhamento, será definida pelo seguinte parâmetro de tamanho:

$$x = \frac{2\pi a}{\lambda} \quad (1)$$

Onde  $a$  é raio efetivo de microrganismos esféricos,  $\lambda$  é o comprimento de onda da radiação incidente e  $\pi$  é aproximadamente 3,14.

Segundo Kowalski (2009), se o tamanho de parâmetro for muito menor que 1 ( $x \ll 1$ ) o espalhamento Rayleigh é predominante, se  $x \approx 1$  o efeito de espalhamento Mie domina, o que é o caso para pequenos vírus e bactérias. Para valores maiores que 1 ( $x \gg 1$ ) os princípios da óptica geométrica normal podem ser aplicados.

O SARS-CoV-2 é um vírus com cerca de 100 nm de diâmetro, assim seu parâmetro de tamanho será igual a 1,24 para o comprimento de onda incidente no valor de 254 nm – que é o comprimento de onda predominantemente emitido por uma lâmpada de mercúrio. Este valor de parâmetro de tamanho é próximo a 1, o tamanho do vírus é comparável ao comprimento de onda da radiação incidente – portanto, o espalhamento Mie é um fator de fotoproteção relevante para o SARS-CoV-2. Na prática, fatores de fotoproteção impactam diretamente na dose de radiação a qual o microrganismo está exposto uma vez que desviam ou fazem que os fótons sejam absorvidos por outras partes que não os ácidos nucleicos – a dose efetiva de inativação é, portanto, inferior à dose a qual o microrganismo está exposto.

#### 2.2.4 Características inerentes e o modelo matemático da desinfecção por UVC

O processo de desinfecção utilizando radiação ultravioleta envolve um decaimento exponencial simples ou envolve funções mais complexas compostas por dois ou mais estágios de decaimento. E, esses processos também podem estar

sujeitos aos efeitos da umidade do ar, assim como a dose de exposição pode sofrer variações devido um campo de irradiância irregular (no ar ou em superfícies) como irregularidades do fluxo de ar ou regiões de sombra em superfícies.

Microrganismos expostos à radiação ultravioleta estão sujeitos à chamada dose de exposição que é função da irradiância,  $i$ , dada em  $W/m^2$ , multiplicada pelo tempo de exposição,  $t$ :

$$D = i \cdot t \quad (2)$$

O parâmetro  $i$  se refere tanto ao fluxo radiativo que atravessa uma superfície plana quanto à irradiância esférica, que é o fluxo radiativo através de uma superfície externa, como, por exemplo, um vírus esférico.

Quando a dose resulta em 90% de taxa de desinfecção – o que corresponde a 10% de sobrevivência da amostra inicial – essa dose específica é chamada  $D_{90}$ , que é um indicador comum de sistemas de desinfecção e que corresponde a 1 log de redução.

Conforme supracitado, a desinfecção é um processo de decaimento exponencial, que em um estágio é dado pela seguinte equação:

$$S = e^{-kD} \quad (3)$$

Onde  $S$  é fração sobrevivente dos microrganismos submetidos ao processo de desinfecção,  $k$  é conhecida como constante de inativação, ou constante de taxa de UV.

Dependendo do cenário, um processo de desinfecção que resulte em uma taxa de sobrevivência de 10% pode ainda representar um alto risco para algum ambiente ou indivíduo. E como a desinfecção é um decaimento exponencial, a taxa de sobrevivência nunca chegará a zero. Portanto, outra forma de indicar o número de microrganismos inativados pelo processo de desinfecção será através da redução de log, que é um termo matemático usado para expressar o número relativo de microrganismos sobreviventes em relação àqueles eliminados.

$$\text{Redução de log} = \log_{10} \left( \frac{N_0}{N} \right) \quad (4)$$

Onde  $N_0$  é o número de microrganismos anterior à exposição de UVC e  $N$  o número de microrganismos após a irradiação.

Se uma redução de log corresponde à inativação de 90% de uma amostra inicial de microrganismos, duas reduções de log correspondem à inativação de 99%, enquanto três reduções de log equivalem a 99,9% da amostra inicial irradiada e assim sucessivamente conforme indicado na tabela 1.

Tabela 1 – Indicação percentual dos logs de redução de população microbiana.

LOG de Redução	Percentual de redução (%)
1	90
2	99
3	99,9
4	99,99
5	99,999
6	99,9999

Fonte: A autora, 2022.

Observa-se na maioria dos métodos de desinfecção que uma pequena fração da população microbiana exibe um nível mais alto de resistência, e o mesmo é verdade na desinfecção UV (KOWALSKI, 2009). Quando ocorre uma desinfecção de duas reduções de log ou maior, a fração sobrevivente dos microrganismos é mais resistente à radiação UV. Assim, a maioria dos microrganismos se comporta como duas populações diferentes: uma mais resistente e outra mais susceptível à UVC. O decaimento em um estágio é, portanto, o decaimento observado da parte de uma população de microrganismos mais susceptível à radiação UV, enquanto que o segundo estágio de decaimento corresponde à população mais resistente. Como a fração mais resistente corresponde a 1% ou menos do total analisado, o segundo estágio de decaimento somente aparece a partir de duas reduções de log, a partir da  $D_{99}$ . Assim, a expressão que indica o decaimento em dois estágios é:

$$S = (1 - f)e^{-k_1D} + fe^{-k_2D} \quad (5)$$



Onde  $f$  é a fração de microrganismos resistente à UV,  $k_1$  é constante do primeiro estágio (decaimento rápido) e  $k_2$  a constante do segundo estágio e, portanto, do decaimento mais lento.

Outra função que também modela a desinfecção são as curvas de decaimento exponencial com ombro, que são curvas que começam com uma inclinação horizontal antes de desenvolver um decaimento exponencial completo. A presença do ombro na curva indica um limiar de dose e que há um atraso para o efetivo processo de desinfecção ou também pode ser interpretado como a atuação de algum um mecanismo de reparo em danos de baixo nível em baixas doses. Decaimentos com ombros também podem acontecer com um estágio ou dois estágios e a expressão matemática usada com melhor aproximação para a maioria das aplicações é a obtida pela chamada modelagem de alvo de acerto múltiplo:

$$S(t) = 1 - (1 - e^{-kD})^n \quad (6)$$

Onde a expressão dada em (6) é aplicada para casos de decaimento em um estágio e a expressão (7) para decaimentos que incluem ombros e dois estágios:

$$S(t) = (1 - f) \quad (7)$$

O fator  $n$  presente na expressão (6) é chamado de expoente de vários alvos e, segundo Kowalski (2009), representa o número de locais críticos discretos que devem ser atingidos para inativar o microrganismo. Esse expoente também é um valor único para cada espécie de microrganismo. Já a expressão (7) requer duas constantes de inativação:  $k_1$  e  $k_2$ , conta com o expoente de vários alvos  $n_1$  e, em geral, o expoente de vários alvos para a segunda constante de inativação praticamente não tem efeito prático tendo seu valor assumido igual a 1 sem perda de acurácia preditiva. Há poucos disponíveis na literatura para o modelo completo de múltiplos alvos com decaimento em dois estágios.

A constante  $k$  é um parâmetro espécie dependente e que é influenciado por vários fatores, tais como: o tamanho do microrganismo, o peso molecular do material genético, a conformação do DNA, os percentuais dos pares de guanina e citosina e de timina e adenina presente no material genético, o potencial de dimerização, a presença de cromóforos e outros absorvedores de UV, a presença de mecanismos de

reparação do material genético e se a superfície do microrganismo é hidrofílica. Ainda influenciam na constante  $k$  fatores ambientais como a umidade do ar, a temperatura e a dependência do meio em que a interação e inativação do microrganismo é avaliada: se na água, se no ar ou se em superfícies (KOWALSKI, 2009).

Os efeitos da umidade do ar são diferentes em vírus e em bactérias. Em geral, nos vírus o impacto das variações de umidade do ar é menos manifestado do que em bactérias. A umidade do ar tem impacto direto na conformação do DNA, ou seja, alterações da umidade do ar podem provocar rotações e alterações no arranjo espacial dos átomos do DNA, sem a quebra de suas ligações químicas. Assim, a alta umidade do ar ou ainda microrganismos em meio aquoso apresentam a conformação B do DNA, que é a conformação considerada totalmente hidratada, enquanto que a conformação do tipo A é considerada a forma desidratada deste ácido nucleico. Em geral, microrganismos com uma conformação B do DNA apresentam maior resistência à radiação UV. Portanto, o aumento da umidade do ar pode levar uma mudança da conformação de A para B, diminuindo a susceptibilidade de um microrganismo a UV e conseqüentemente implicando no aumento de dose para uma efetiva desinfecção.

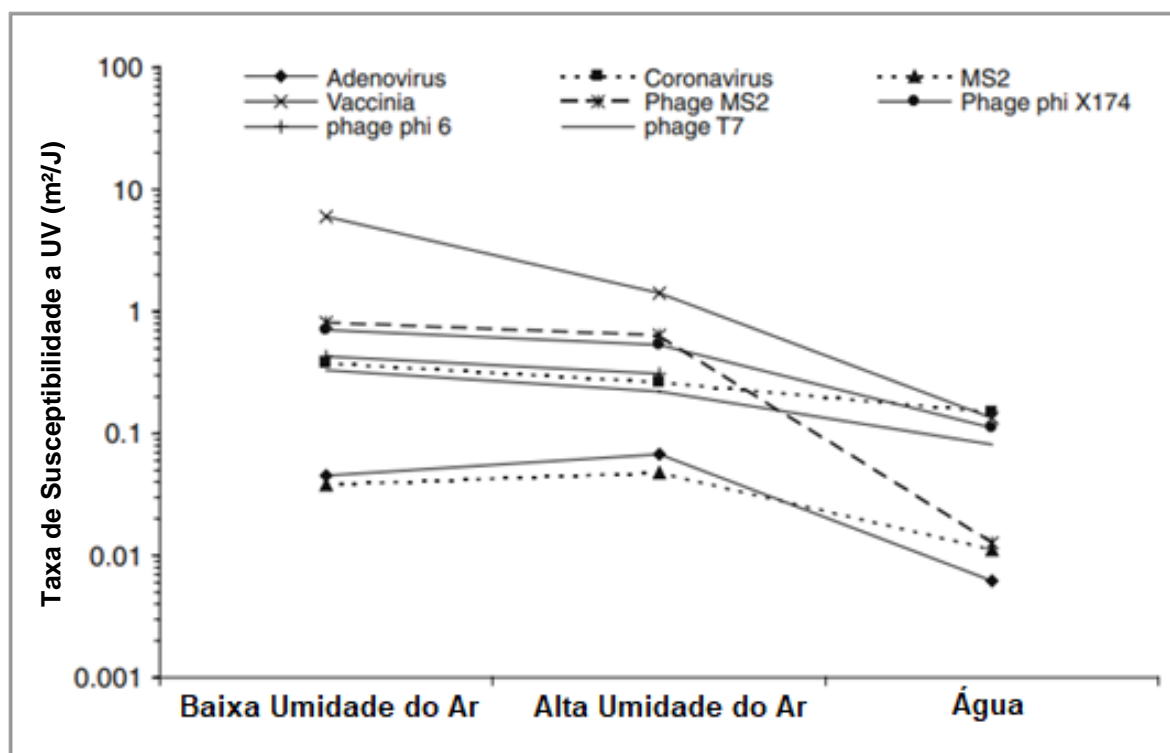
Os vírus de RNA são encontrados caracteristicamente na conformação A e não alteram a conformação molecular conforme aumenta a umidade do ar. Assim, seria esperado que vírus de RNA não respondessem às alterações de umidade do ar uma vez que não há alteração da conformação molecular; entretanto há efeitos secundários causados por alterações da umidade do ar além dos impactos no arranjo espacial dos átomos. O aumento da umidade do ar pode aumentar a ligação do vírus com as moléculas de ar ao redor, aumentando o diâmetro viral, contribuindo para um maior efeito de espalhamento e conseqüentemente diminuição da susceptibilidade do vírus à radiação UVC.

Uma vez que a base o mecanismo de desinfecção é a absorção dos fótons da radiação incidente pelos microrganismos, a susceptibilidade varia largamente entre as espécies. Os vírus, por sua vez, são compostos por diferentes combinações de material genético: há vírus de DNA de fita dupla (dsDNA), de DNA de fita simples (ssDNA), de RNA de fita dupla (dsRNA) e de RNA de fita simples (ssRNA). Os vírus que possuem material genético em dupla fita, em geral, tendem a ter menor susceptibilidade à radiação UV do que aqueles de fita simples; assim como vírus não envelopados tendem a ter maior resistência à UV do que os vírus envelopados, uma

vez que as proteínas e as partes lipídicas dos envelopes podem ser comprometidas mais facilmente que outras partes virais (RAEISZADEH, 2020).

A figura 4 mostra alguns exemplos do impacto da alteração da umidade do ar e do meio – se ar ou água – no valor aferido para a susceptibilidade dos vírus relacionados à radiação UVC.

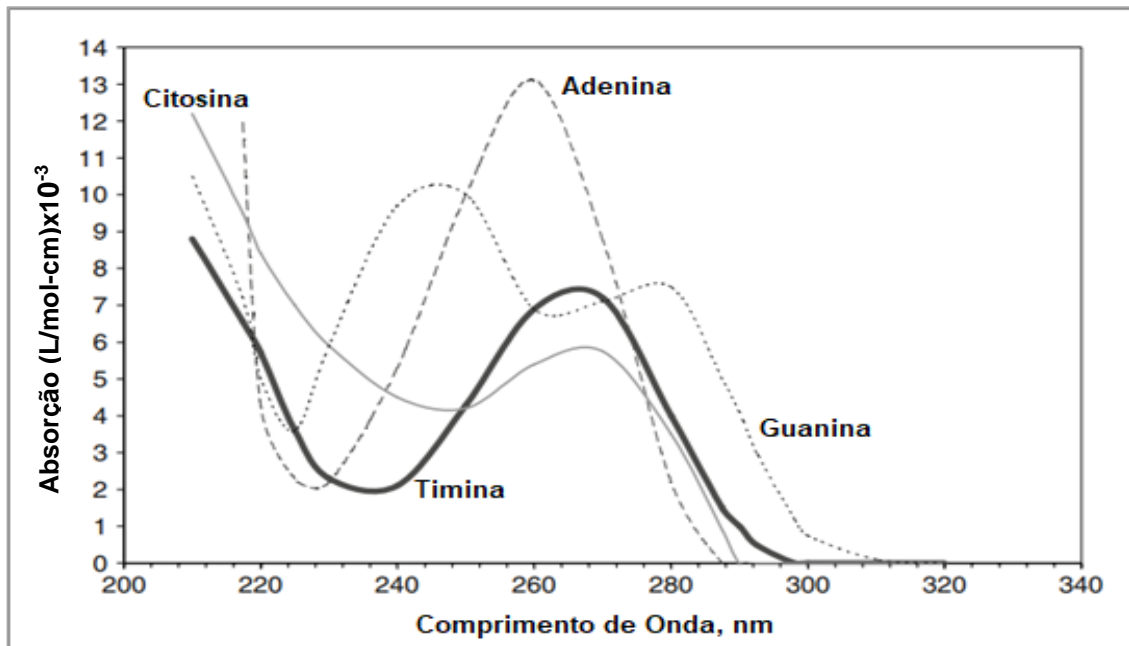
**Figura 4 – Variações da susceptibilidade à UV dos vírus em baixa umidade do ar, em alta umidade do ar e na água.**



Fonte: KOWALSKI, 2009, p.60. Adaptado pela autora.

A susceptibilidade do material genético e das proteínas de um microrganismo à radiação UVC também depende diretamente do comprimento de onda incidente. O espectro de absorção é uma descrição quantitativa da capacidade de absorção de uma molécula numa determinada faixa de comprimento de onda. A intensidade de absorção é expressa em termos de absorvância ou densidade óptica. A intensidade de uma banda de absorção está diretamente relacionada à probabilidade de que uma determinada transição ocorra quando um fóton com certa energia. A figura 5 indica os espectros de absorção para as quatro bases de DNA, que apresentam picos na banda UVC, e também abaixo de 220 nm.

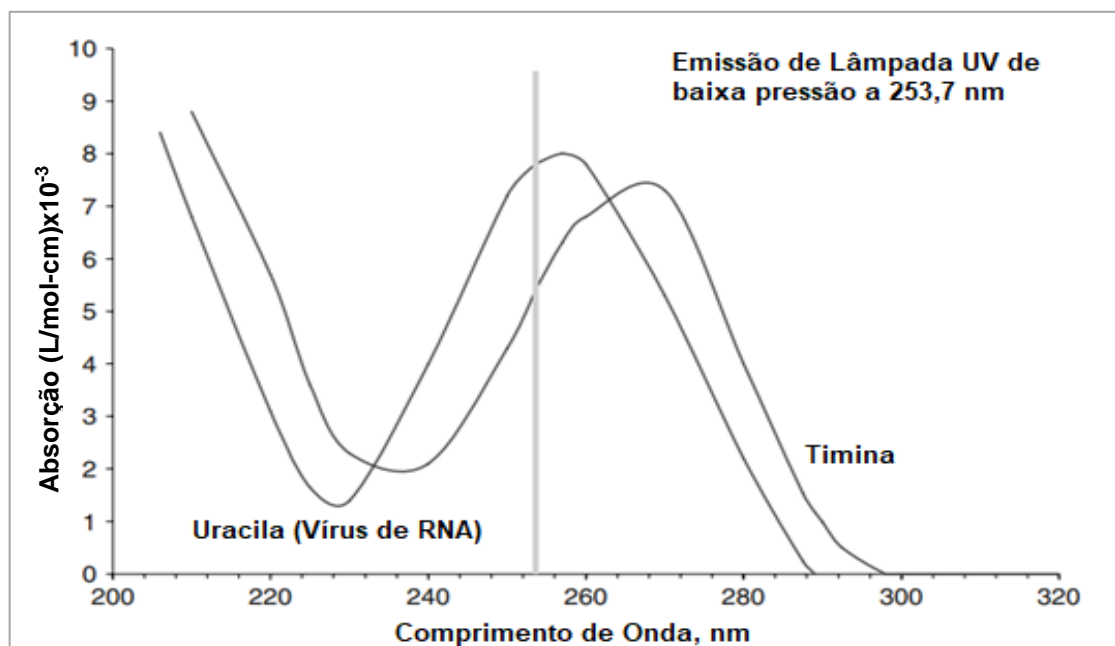
**Figura 5 – Comparação dos espectros de resposta para os quatro nucleotídeos principais.**



Fonte: KOWALSKI, 2009, p.26. Adaptado pela autora.

Timinas e citosinas apresentam pico de absorção próximo a 265 nm, já no caso da uracila, o pico de absorção se aproxima mais do comprimento de onda de 253,7 nm, que é a emissão predominante de uma lâmpada de mercúrio (figura 6).

**Figura 6 – Comparação dos espectros de absorção de timina e uracila.**



Fonte: KOWALSKI, 2009, p.28. Adaptado pela autora.

Tendo em vista os picos de absorção das bases nitrogenadas de uma DNA, um sistema de desinfecção que emite UVC com comprimento de onda de 265 nm precisará de uma dose menor para provocar o mesmo dano ao material genético dos microrganismos alvo quando comparado com a fonte de UVC que emite predominantemente no comprimento de onda de 253,7 nm.

#### 2.2.5 Características do meio e a desinfecção de superfícies

As taxas de inativação de um microrganismo dependem do material, da estrutura da superfície e da turbidez da corrente de ar, assim como das condições ambientais tais como a umidade relativa do ar e a temperatura. A constante  $k$ , que indica a susceptibilidade do microrganismo à radiação UVC, é um parâmetro obtido experimentalmente e depende do meio onde esse microrganismo é analisado. Patógenos que são transmitidos pela água precisam que a avaliação da susceptibilidade e da respectiva dose de inativação seja feita em amostras aquosas. Para outros patógenos que prevalentemente são transmitidos por fômites se faz necessária a avaliação da atuação da radiação ultravioleta em superfícies.

As taxas de inativação de microrganismos em superfícies dependem diretamente do tipo de superfície analisada. Superfícies com tintas orgânicas, por exemplo, podem favorecer a colonização de bactérias – o que, provavelmente, exigiria uma dose maior de radiação UVC para atingir uma taxa de inativação eficaz (RAEISZADEH, 2020). Por outro lado, também é observado que a presença de microrganismos adjacentes a qualquer superfície parece conferir alguma proteção adicional quando comparado com os microrganismos aerotransportados. Em geral, é observado que a susceptibilidade à radiação UVC é menor em superfícies do que no ar. Assim, é preciso considerar que as superfícies possuem irregularidades, fendas e rugosidades em escala microscópica que criam pontos de sombreamento para a radiação UVC incidente. Segundo Raeiszadeh (2020) o impacto da estrutura de superfícies é bem observado no processo de desinfecção de máscaras N95 utilizando radiação UVC – devido a porosidade e estrutura em multicamadas desses EPIs é necessária uma dose de UVC de aproximadamente 2 ordens de magnitude acima para inativar o vírus influenza, em comparação com a dose necessária para inativação do mesmo vírus numa superfície lisa. E vale ressaltar que a radiação UVC não tem penetração nos materiais e sua atuação tem efeito superficial, assim a desinfecção

obtida em respiradores do tipo N95 é limitada à camada mais externa da máscara e não às suas estruturas internas.

#### 2.2.6 Cinética de inativação

O SARS-CoV-2 é um vírus de RNA de fita simples (ssRNA) similar a outros vírus patogênicos a humanos tais como o SARS-CoV-1, o vírus Ebola, o vírus da raiva, o rinovírus, os vírus influenza, o vírus da hepatite A e o vírus da rubéola. O SARS-CoV-2 é similar a outros microrganismos substitutos tais como o SARS-CoV-1 e o vírus MHV (*Mouse Hepatitis Vírus*).

Uma vez que é reconhecida a ação da radiação UVC na inativação de microrganismos, com diversos registros em artigos a partir de avaliações experimentais para obtenção de doses e valores de susceptibilidade, é esperado que em relação à inativação do SARS-CoV-2 não seja diferente. Com a deflagração da pandemia da COVID-19, em 2020, foram realizados testes de inativação e de predição da dose de inativação do SARS-CoV-2 utilizando a radiação UVC. Destacam-se cinco estudos realizados nesse período cujos resultados estão relacionados na tabela 2.

O trabalho de Biasin (2021) relaciona a dose de inativação à concentração viral irradiada, obtendo assim, diferentes doses para diferentes concentrações. Ruetalo (2021) também obtém a dose de inativação do SARS-CoV-2, mas a relaciona com uma concentração que simula uma situação real, na qual uma pessoa infectada exala gotículas que secam em superfícies e que potencialmente permanecem infecciosas por um longo período de tempo. Já o trabalho de Ma (2021) investiga diferentes comprimentos de onda de UVC e a dose de inativação para cada caso. Bello-Perez (2022) compara a eficiência de inativação de uma fonte de radiação ultravioleta de xenônio pulsado com a eficiência de inativação utilizando uma lâmpada de mercúrio convencional de baixa pressão. Gracheva (2022) avalia o efeito da inativação utilizando RUVC no SARS-CoV-2 e o impacto em sua morfologia, propriedades antigênicas e imunogênicas.

Vale ressaltar que os resultados dos trabalhos de Ma, Ruetalo, Biasin, Bello-Perez e Gracheva foram obtidos utilizando como fonte de radiação lâmpadas de mercúrio de baixa pressão que produzem UVC no comprimento de onda de 253,7 nm. As diferentes doses observadas em experimentos realizados utilizando a radiação UVC podem ser explicadas por alguns fatores: diferenças de configuração dos

sistemas experimentais, diferenças na constituição e na preparação das amostras irradiadas e diferentes concentrações virais. Nos casos dos estudos aqui destacados, as amostras utilizadas estavam suspensas em meio aquoso com SARS-CoV-2 obtido a partir de cultura de células infectadas em Biasin (2021), em Ma (2021) e em Gracheva (2022). Já em Ruetalo (2021), as amostras foram submetidas a duas horas de ressecamento antes da irradiação com UVC, em Bello-Perez (2022) as amostras também foram colocadas para ressecamento por 45 minutos antes de serem irradiadas.

Tabela 2 – Dados de dose de inativação do SARS-CoV-2 relatados pela literatura em 2021 e 2022.

Autor	Dose (mJ/cm <sup>2</sup> )	Comentário
Ma et al	1,30	dose necessária e suficiente para 1 log de redução
Ruetalo et al	3,50	dose que provoca 6 logs de redução
	1,75	dose aplicada que obtém 93% de inativação
Biasin et al	3,70	3 logs de redução para concentração de 0,5 MOI <sup>1</sup>
	16,90	3 logs de redução para concentração de 5 MOI
	84,40	3 logs de redução para concentração de 1000 MOI
Bello-Perez et al	5,63	dose que produz 1,9 logs de redução
Gracheva et al	8,70	dose que provoca 2 logs de redução
	34,80	dose que provoca 4 logs de redução

Fonte: A autora, 2022.

Entretanto, testar um microrganismo patogênico como o SARS-CoV-2 é desafiador uma vez que demanda acesso a laboratórios com o nível de biossegurança equivalente. Assim, como alternativa e técnica padrão quando não é possível investigar o patógeno de interesse, devem ser usados microrganismos substitutos que não demandem altos níveis de biossegurança. O microrganismo substituto precisa atender alguns pré-requisitos tais como ter semelhantes a estrutura viral, a patogênese, a transmissão e o organotropismo – considerando esses aspectos, o

<sup>1</sup> MOI significa *Multiplicity of Infection* (Multiplicidade de Infecção) sendo a razão entre o número de partículas virais e o número de células alvo presentes.

vírus MHV é um substituto viável e recomendado, uma vez que se trata de um microrganismo patogênico apenas para ratos. O SARS-CoV-2 é muito similar ao SARS-CoV-1: ambos são vírus envelopados, ssRNA, zoonóticos, com a mesma estrutura conformacional e propriedades eletrostáticas (XIE, 2020). Assim, o SARS-CoV-1 também se apresenta como um substituto possível para o SARS-CoV-2 e, ainda que se trate de um agente patogênico para humanos, provocando a enfermidade conhecida como SARS, há na literatura dados disponíveis para comparação dos resultados, inclusive dados experimentais de inativação por UVC assim como dados preditivos de dose calculada a partir de mapeamento genômico (KOWALSKI, 2015).

Portanto, a partir do mapeamento genético de um vírus, por exemplo, é possível fazer uma previsão da dose de inativação através de uma modelagem que segue 3 regras indicadas por Kowalski (2009): (1) sempre que duas ou mais pirimidinas são vizinhas uma da outra, fotorreações são observadas em ambas as pirimidinas; (2) pirimidinas não adjacentes, rodeadas em ambos os lados por purinas, exibem pouca ou nenhuma fotorreatividade e (3) as únicas purinas que prontamente formam fotoprodutos UV são aquelas que são flanqueados por duas ou mais pirimidinas contíguas. Pendyala (2020), por sua vez, usa as mesmas regras para fazer a previsão da  $D_{90}$  do SARS-CoV-2 e do MHV usando a equação 8:

$$PyNNFV = \frac{(TT\%)(TC\%)(CT\%)(CC\%)}{genome\ bp} \quad (8)$$

Onde  $PyNNFV$  é chamado o valor frequência do dinucleotídeo de pirimidina,  $TT\%$  é o percentual de dupletos de timina-timina,  $TC\%$  o percentual de dupletos de timina-citosina,  $CT\%$  o percentual de dupletos citosina-timina,  $CC\%$  o percentual de dupletos de citosina-citonina e  $genome\ bp$  é número de bases do genoma.

Assim, a partir de vários genomas mapeados de vírus do tipo ssRNA (mesmo tipo do SARS-CoV-2) e disponíveis no portal da NCBI (Centro Nacional de Informações sobre Biotecnologia) foram obtidos os valores de  $PyNNFV$  para esses vírus, tais como SARS-CoV-1, Sarampo, MS2 bacteriófago entre outros. As doses  $D_{90}$  desses mesmos vírus já eram de conhecimento na literatura possibilitando a avaliação da relação dessas doses com os valores  $PyNNFV$  obtidos. Foi observada a seguinte relação linear:



$$D_{90} = 10,409 + 19984. PyNNFV \quad (9)$$

A partir da qual Pendyala (2020) obteve o valor estimado da dose de inativação para a SARS-CoV-2 como 2,15 mJ/cm<sup>2</sup>. Assim, comparando o valor obtido por Pendyala e os valores aferidos experimentalmente e indicados na tabela 2 pode-se afirmar que estão próximos entre si – o que indica que a previsão de dose a partir do mapeamento genético fornece um valor aproximado e confiável da dose efetiva de inativação para, pelo menos, 1 log de redução.

Entretanto, vale ressaltar que independentemente da dose aferida em experimentos para diferentes logs de redução, mesmo uma desinfecção de 99,9% de um microrganismo pode não ser o suficiente se o 0,1% remanescente tiver a carga viral necessária para viabilizar novas infecções – como no caso de novos vírus para os quais a sociedade em geral não possui memória imunológica.

### 2.2.7 Lâmpadas de UVC

A lâmpada é o principal componente de um sistema de desinfecção por UVC. As lâmpadas de mercúrio, uma das fontes mais comuns de emissão de UVC e também utilizadas no sistema objeto dessa dissertação, são assim chamadas porque contém pontos sólidos de uma liga mercúrio, uma amálgama, em combinação com outros elementos, tais como gálio ou índio.

Os dois tipos mais comuns de lâmpadas UV são aqueles de descarga de alta intensidade – HID (*high intensity discharge*) – também chamadas de lâmpadas de vapor de mercúrio de alta ou média pressão e as lâmpadas de baixa pressão. As lâmpadas HID contêm gás mercúrio a uma pressão de aproximadamente 1000 torr e geram altos níveis de irradiância UV em uma ampla faixa de comprimentos de onda. As lâmpadas UV de baixa pressão contêm gás mercúrio a pressões de cerca de 10 torr ou menos e, quando este gás é estimulado por uma carga elétrica, emite luz UV em uma faixa estreita de comprimentos de onda centrados em torno de 254 nm (KOWALSKI, 2009).

As lâmpadas de baixa pressão consistem em um invólucro feito de vidro de quartzo ou outro vidro transmissor de UV, um par de eletrodos e um amálgama de mercúrio. Os reatores são necessários para fornecer a tensão de partida necessária

através dos eletrodos e fornecer a corrente adequada da lâmpada. A corrente elétrica que passa entre os eletrodos aquece o vapor de mercúrio que estimula as transições eletrônicas e provoca a emissão de luz ultravioleta e visível. Em lâmpadas fluorescentes o vidro é revestido por dentro com fósforos que absorvem UV e reemitem a energia como luz visível. Nas lâmpadas UV, não há fósforo e o vidro, geralmente vidro de quartzo, é amplamente transparente aos comprimentos de onda UV. O vidro de quartzo pode absorver uma pequena fração da luz incidente e a converte em calor. Também é possível usar *Softglass* (vidro de sódio-bário) que não transmite a 185 nm e, portanto, não produz ozônio (SCHALK, 2006).

Assim, é importante ressaltar que a potência nominal indicada para o funcionamento de uma determinada lâmpada germicida não é convertida integralmente em potência de radiação de UVC. Fornecedores de lâmpadas germicidas, em geral, indicam nas fichas técnicas de seus produtos uma potência efetiva de emissão de UVC em torno de 30 a 40% da potência nominal. Kowalski (2009) indica que a eficiência geral das lâmpadas de baixa pressão tende a ser de cerca de 30 a 31%, ainda que esses valores possam variar dependendo das condições ambientais de operação. As lâmpadas UV de mercúrio de baixa pressão também emitem níveis mais baixos de radiação em comprimentos de onda de cerca de 185 nm, 365 nm e superior, conforme indicado na tabela 3.

Tabela 3 – Linhas de emissão do mercúrio.

Comprimento de onda (nm)	Espectro
184,5	UVC
253,7	UVC
365,0	UVA
404,7	Violeta
435,8	Azul
546,1	Verde
1013,9	Infravermelho

Fonte: NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY, 2022.

A radiação próxima de 185 nm pode produzir ozônio, enquanto as emissões de radiação UVA acima de 400 nm podem ser visivelmente percebidas como luz branca azulada. Importante ressaltar ainda que os diferentes espectros emitidos pelas

lâmpadas de UV podem impactar o efeito germicida. Devido ao estreito espectro produzido por lâmpada de mercúrio de baixa pressão, há menor produção de ozônio envolvido, por outro lado, lâmpadas que emitem um espectro mais amplo de radiação tendem a produzir um maior dano a enzimas e a outras partes que constituem os microrganismos (o que pode limitar ou evitar mecanismos de fotoreativação).

Em relação à produção de ozônio, a radiação ultravioleta com comprimentos de onda de 175-210 nm pode converter oxigênio atmosférico em gás ozônio. A maioria das lâmpadas de mercúrio de média pressão gera uma linha espectral fraca em 185 nm que produz ozônio em combinação com oxigênio do ar ambiente (SCHALK, 2006).

As lâmpadas de baixa pressão não têm pico nas proximidades de 185 nm, mas ainda podem produzir algum ozônio detectável. Certos modelos de lâmpadas UV de baixa pressão bloqueiam o espectro a 185 nm e não produzem ozônio. Como o ozônio também absorve UV a 253,7 nm, o gás é criado e destruído pela radiação ultravioleta e as condições de operação da lâmpada ditarão a taxa de geração de ozônio. Entretanto, algumas lâmpadas são projetadas para eliminar a produção de ozônio – este último tipo de lâmpada é produzido com um invólucro de vidro ou quartzo fundido dopado para bloquear a radiação abaixo de 200 nm. A respeito da manutenção das lâmpadas germicidas é importante destacar que as condições ambientais ou abaixo do ideal podem comprometer o desempenho dessas lâmpadas fazendo com que elas tenham uma vida útil inferior ao indicado pelos fabricantes.

A maioria das lâmpadas de UVC opera com eficiência máxima, sem correntes de ar, a 25 °C. Temperaturas acima ou abaixo do valor ideal diminuirão a saída da UV. Segundo Kowalski (2009) a maioria das lâmpadas UV é projetada para operar a uma temperatura de aproximadamente 21,5 °C e uma velocidade do ar de 2 a 2,54 m/s. A saída de UV da lâmpada pode diminuir ou aumentar fora desta faixa. Algumas lâmpadas, por exemplo, podem perder 25% ou mais de sua emissão UV quando a temperatura do ar cai de 27 °C para 16 °C.

#### 2.2.8 Radiometria ultravioleta

A radiação ultravioleta é uma forma de energia eletromagnética e deve ser absorvida de alguma forma para ser detectada. A medição da radiação eletromagnética é chamada de radiometria.

A radiometria é um conjunto de conceitos, terminologias, relações matemáticas, medidas instrumentais e unidades elaborados para descrever e medir as relações e interações da radiação eletromagnética com a matéria em termos da sua potência, polarização, conteúdo espectral e outros parâmetros relevantes para uma determinada fonte ou configuração do detector. (CARLESSO, 2019). O radiômetro, por sua vez, é o instrumento utilizado nas medições de fluxo radiante (potência) da radiação eletromagnética.

Um radiômetro, também chamado de fotômetro radiométrico, é um dispositivo que detecta a irradiação total incidente sobre um elemento sensor. Radiômetros utilizam detectores fotoelétricos seletivos de comprimento de onda, incluindo fotocondutores, tubos fotoemissivos, células fotovoltaicas e fotodiodos, fototransistores ou outros dispositivos de junção (KOWALSKI, 2009). Os detectores podem ser de dois tipos: térmico, quando a radiação incidente é convertida em calor, ou fotônico, quando a absorção de fótons aciona um circuito eletrônico através de efeito fotoelétrico.

Os radiômetros medem a potência radiante e têm uma saída calibrada em irradiância ( $W.m^{-2}$ ). Um radiômetro fotônico normalmente usa uma fotocélula com um cátodo sensível a UV que converte a energia incidente em uma corrente elétrica. Esses detectores são muito sensíveis, mas sua sensibilidade pode variar com o comprimento de onda. A sensibilidade geral de um detector é igual ao produto da responsividade do sensor e a transmissividade do filtro utilizado (RYER, 1997).

Os filtros, por sua vez, operam por absorção ou interferência e a seleção de qual filtro usar depende da aplicação. Os filtros de absorção são dopados com materiais que absorvem seletivamente a radiação por comprimento de onda, já os filtros de interferência usam camadas finas de materiais dielétricos para causar interferência entre frentes de onda, selecionando assim, por interferência, a passagem dos comprimentos de onda desejados.

### 2.2.9 Considerações de segurança

Ainda que radiação ultravioleta seja essencial para a vida na superfície terrestre – participa, por exemplo, da fotossíntese e da produção de vitamina D – ela também provoca efeitos biológicos adversos no tecido humano. Diversos desenhos de sistemas de desinfecção podem ser desenvolvidos para diversas aplicações da

utilização da radiação UV no cotidiano, mas se faz necessário que medidas sejam adotadas de modo a garantir que a exposição à radiação UV ocorra dentro dos parâmetros de segurança já conhecidos e estabelecidos, ou ainda que não ocorra exposição à radiação UV.

O corpo humano absorve radiação eletromagnética de todo o espectro, mas cada radiação provoca respostas distintas de diferentes tipos de células e não há relação entre energia de uma onda eletromagnética e profundidade de penetração dessa onda.

A profundidade de penetração de uma onda eletromagnética depende do tipo de interação que ocorre, assim como também depende fortemente do meio onde isso se dá. Quanto maior o número de interações, menor será a profundidade de penetração, provocando maior deposição da energia na superfície de um corpo. No caso da radiação UV, por exemplo, a profundidade de penetração na pele ou no olho é menor do que a da luz visível, fazendo com que a radiação UV seja totalmente absorvida antes de alcançar a retina e, por isso, a radiação UV não é visível para humanos (OKUNO, 2005).

A absorção da radiação UV varia com o comprimento de onda: a RUVB-I (340 a 400 nm) é carcinogênica e sua ação alcança a derme profunda e sua ação é refletida em vasos sanguíneos; a RUVB-II (315 a 340 nm) pode causar eritemas (manchas vermelhas na pele), tem capacidade imunomoduladora e também carcinogênica. A RUVB (280 a 315 nm) também é carcinogênica e eritematogênica e a RUVB (100 a 280 nm) é a radiação com maior poder carcinogênico e alto poder cataratogênico.

A exposição perigosa aos raios UV para a pele ou para olhos humanos inclui irradiação direta, além da exposição secundária devido à reflexão da radiação UV das superfícies. A exposição secundária de materiais com alta refletância na região UV devem ser considerados com cautela em um projeto de desinfecção de superfície por radiação UV. Por exemplo, superfícies de PTFE (politetrafluoretileno), alumínio e aço inoxidável podem refletir até 95%, 90% e 50% de UVC radiação, respectivamente. O valor limite (TLV – *Theresold Limit Value*) para a exposição humana aos raios UV é a dose de 3 mJ/cm<sup>2</sup> em um período de 8 horas com base em regulamento fornecido por diferentes associações internacionais, como o *American Cancer Society* e a Agência Europeia para a Segurança e Saúde no Trabalho (RAEISZADEH, 2020). Esse valor de dose foi obtido tendo como referência de comprimento de onda a RUV de 270 nm. Se for considerado a radiação UV de 254 nm, por exemplo, devido a eficácia espectral

desse comprimento de onda, 6 mJ/cm<sup>2</sup> de 254 nm UVC podem causar o mesmo efeito que 3 mJ/cm<sup>2</sup> de 270 nm, conforme valores de TLV indicados no Guia de Radiação Ultravioleta fornecido pela Marinha dos EUA.

A geração de ozônio é identificada entre os riscos associados com desinfecção UV. O ozônio é uma molécula formada por 3 átomos de oxigênio e é um gás altamente tóxico, podendo levar à morte um indivíduo exposto à concentração de 50 ppm durante 30 minutos (OKUNO, 2005). O fóton de UVC com comprimento de onda menor que 240 nm (com pico de produção ocorrendo em 185 nm) é capaz de quebrar uma molécula de oxigênio – O<sub>2</sub> – e o oxigênio dissociado se combina com outra molécula de oxigênio do ar formando assim o O<sub>3</sub>. Assim, a formação de ozônio é um efeito importante que precisa ser considerado quando um sistema de desinfecção é projetado. Conforme citado no item 2.2.7, é possível criar um sistema de desinfecção que não gere ozônio se a fonte emissora de UVC bloquear a emissão de radiação abaixo de 240 nm.

A radiação UVC também é conhecida por gerar fotodegradação em materiais. A degradação pode dissociar a estrutura do material e reduzir a sua vida útil. Materiais plásticos, por exemplo, deterioram mediante exposição à radiação UVC, entretanto a resposta dos polímeros varia em relação à absorção da radiação UVC e o calor tende a aumentar os efeitos de fotodegradação por UV.

Na desinfecção do ar e da superfície, a radiação UV raramente, ou nunca, produz quaisquer subprodutos e aqueles que ocorrem como resultado da destruição de materiais microbianos orgânicos ou toxinas são geralmente inofensivos.

Além de fotodegradação, as superfícies e materiais podem sofrer fotodescoloração devido a exposição de longa duração à radiação UV ou à exposição de altos níveis de UV em curto prazo. A taxa de fotodegradação depende das propriedades fotoquímicas de tintas, estrutura física dos materiais irradiados e do espectro de UV incidente.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesse capítulo serão descritos os insumos utilizados para a construção da câmara de desinfecção por radiação UVC. O protótipo recebeu o nome de Câmara Harriette Chick (CHC) em homenagem à microbiologista britânica que primeiramente pesquisou sobre desinfecção de bactérias usando 3 tipos de desinfetantes químicos: um a base de fenol, o segundo contendo uma mistura de derivados de carvão em suspensão de sabão e o terceiro composto de sais metálicos – cloreto de mercúrio e nitrato de prata (CHICK, 1908). A partir da adição desses compostos desinfetantes em colônias de bactérias, Chick (1908) observou que a ação dos desinfetantes provocava um decrescimento exponencial dessas populações microbianas. Assim, ela concebeu a lei de Chick, posteriormente modificada e aplicada em análises de decrescimento exponencial mediante a aplicação de radiação UVC.

A Câmara Harriette Chick foi construída em três etapas: a primeira com confecção da estrutura básica de madeira com revestimento interno de folhas de alumínio e instalação das lâmpadas, a segunda com a instalação da estrutura mecânica e a terceira contemplando a implantação da estrutura eletrônica. Cada uma dessas fases será detalhada nesse capítulo nas sessões a seguir.

#### 3.1 Estrutura da câmara

Equipamentos destinados à manipulação de material biológico devem ser confeccionados com aço inox, mas a câmara de desinfecção objeto desta dissertação é o primeiro protótipo dessa natureza construído no Laboratório de Instrumentação Eletrônica e Técnicas Analíticas (LIETA) do Instituto de Física Armando Dias Tavares da UERJ e, por uma questão de facilidade de manipulação, confecção e custo o equipamento foi construído a partir de uma estrutura básica de madeira. Foram utilizadas 11 placas de MDF de 10 mm de espessura para a confecção do equipamento: 4 placas de 70 cm x 50 cm; 3 placas de 70 cm x 70 cm e 4 placas de 70 cm x 10 cm.

O equipamento foi idealizado em dois segmentos: uma região maior, com formato aproximado de cubo, com as paredes internas revestidas de papel alumínio, que é a região de irradiação de materiais e amostras contaminadas; e uma região superior, acima da região de irradiação onde foram instalados os componentes

eletrônicos que controlam o funcionamento do equipamento e a estrutura mecânica dos eixos de rotação. A câmara de desinfecção foi idealizada para inativar microrganismos em diferentes materiais, mas ela também foi pensada para promover a desinfecção de respiradores N95 de maneira mais eficiente. O equipamento foi projetado de modo a produzir uma distribuição homogênea da radiação UVC e inativar microrganismos simultaneamente no maior número possível de respiradores inseridos na região de irradiação – para este fim foi projetada uma estrutura de nove eixos em rotação, destinados a comportar, no máximo, nove respiradores para desinfecção por vez que o equipamento for colocado em operação. A estrutura mecânica será detalhadamente abordada no item 3.2.

**Figura 7 – Visão frontal da CHC em construção.**



Fonte: A autora, 2022.

A região de irradiação da câmara foi construída com as placas maiores compondo a base e o teto e as placas indicadas em (a) formando as paredes internas. Sistemas comerciais de desinfecção por UV em dutos de ar, por exemplo, contam com revestimento de alumínio polido de modo a aumentar a eficiência desses equipamentos, pois esse material tem a refletividade UV de cerca de 73% (KOWALSKI, 2009). Portanto, todas as faces internas da região de irradiação foram



cobertas com uma camada de papel alumínio para melhor refletir a radiação UVC e, assim aumentar a irradiância dentro da câmara.

**Figura 8 – Processo de revestimento com papel alumínio.**



Fonte: A autora, 2022.

A região superior, separada da região de irradiação tem altura menor comparada à região de radiação. A base onde a parte eletrônica e a parte mecânica foram fixadas é a mesma placa usada como teto da região de irradiação. E a terceira placa de 70 cm x 70 cm foi usada para criar uma tampa de altura de 10 cm para proteger as peças mecânicas e os componentes eletrônicos que automatizam o equipamento.

**Figura 9 – Câmara com a pintura concluída.**



Fonte: A autora, 2022.

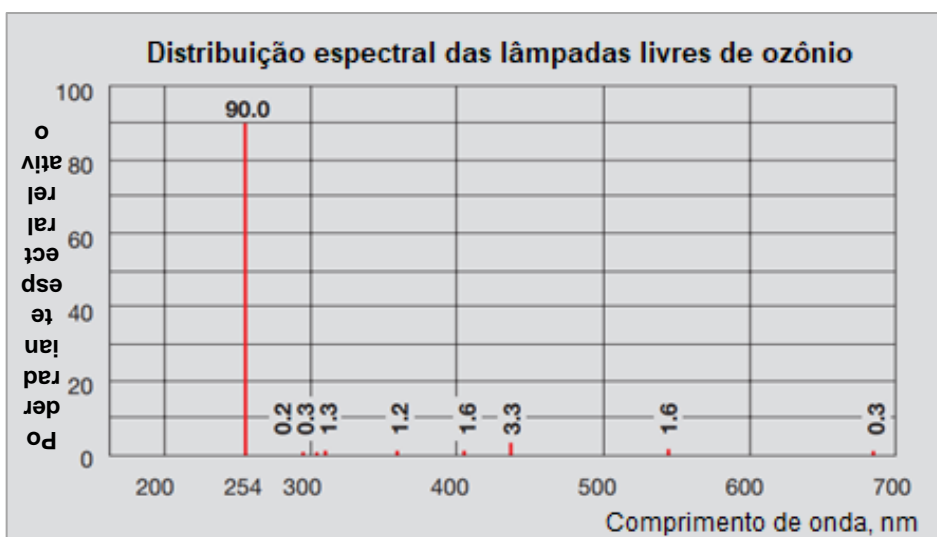
A madeira que compõe o equipamento recebeu uma camada de primer, que é fundo preparador, que diminui a porosidade da madeira, reduz desperdício e permite que a tinta aplicada posteriormente seque mais rapidamente. Em seguida, o equipamento recebeu uma camada de tinta azul.

### 3.1.1 Lâmpadas

Na região de irradiação foram fixadas quatro lâmpadas fluorescentes de baixa pressão de mercúrio modelo HNS 15W G13 OFR, da marca OSRAM. Trata-se de uma lâmpada de 14,7 W de potência nominal, mas apenas 4 W de potência de radiação de UVC, medindo 436 mm de comprimento, diâmetro de 26 mm, vida útil mediana estimada em 8000 horas e emissão de comprimento de onda dominante de 254 nm.

Segundo informações técnicas disponibilizadas pelo fabricante, o tubo utilizado como invólucro da lâmpada é feito de um quartzo apropriado para bloquear os comprimentos de onda inferiores a 240 nm, sendo assim, portanto, uma lâmpada que não produz ozônio. Os comprimentos de onda que se encontram na faixa do visível são responsáveis pela coloração azulada da luz emitida pela lâmpada.

**Figura 10 – Distribuição espectral das lâmpadas livres de ozônio.**

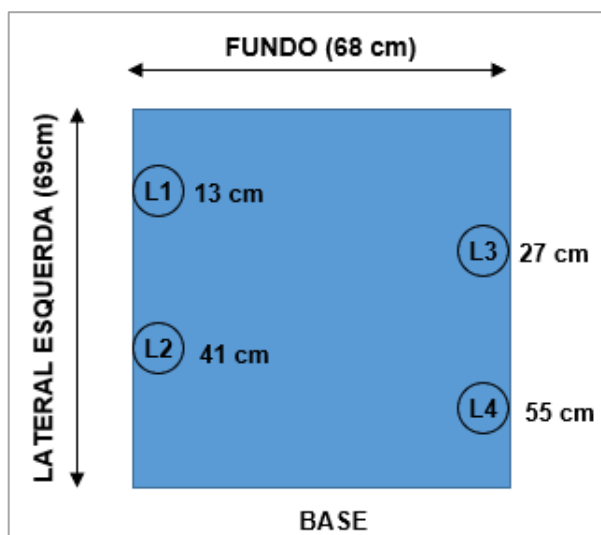


Fonte: OSRAM; 2021. Adaptado pela autora.

As lâmpadas foram fixadas duas a duas nas paredes laterais da câmara de desinfecção de modo a produzir, também, uma irradiação mais uniforme.

A figura 11 mostra uma projeção na base no equipamento de como as lâmpadas foram dispostas internamente na região de irradiação e as respectivas posições (todas as posições foram tomadas em referência à parede de fundo do equipamento).

**Figura 11 – Esquema da base da área de irradiação da CHC.**



Fonte: A autora, 2022.

A figura 12 mostra a disposição interna das lâmpadas UVC utilizadas dentro da CHC, na área de irradiação:

**Figura 12 – Visão frontal das lâmpadas UVC instaladas na área de irradiação da CHC.**



Fonte: A autora, 2022.

A lâmpada L1 foi posicionada na lateral esquerda a 13 cm do fundo, a lâmpada L2 a 41 cm, a lâmpada L3 foi colocada na lateral direita a 27 cm e a lâmpada L4 a 55 cm. Observando a figura 5 é possível notar um deslocamento vertical de 14 cm entre os pares de lâmpadas L1 – L3 e L2 – L4. Esse não alinhamento das lâmpadas é proposital e tem por objetivo reduzir a áreas de sombreamento da radiação nos objetos inseridos no equipamento para desinfecção.

### 3.1.2. Radiômetro MRUR-203

O radiômetro usado para medir a irradiância interna da CHC foi o modelo MRUR-203 da Instrutherm com dimensões de 180 x 72 x 32 mm. Ele funciona com uma bateria de 9 V, apresenta tempo de resposta de 0,4 s, opera em máxima umidade do ar de 80% e entre 0 °C e 50 °C. O sensor de UVC é separado do corpo do aparelho (figura 13) e tem escala de resposta espectral de 254 nm e banda de passagem de 200-280nm.

**Figura 13 – Radiômetro MRUR-203.**



Fonte: A autora, 2022.

O radiômetro MRUR-203 é um equipamento de alta resolução capaz de fornecer medidas com até  $0,1 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  e  $\pm 2\%$  de incerteza conforme indicado na tabela 4.

Tabela 4 – Dados de escala, resolução e incerteza do radiômetro MRUR-203.

Escala	Resolução	Incerteza
199,9 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	0,1 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	$\pm$ (2% FS + 2 dígitos) FS = Escala completa
1,999 $\text{mW}/\text{cm}^2$	0,001 $\text{mW}/\text{cm}^2$	
19,99 $\text{mW}/\text{cm}^2$	0,01 $\text{mW}/\text{cm}^2$	

Fonte: INSTRUTHERM, 2021. Adaptado pela autora.

O radiômetro quando é ligado necessita de um intervalo tempo para estabilizar as medidas de irradiância por ele registradas. Wilkinson (1998) relata que um teste adequado para radiômetros é verificar a estabilidade do aparelho. O radiômetro deve ser ligado por tempo suficiente para que atinja uma leitura estável. Para tanto, foram realizados testes de verificação de estabilização das medidas aferidas no radiômetro MRUR-203 que serão tratados no capítulo 4.

### 3.2 Estrutura mecânica

Aqui serão mostradas as peças utilizadas para a construção da estrutura mecânica da CHC e que compõem o sistema de eixos em rotação com ganchos nos quais aos respiradores N95 devem ficar suspensos para desinfecção. A estrutura mecânica é automatizada por uma estrutura eletrônica que será também detalhada nesse capítulo.

#### 3.2.1 Sistema de rolamentos, correias e polias GT2

Os eixos que são rotacionados são compostos de microtubos de aço inoxidável (figura 14) com liga AISI 304, que é uma liga que possui 18% de cromo e 8% de níquel. Os microtubos utilizados para compor a estrutura mecânica possuem diâmetro externo de 5,0 mm, espessura da parede de 2,0 mm e comprimento de 500 mm. Eles foram cortados em 8 segmentos de 10 cm e 1 segmento de 15 cm que foram inseridos no topo da área de irradiação, atravessando a placa de madeira de forma perpendicular.

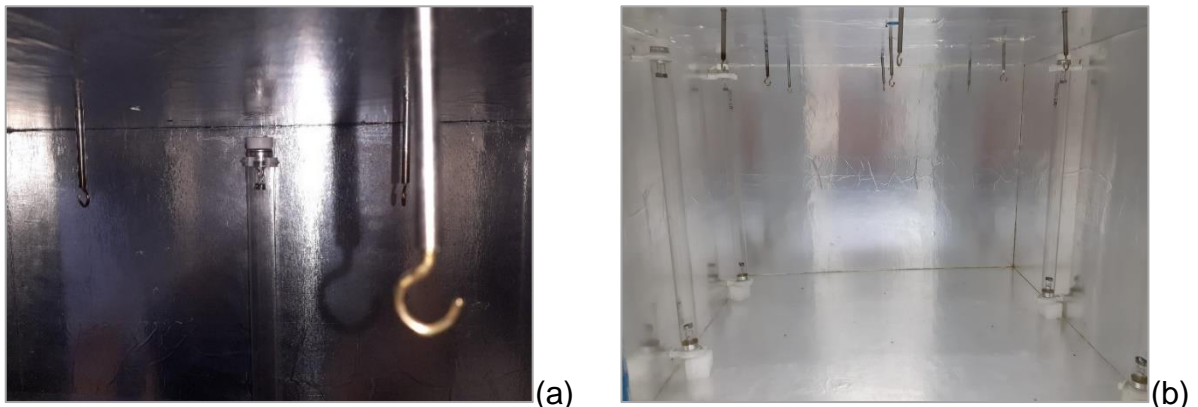
**Figura 14 – Microtubos de aço inox.**



Fonte: A autora, 2022.

Os microtubos foram, assim, usados como eixos. Na ponta do eixo localizado na parte interna da área de irradiação foram inseridos ganchos (figura 15).

**Figura 15 – Visão dos ganchos no interior do equipamento.**



Legenda: (a) visão aproximada dos eixos no interior da câmara e (b) visão dos nove eixos e respectivos ganchos dentro da área de irradiação.

Fonte: A autora, 2022.

Os rolamentos foram encravados na placa de madeira, de modo que as polias GT2 ficassem alinhadas na madeira e possuem as seguintes dimensões: 13 mm de diâmetro externo, 5 mm de diâmetro interno (de acordo com o diâmetro do eixo do microtubo utilizado) e 4 mm de espessura. Uma vez que as placas de madeira MDF utilizadas possuem 10 mm de espessura, foi simples garantir que os rolamentos ficassem incrustados nessa interface. A figura 16 mostra um dos rolamentos utilizados na construção da câmara.

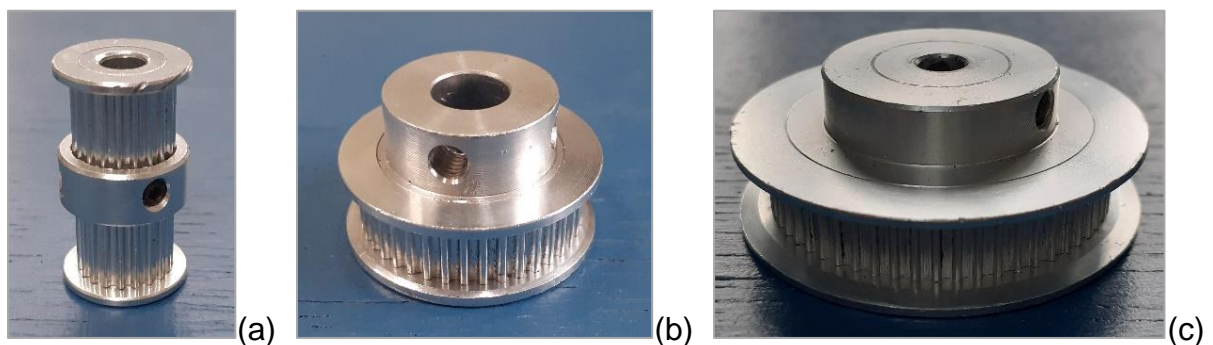
**Figura 16 – Rolamentos.**



Fonte: A autora, 2022.

Por cima dos rolamentos, já encaixados na madeira, foram colocadas polias GT2, que são polias originalmente utilizadas em impressoras 3D. No sistema foram usadas 9 polias duplas de 20 dentes, 1 polia simples de 40 dentes, 1 polia simples de 60 dentes. A figura 17 apresenta os tipos de polias utilizadas.

**Figura 17 – Polias utilizadas na estrutura mecânica.**

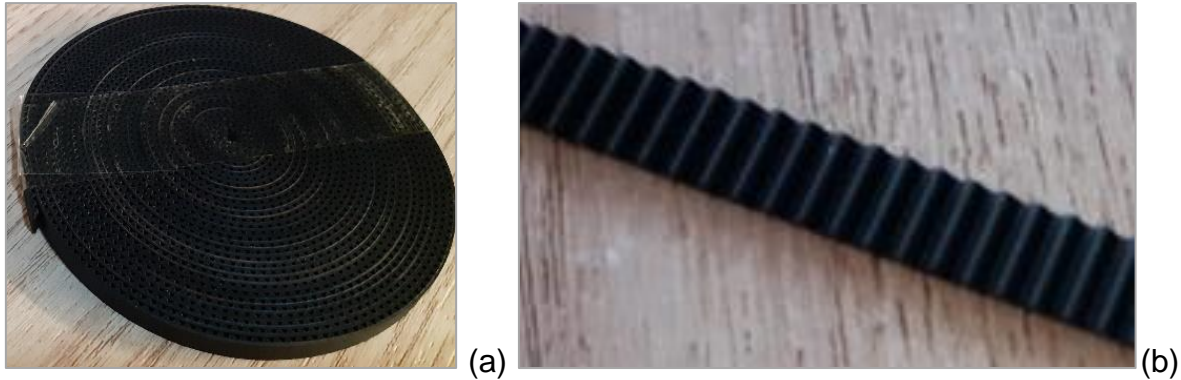


Legenda: (a) polia de 20 dentes, (b) polia de 40 dentes, (c) polia de 60 dentes.

Fonte: A autora, 2022.

As polias de 20 e 60 dentes possuem diâmetro interno de 5 mm para encaixe no eixo de aço, já a polia de 40 dentes possui diâmetro interno de 8 mm para justo encaixe no eixo do motor de passo utilizado. Todas as polias possuem passo de 2 mm, comportam correia de 6 mm e são feitas de alumínio. A figura 18 mostra a correia utilizada no conectar as polias do sistema.

**Figura 18 – Correia dentada de 6mm.**

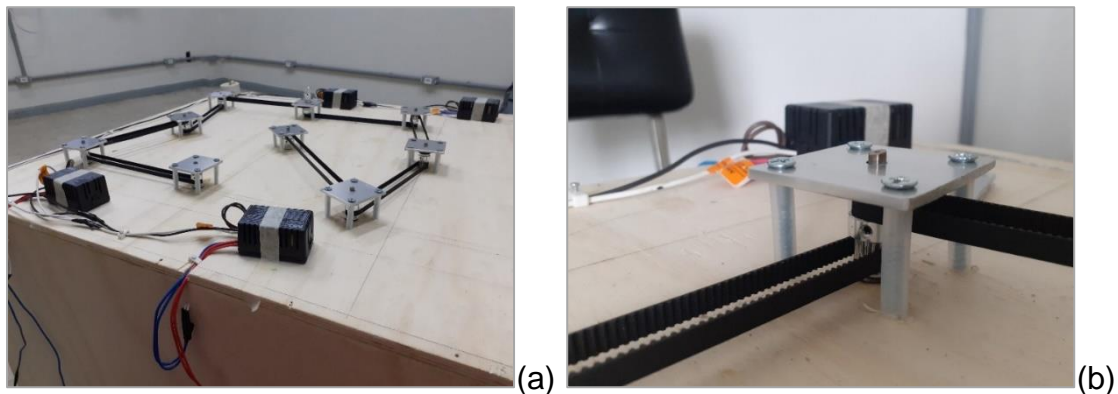


Legenda: (a) Correia utilizada para conectar as polias instaladas na CHC e (b) detalhe dos dentes da correia, com passo de 2 mm.

Fonte: A autora, 2022.

As correias utilizadas são dentadas, específicas para polias GT2 de passo de 2 mm. São confeccionadas em borracha com interior reforçado com fibra de vidro e foram cortadas em diferentes tamanhos, de modo a conectar todas as polias, e emendadas utilizando cola instantânea. A figura 19 mostra a estrutura construída para a fixação dos eixos das polias.

**Figura 19 – Estrutura de fixação dos eixos das polias GT2.**



Legenda: (a) Visão da estrutura mecânica no topo da área de irradiação e (b) detalhe da estrutura de alumínio usada para fixação dos eixos.

Fonte: A autora, 2022.

A parte mecânica apenas composta de eixos, rolamentos, polias e correias se mostrou instável. As correias, ainda que ajustadas entre as polias, deixavam os eixos inclinados e estes, por sua vez, deixavam as polias levemente inclinadas também – o que comprometeu o desempenho do sistema não conseguindo fazer girar os eixos.



Para solucionar este problema foram fixados suportes de alumínio sobre as polias, de modo a evitar a inclinação dos eixos. Foram cortadas pequenas placas de alumínio de 5 cm x 5 cm e espessura de 2 mm, furados, encaixados sobre as polias e aparafusados no topo externo da área de irradiação (figura 19). Os parafusos usados foram revestidos com microtubos de plástico, cortados em tamanhos de cerca de 3 cm de comprimento. Esses suportes plásticos servem tanto para proteger os parafusos como para delimitar a altura que a placa de alumínio deveria ter.

### 3.2.2 Eixo de rotação para desinfecção de máscaras

A rotação promove maior homogeneidade na incidência da radiação sobre as superfícies dos respiradores N95, eliminando a discrepância entre as faces e diminuindo o tempo necessário para que todo o objeto receba a dose necessária para inativação de microrganismos presentes em sua superfície.

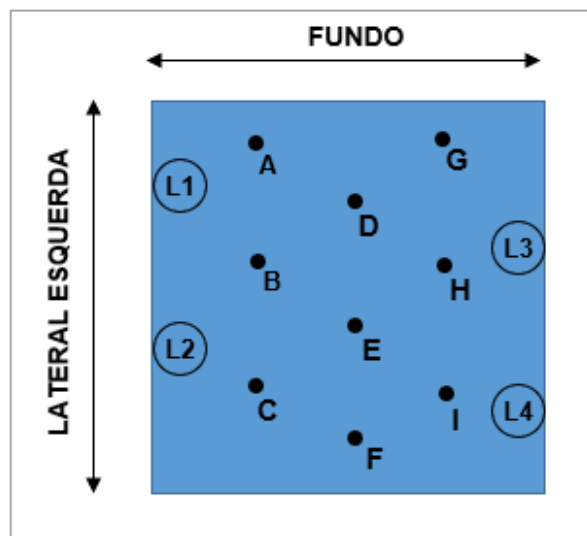
Tomando, por exemplo, um respirador posicionado em A – conforme indicação diagrama esquemático da figura 20 – a irradiância proveniente da lâmpada L1 é mais intensa que a recebida de qualquer outra lâmpada, devido à distância para as demais lâmpadas e efeitos de sombra que a posição A pode sofrer devido à presença de outros objetos no interior da câmara.

Assim sendo, se o sistema fosse totalmente estático, a face do objeto localizado em A, mas que se encontrasse oposta à lâmpada L1 precisaria de um tempo consideravelmente maior que a outra face que estivesse voltada diretamente para a lâmpada em questão de modo a receber a dose necessária a inativação. Isso impactaria em um tempo maior para cada operação do aparelho, reduzindo sua vida útil uma vez que as lâmpadas UVC tem sua vida útil medida em horas de operação. Desta forma, a rotação permite que todas as faces de um objeto suspenso na câmara recebam a efetiva irradiância que chega naquele ponto.

Além da rotação dos eixos, outro fator importante a se destacar é a utilização de polias de diferentes tamanhos. Inicialmente, durante a construção da estrutura mecânica – o conjunto de eixos, polias e correias – foram utilizadas apenas as polias menores, de 20 dentes para ligar todo o sistema, inclusive conectando os nove eixos ao motor de passo. Foi observado, no primeiro teste de rotação da estrutura mecânica, que as polias inicialmente utilizadas ligando o motor de passo ao eixo tinham poucos dentes e, por mais que as correias estivessem ajustadas, o motor não conseguia

promover a rotação do sistema. A solução foi substituir a polia de 20 dentes conectada ao eixo do motor por uma polia de 80 dentes. Essa substituição aumentou a área de contato com a correia, assim como também substituir a polia de 20 dentes do eixo central por uma polia de 60 dentes ofereceu maior estabilidade a essa parte do sistema.

**Figura 20 – Esquema com a indicação das projeções de A a I dos eixos na base da área de irradiação da CHC.**



Fonte: A autora, 2022.

Pode-se dizer que a polia de 80 dentes é o elemento motor, uma vez que ela está ligada à transmissão primária do acionamento inicial dado pelo motor de passo, enquanto que a polia de 60 dentes é elemento movido pelo acionamento da polia motora. A correia, nesse contexto, é o elemento responsável pela transmissão do movimento do elemento motor para o elemento movido e para que essa transmissão aconteça de maneira eficiente é preciso:

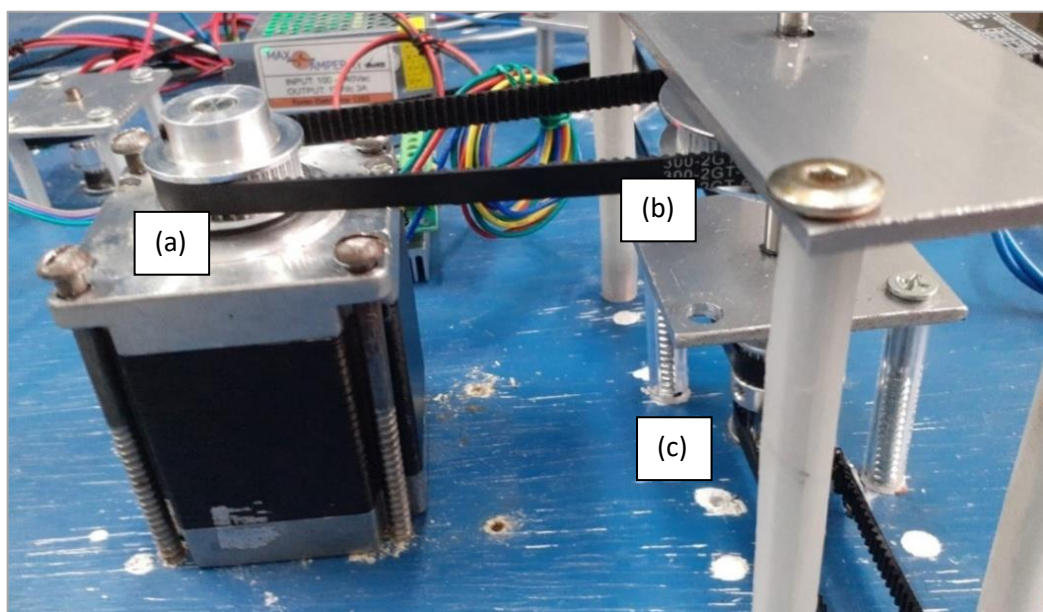
- i. Que não ocorra deslizamento entre a correia e a polia;
- ii. Que a correia tenha o tensionamento ideal: nem muito tensionada, nem folgada;
- iii. Alinhamento entre as polias ligadas pela correia (de modo a evitar desgastes).

Em sistemas com mais de duas polias, a primeira polia movida se torna o elemento motor da polia que está imediatamente ligada em série. Portanto, o termo polia motora não necessariamente é aplicado à polia ligada ao motor, mas é aquela

que transmite o movimento para a polia seguinte. Vale ressaltar que em sistemas de transmissão de movimento por polias não é necessário que as mesmas tenham tamanhos diferentes. A escolha do tamanho das polias está diretamente relacionada ao objetivo da transmissão. A Física envolvida nas relações de transmissão das polias – aumento ou redução de velocidade angular ou da velocidade linear, aumento ou redução do torque – será abordada mais detalhadamente no APÊNDICE A.

No caso da CHC, foi utilizada uma polia menor de 40 dentes ligada ao motor sendo essa a polia motora primária, indicada na figura 21 por (a). A polia movida primária tem 60 dentes e está identificada na figura 21 por (b). No par de polias (a) e (b) observa-se, portanto, uma redução da velocidade angular em aproximadamente 67% da velocidade angular inicial produzida pelo motor.

**Figura 21 – Polias conectadas ao motor e ao primeiro eixo de rotação.**



Legenda: (a) Polia motora conectada ao eixo do motor de passo, (b) polia primária movida e (c) a polia movida secundária conectada pelo mesmo eixo à polia de 60 dentes.

Fonte: A autora, 2022.

As polias (b) e (c) têm uma configuração distinta do par de polias (a) e (b), uma vez que são polias que compartilham o mesmo eixo e, portanto, possuem a mesma velocidade angular – nessa configuração a polia movida primária (b) torna-se a polia motora secundária e (c) a polia movida secundária. Ao final da transmissão de movimento desse sistema, a rotação por minuto produzida na polia movida (c) é  $2/3$  da rotação inicial e a velocidade linear  $1/3$  da velocidade linear inicial.

### 3.3 Estrutura eletrônica

A estrutura eletrônica corresponde à automatização do equipamento utilizando um módulo controlador ESP32, diversos componentes eletrônicos e o sistema embarcado programado Arduino, C++, JavaScript e HTML. Nessa sessão estão detalhados os componentes eletrônicos utilizados, como eles funcionam e o porquê foram utilizados na CHC.

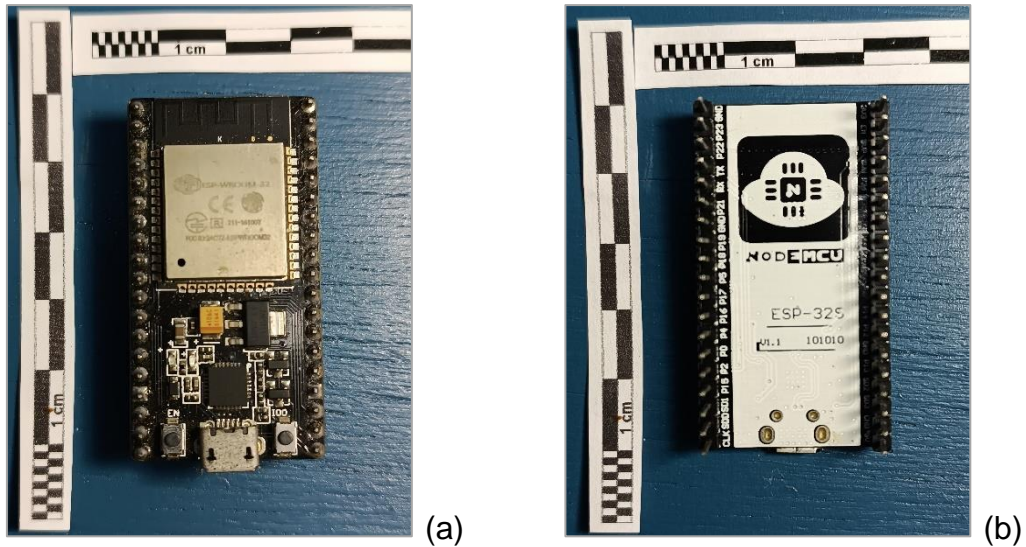
#### 3.3.1 Microcontrolador ESP32

A ascensão e rápido desenvolvimento de sistemas IoT (*Internet of Things*) nos quais cada vez mais os objetos físicos do dia a dia são conectados com a internet está intimamente ligado ao desenvolvimento de módulos e processadores que viabilizam essas soluções - nesse contexto a demanda por microcontroladores é crescente.

Microcontroladores são circuitos integrados que reúnem um núcleo processador, memória com periféricos programáveis e com possibilidade de comunicação através de entradas e saídas de dados. Também podem ser chamados de computadores embutidos e funcionam com sistemas embarcados, que são sistemas que realizam tarefas bem definidas e específicas. Os microcontroladores também podem ser utilizados com variados sensores, assim são dispositivos que podem ser amplamente utilizados em monitoramentos diversos ou mesmo como um sistema de comunicação recebendo ou enviando dados coletados para outros servidores. Logo, tornam-se dispositivos indispensáveis na automação de sistemas eletrônicos – inclusive porque eles têm baixo custo e baixo consumo de energia.

O ESP32 (figura 22), por sua vez, é um microcontrolador que combina recursos como *WiFi* integrado e *Bluetooth*. É o sucessor do chip 8266 e, comparado com este estende o número de pinos GPIO de 17 para 36, o número de canais PWM por 16 e está equipado com 4 MB de memória (BABIUCH, 2019). Os pinos GPIO são as portas programáveis dos microcontroladores utilizadas como interface para sensores e outros periféricos, enquanto que os canais PWM (*Pulse Width Modulation*) simulam sinais analógicos como, por exemplo, a opção entre dois estados: ligado ou desligado, o controle do brilho de lâmpadas ou ainda a velocidade de um motor.

**Figura 22 – Microcontrolador ESP32.**



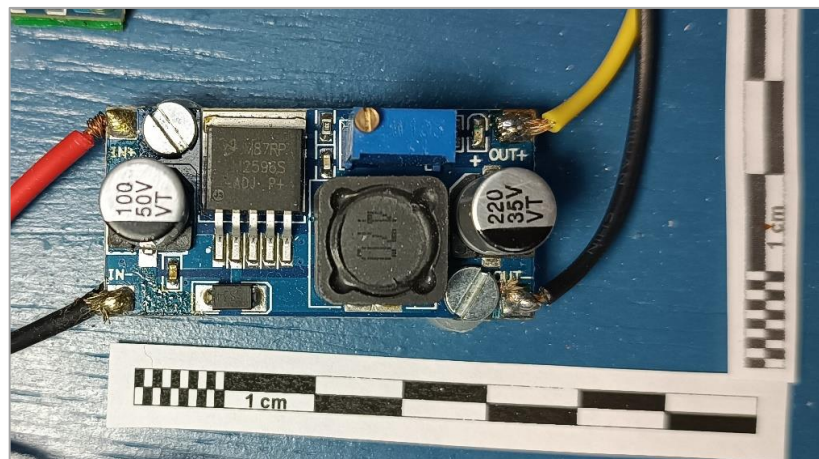
Legenda: (a) visão do chip do ESP32 e (b) visão dos pinos no verso do ESP32.

Fonte: A autora, 2022.

O ESP32 foi escolhido porque integra todos os sensores utilizados no equipamento, controla a acendimento das lâmpadas UVC e cria um ponto de rede local no qual é hospedado o código HTML que é interface de navegação e controle da CHC.

Vale ressaltar que como o ESP32 é um dispositivo de baixo consumo de energia, foi utilizado um módulo *step down* (figura 23) que é um regulador de tensão. Esse módulo foi instalado entre a fonte chaveada e o ESP32 fornecendo a tensão de funcionamento do microcontrolador.

**Figura 23 – Módulo *step down* utilizado na CHC.**

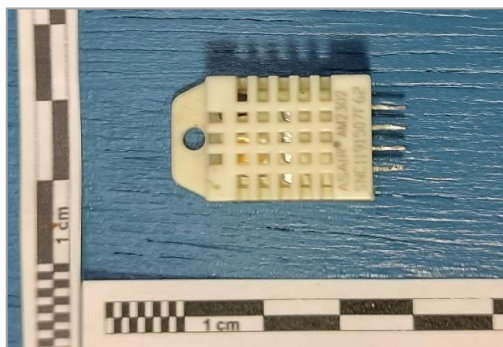


Fonte: A autora, 2022.

### 3.3.2 Sensor de temperatura e umidade do ar: DHT22

O sensor DHT22 (figura 24) é um componente eletrônico digital capaz de monitorar a temperatura e a umidade do ar. Ele é composto por um termistor (medição de temperatura) e um sensor capacitivo para determinar a umidade.

**Figura 24 - Sensor DHT22.**



Fonte: A autora, 2022.

O DHT22 realiza leituras de temperatura entre - 40 °C e 80 °C, umidade do ar entre 0 e 100% com resolução de 0,1 °C e 0,1% respectivamente e realiza registro de medidas a cada dois segundos. A incerteza do componente é de 0,5 °C para temperatura e, respectivamente, 2% para umidade.

Para medir a umidade, o DHT22 possui dois eletrodos com substrato de retenção de umidade entre eles. Assim, à medida que a umidade muda, a condutividade do substrato muda ou a resistência entre esses eletrodos muda. Esta mudança na resistência é medida e processada por um transdutor que converte o sinal analógico em digital que o torna pronto para ser lido por um microcontrolador.

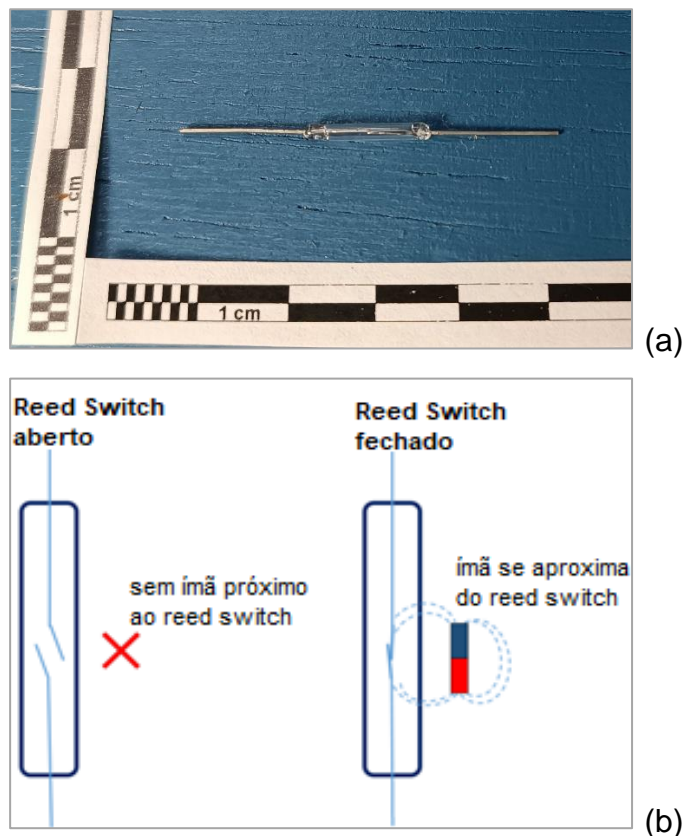
Por outro lado, para medir a temperatura, o DHT22 possui um termistor que é um resistor variável que muda sua resistência com a mudança da temperatura. Os termistores são feitos de materiais semicondutores como cerâmicas ou polímeros e são capazes de fornecer maiores mudanças na resistência com apenas pequenas mudanças na temperatura.

Monitorar a temperatura e a umidade do ar durante a operação da câmara de desinfecção é importante uma vez que a umidade do ar tem impacto na inativação e esse fato pode alterar a susceptibilidade de microrganismos à radiação UVC conforme abordado no item 2.2.4 desta dissertação.

### 3.3.3 Interruptor magnético reed switch

Os sensores magnéticos são chaves que podem ser abertas ou fechadas dependendo do campo magnético próximo. Esse componente é formado por um tubo de vidro com comprimento de 14 mm e diâmetro de 2 mm e em seu interior há dois filetes de um material ferromagnético. O sensor tem comprimento total de 45 mm. Conforme especificações da fabricante OKI (2010), o tubo de vidro é hermeticamente fechado e em seu interior há um gás inerte para evitar a ativação dos contatos que são revestidos com ródio.

**Figura 25 – Interruptor magnético reed switch e esquema de funcionamento.**



Legenda: (a) Interruptor magnético reed switch (tirar foto) e (b) esquema do chaveamento do sensor magnético mediante a aproximação e afastamento de um ímã.

Fonte: A autora, 2022.

O chaveamento de um sensor, como o indicado na figura 25, ocorre quando um ímã se aproxima ou se afasta dos filetes ferromagnéticos. A aproximação de um ímã induz os polos norte e sul magnéticos nos filetes fazendo com que os contatos fechem mediante força magnética atrativa. Quando o campo magnético é removido, a

elasticidade dos filetes faz com que os contatos abram o circuito (OKI SENSOR DEVICE CORPORATION, 2010);

O sensor *reed switch* é instalado na base da área de irradiação da câmara de desinfecção, bem próximo à porta, pois para fechar o circuito o ímã precisa estar a menos de 13 mm de distância do sensor. Foi utilizado um ímã de neodímio em forma de disco com 10 mm de diâmetro e 2 mm de espessura, o qual foi instalado face interna e inferior da porta da CHC. Assim, quando a porta está fechada, o circuito também está fechado, pois o ímã está próximo ao sensor. Quando a porta abre, o ímã é afastado e o circuito abre. O programa de automação do equipamento foi pensado de forma que ao abrir o circuito do sensor magnético *reed switch*, o *buzzer* produz sinais sonoros (*beeps*) indicando que a câmara de desinfecção está com a porta aberta.

Vale ressaltar que como o sensor magnético utilizado é frágil e foi encapsulado em um pedaço de mangueira plástica com tamanho suficiente para cobrir todo seu tubo de vidro e, o espaço entre o tubo de vidro e a mangueira foi preenchido com cola de silicone de modo a criar um envoltório mais resistente e proteger o sensor.

#### 3.3.4 Buzzer piezolétrico

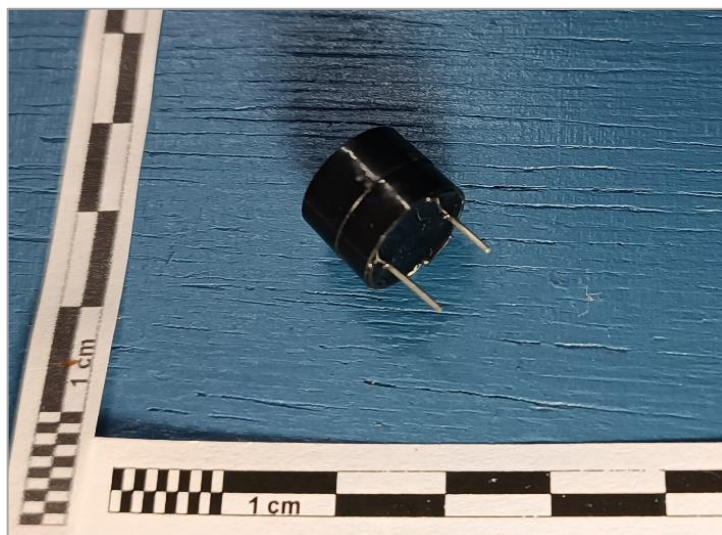
O efeito piezoelétrico é um fenômeno observado em alguns materiais, como cristais e cerâmicas, que permite a conversão de uma energia mecânica em energia elétrica e que também pode se apresentar de forma reversa, ou seja, convertendo a energia elétrica em energia mecânica. O *buzzer* piezoelétrico é, portanto, um componente que, a partir de uma diferença de potencial aplicada a uma membrana que o constitui internamente e que possui propriedades piezoelétricas, são desencadeadas vibrações mecânicas responsáveis pela produção de sinais sonoros a partir de oscilador interno. (NASCIMENTO, 2021).

O *buzzer* utilizado na CHC é composto por dois terminais para ligação elétrica (figura 26) e que internamente possui duas camadas de metal e uma terceira camada de cristal piezoelétrico. Tem diâmetro de 12 mm, altura de 9 mm e com distância entre os terminais de 7mm. Sua função na câmara é emitir *beeps* contínuos toda vez que a porta do equipamento estiver aberta com o mesmo ligado. Uma vez que a exposição à radiação UVC tem riscos envolvidos – efeitos carcinogênicos e cataratogênicos



abordados no item 2.2.9 – o sinal sonoro é um alerta de segurança para o usuário que estiver operando o equipamento.

**Figura 26 – Buzzer piezoelétrico.**



Fonte: A autora, 2022.

### 3.3.5 Módulo relé

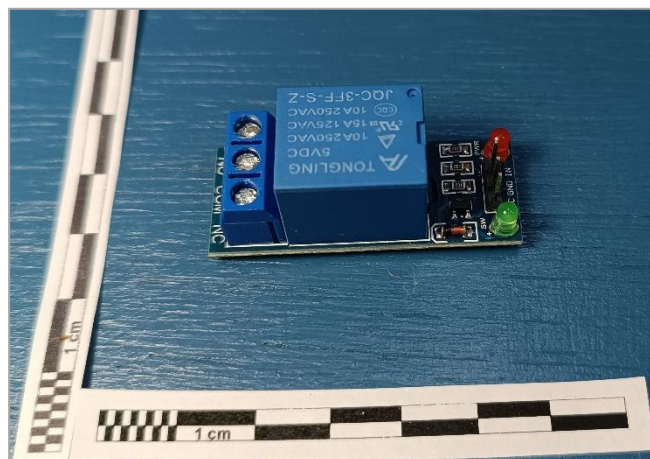
Um relé é um interruptor eletromecânico que serve para abrir e fechar circuitos. Ele é formado por uma bobina, contatos e alavanca. Quando a bobina do relé é percorrida por uma corrente elétrica, o campo magnético induzido move a alavanca fechando ou abrindo os contatos. Uma vez interrompida a corrente que passa pela bobina a alavanca, os contatos voltam à posição inicial.

O módulo relé, por sua vez, contém o relé e outros componentes, como transistores e conectores, que facilitam a comunicação com as portas GPIO dos microcontroladores.

O módulo relé usado no CHC está retratado na figura 27 e trata-se de um módulo de 1 canal que funciona com bobina de 5 V de tensão com capacidade para controlar dispositivos que estejam dentro do limite de 10 A. As lâmpadas da CHC somente são ligadas com a confirmação dada a partir da interface de operação (página HTML) de que o equipamento deve entrar em operação. Na tela de operação da câmara há um botão que só pode ser pressionado mediante a informação de quanto tempo o equipamento deve operar. Assim, somente após indicar o tempo de operação do equipamento e confirmado em tela através do botão “ligar” é que o

módulo relé recebe o comando do ESP32 indicando que as lâmpadas UVC devem ser ligadas.

**Figura 27 – Módulo relé de um canal.**



Fonte: A autora, 2022.

O módulo relé também controla o funcionamento da fita de LED, a qual funciona concomitantemente às lâmpadas UVC. Quando o tempo de operação informado na interface cessa, o módulo relé recebe o comando de que todo o sistema de iluminação do equipamento deve ser desligado – tanto as lâmpadas UVC quanto a fita de LED. Portanto, o módulo relé é utilizado como uma chave eletrônica controlando quando o funcionamento das lâmpadas é permitido.

### 3.3.6 Motor de passo

O motor de passo é um motor elétrico com movimentação realizada através de passos ou graus – o que permite que o movimento do motor seja controlado com alta precisão e sem o uso de sensores adicionais para este fim. O eixo do motor gira em passos quando sinais elétricos são aplicados, sendo a velocidade do motor definida pela frequência com que esses sinais são enviados e o número de rotações determinado pela sua quantidade.

O passo equivale ao deslocamento angular que o motor é capaz de dar. Há motores com diferentes resoluções: 0,72°; 1,8°; 3,6°; 7,5°; 15° até 90° – o que equivale a 500, 200, 100, 48, 24 e 4 passos por rotação respectivamente.

Um pulso elétrico é uma mudança de curta duração na tensão ou na intensidade da corrente. No caso do motor de passo, as mudanças de tensão repetidamente informadas pelo microcontrolador, via driver de motor, fazem girar seu eixo. Um pulso equivale ao deslocamento de um passo básico do motor utilizado. A quantidade de voltas que o motor dá é, assim, proporcional ao número pulsos e a velocidade do motor, por sua vez, será proporcional à velocidade dos pulsos.

Dentro do motor de passo há bobinas solenoides dispostas circularmente e que são ativadas em sequência (no sentido horário ou anti-horário). Essas bobinas circundam um ímã que está fixo no eixo do motor. O acionamento em sequência das bobinas faz girar o ímã de forma discretizada onde cada pulso é responsável pelo deslocamento angular mínimo completo do motor, ou seja, seu passo angular.

O motor de passo utilizado na CHC (figura 28) é um motor do tipo bipolar da marca Wotiom, modelo WS23-0150-30-4, padrão NEMA23 de 4 fios, com passo angular de  $1,8^\circ$  e eixo de 8 mm. Ele funciona com tensão de 12 V e corrente de 2 A – mas, suporta até 3 A de corrente e tem torque máximo de 15 kgf.cm.

**Figura 28 – Motor de passo Wotiom, modelo WS23-0150-30-4.**



Fonte: A autora, 2022.

Na CHC o motor é responsável por movimentar as polias e correias que giram os eixos onde os respiradores ou outros objetos de interesse podem ser suspensos para desinfecção. O acionamento do motor é concomitante ao acionamento das

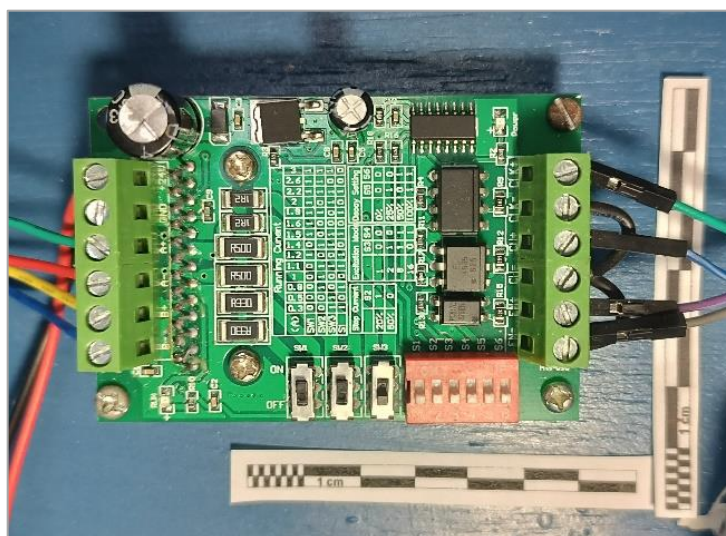
lâmpadas do equipamento e o começo desse processo é determinado pela indicação do tempo de desinfecção através da interface digital que será detalhada no item 3.6. Portanto, os eixos giram somente quando é dado o comando para as lâmpadas acenderem e o movimento é interrompido quando a porta do equipamento é aberta (durante a operação) ou quando esgota o tempo de desinfecção indicado na interface lógica.

### 3.3.7 Driver do motor - TB6560

O driver de motor é o componente que fornece energia para as bobinas do motor de passo para que elas funcionem de maneira coordenada e gire o imã e, conseqüentemente, o eixo do motor apropriadamente – em um passo ou um micropasso (fração do passo), dependendo da corrente aplicada.

O driver utilizado na câmara de desinfecção foi o TB6560 da Toshiba (figura 29), com saída máxima de 3A. Trata-se de um controlador de motor bipolar que modula a largura do pulso enviado para o motor de passo. Através da técnica de modulação PWM (*Pulse Width Modulation*), ele gera pulsos de largura variável permitindo que o motor de passo se movimente também em frações de passo. O driver TB6560, assim, também pode movimentar o motor em meio passo e em micropassos proporcionais a 1/4, 1/8 e 1/16 de passo.

**Figura 29 – Driver de Motor TB6560.**



Fonte: A autora, 2022.

### 3.3.8 Fita de LED

A iluminação em LED presente na CHC é apresentada em formato de fita, da marca Eklart, com comprimento de 30 cm, 4000 K de cor (branca) e densidade linear de potência de 10 W/m. A fita foi instalada na parte frontal do equipamento para dar destaque quando a câmara está em operação. Assim, a fita de LED acende concomitantemente ao acionamento das lâmpadas UVC e do motor e desliga quando a operação é interrompida ou quando se esgota o tempo de informado na interface digital.

A fita é conectada a um reator, e este conectado ao módulo relé. Ela tem alto fluxo luminoso: 1050 lúmens por metro, conforme informação de *datasheet* do fabricante. Assim, de modo a atenuar o fluxo luminoso, a fita instalada de forma embutida no equipamento num sulco feito na madeira e sob uma tira de acrílico pintada de vermelho conforme mostra a figura 30.

**Figura 30 – Fita de LED instalada na parte frontal do equipamento.**



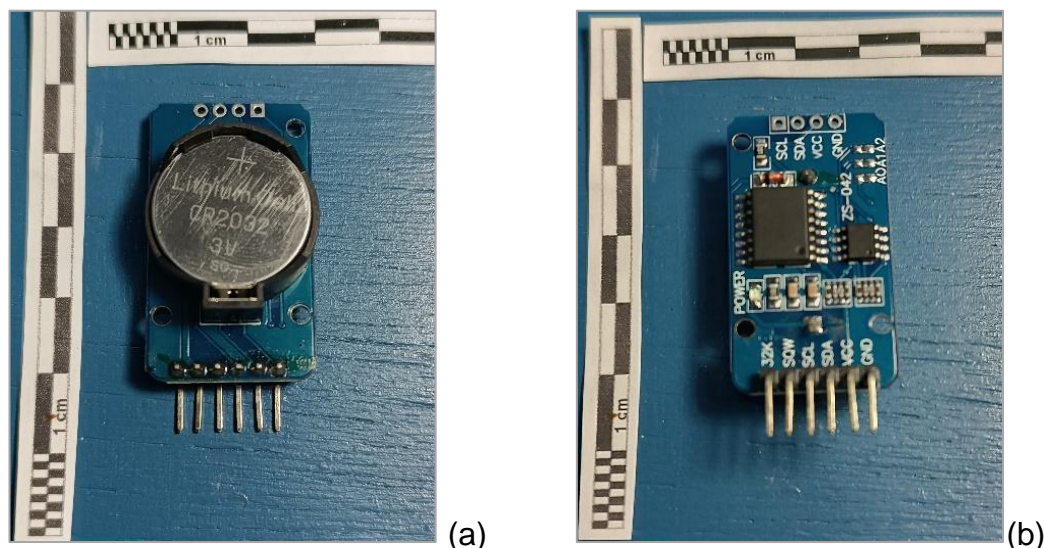
Fonte: A autora, 2022.

### 3.3.9 Módulo RTC

O módulo RTC (figura 31), ou módulo *Real Time Clock*, é um componente eletrônico que controla os dados de segundo, minuto, hora, dia, mês e ano e tem ajuste automático para anos bissextos. Esse dispositivo funciona mediante a alimentação da placa e também demanda uma bateria CR2032. A bateria garante que os dados fiquem armazenados caso a alimentação principal do módulo cesse. O *chip*

do módulo alterna automaticamente entre as fontes de energia principal e de *backup* quando necessário.

**Figura 31 – Módulo RTC com bateria CR2032 inserida.**



Legenda: (a) visão frontal com a bateria do módulo RTC e (b) visão do verso do módulo RTC.

Fonte: A autora, 2022.

Na câmara o módulo RTC funciona como relógio e foi colocado para registrar data, hora, minutos e segundos.

### 3.3.10 Fonte chaveada

Equipamentos eletrônicos requerem uma fonte de tensão contínua para funcionarem, entretanto, o fornecimento elétrico feito pelas concessionárias é transmitido em forma de corrente alternada. Assim, a corrente que chega às tomadas é de corrente alternada e precisa ser convertida em corrente contínua para alimentar circuitos eletrônicos. A fonte chaveada é, portanto, um conversor de corrente alternada em corrente contínua que regula a tensão de saída que alimenta o circuito eletrônico.

A fonte chaveada utilizada na CHC (figura 32) tem saída de 12 V, opera com corrente máxima de 3 A, tem potência máxima de 40 W e de pequenas dimensões (6,5 cm x 9,5 cm e 4,0 cm).

Figura 32 – Fonte chaveada.

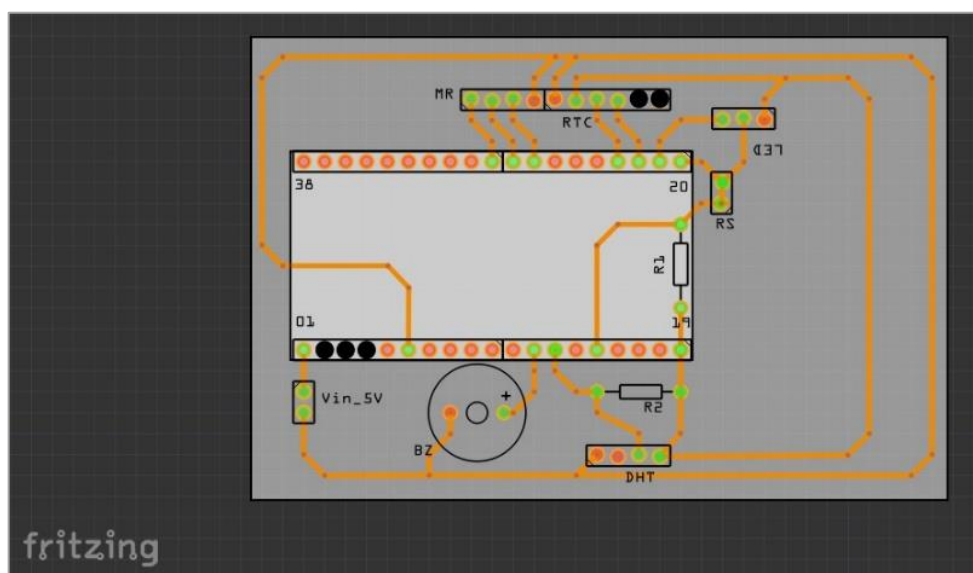


Fonte: A autora, 2022.

### 3.3.11 Confecção da placa do circuito

O projeto da placa de circuito produzida para a CHC foi elaborado no aplicativo *Fritzing* conforme indicado na figura 33.

Figura 33 – Imagem do projeto da placa do circuito gerada no aplicativo *Fritzing*.



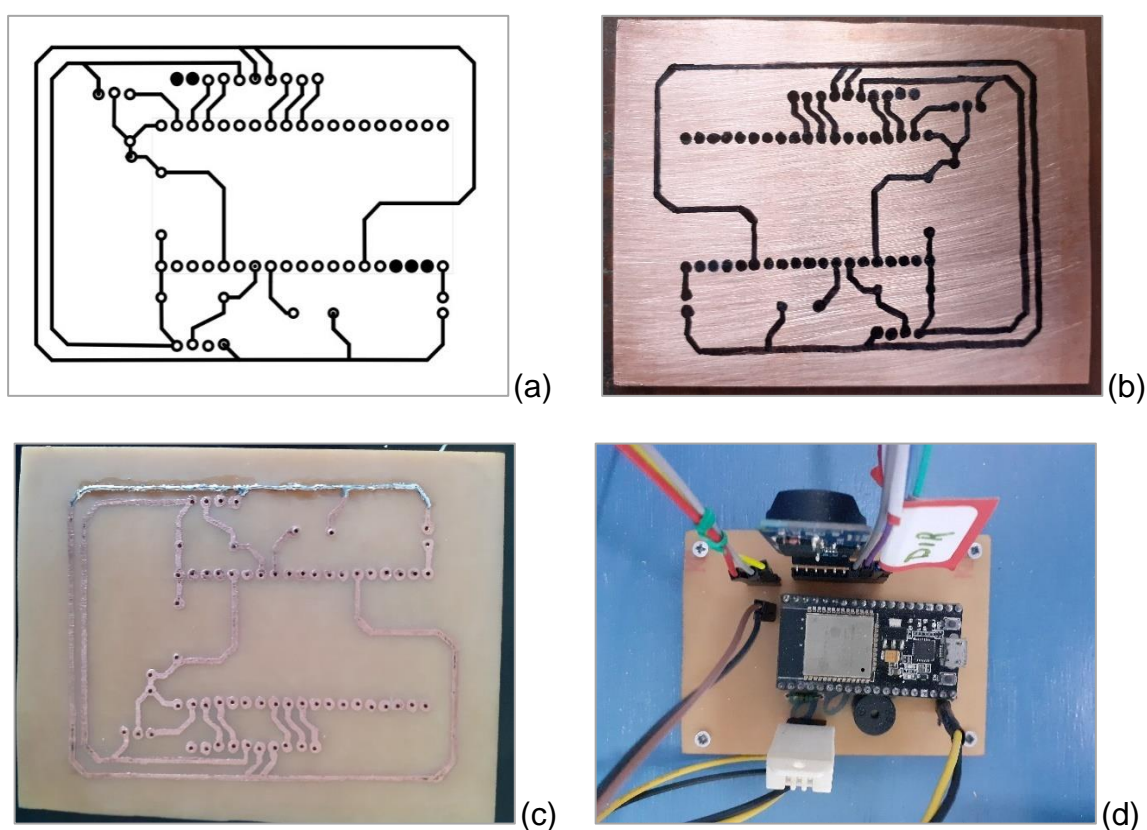
Fonte: A autora, 2022.

O desenho foi invertido e impresso em papel couchê e as trilhas do circuito foram transferidas para uma placa cobreada através de impressão térmica – quando o desenho é transferido para a placa de fenolite através de aquecimento. Para aquecer o desenho foi utilizado um ferro de passar e, uma vez que o desenho foi transferido

para a placa, ela é, em seguida, mergulhada numa solução de perclorato de ferro, que é uma solução corrosiva e sua função é corroer o cobre exposto, deixando para trás somente o cobre coberto pela tinta da impressora.

Após a corrosão, a placa foi lavada com uma esponja de aço e a tinta retirada do cobre. Em seguida foram feitos furos para o encaixe dos componentes e fios. A figura 34 contém as imagens das etapas da fabricação da placa de circuito confeccionada para a CHC.

**Figura 34 – Etapas de fabricação artesanal da placa do circuito da CHC.**



Legenda: (a) impressão com o desenho invertido gerado no aplicativo *Fritzing*; (b) tinta transferida para a placa de fenolite, antes da corrosão por perclorato de ferro; (c) desenho das trilhas remanescentes após a corrosão do cobre e (d) imagem da placa com os componentes eletrônicos instalada na CHC.

Fonte: A autora, 2022.

### 3.4 Sistema Embarcado

O sistema de automação da CHC foi desenvolvido por membros do núcleo de eletrônica do LIETA e é composto por duas partes integradas: o sistema de controle e a interface de operação.



### 3.4.1 Sistema de controle

O sistema de controle da Câmara de Desinfecção CHC foi programado no ambiente de desenvolvimento integrado Arduino IDE, na qual os códigos são escritos em C/C++ e implementado no microcontrolador ESP32. O sistema de controle foi desenvolvido de modo a conectar o microcontrolador a todos os sensores e periféricos que compõem a CHC. Conta com programação feita em módulos para facilitar a manutenção do código, e pensada de acordo com condições de segurança para a operação do equipamento. Estão definidas no código de programação do microcontrolador as seguintes ações:

- i. Criar um ponto de acesso de rede;
- ii. Definir os pinos de controles: associação entre o ESP32, os sensores e outras placas;
- iii. Ler a temperatura e a umidade do ar a cada 2 segundos;
- iv. Receber a informação do tempo de operação do equipamento (integração com a página HTML, que é a interface com o usuário);
- v. Ativar o *buzzer* caso a porta do equipamento seja aberta;
- vi. Ativar/Desativar simultaneamente motor, lâmpadas de UVC e fita de LED com a restrição de que estes somente funcionam quando a porta do equipamento está fechada e quando há indicação do tempo de operação da câmara.

O código de programação do Sistema de Controle está detalhado no APÊNDICE B.

### 3.4.2 Interface de operação

A interface para controle do equipamento é um arquivo de extensão HTML. Trata-se, portanto, de uma página com conteúdo responsivo programada em HTML e Java Script e que está integrado com o sistema de controle do equipamento.

Um conteúdo responsivo é aquele que se adapta ao formato da tela do dispositivo utilizado para a sua visualização. Assim, o layout da interface de operação se ajusta de modo a favorecer uma interação mais agradável ao usuário. A figura 35 mostra a tela de operação do equipamento onde o único dado de *input* necessário é

a indicação do tempo que as lâmpadas precisam ficar ligadas para o processo de desinfecção.

Sendo assim, a interação da página de operação é simples: o tempo de funcionamento do equipamento é informado. Em seguida, o usuário confirma o dado ativando o botão “ligar”. O acionamento do botão “ligar”, por sua vez, desencadeia todos os eventos que precisam ser simultâneos: a rotação do motor de passo para fazer os eixos e ganchos da área de irradiação girarem e o acendimento das lâmpadas do equipamento. A tela de operação (figura 35) mostra, em tempo real, com intervalo de 2 segundos, os valores da temperatura e da umidade do ar que são registrados pelo sensor DHT22. Em “tempo decorrido” ocorre a contagem regressiva do tempo de desinfecção informado como *input* nessa interface.

**Figura 35 – Tela de operação da CHC.**



**LIETA**

**UERJ**

**Câmara Harriette Chick (CHC)**  
Câmara de desinfecção de superfície por UVC

Indique abaixo o tempo para desinfecção.

Tempo:  segundos.

**LIGAR**

Temperatura da câmara: 0 °C  
Umidade da câmara: 0 %  
Tempo decorrido: 0 s

Página de controle desenvolvida por Roberta M. de P. S. Borges, Hamilton S. Gama Filho e Diogo S.S. da Costa.

Fonte: A autora, 2022.

O código de programação Interface de Operação do usuário está detalhado no APÊNDICE C.

### 3.5 Tomada de medidas

Para o mapeamento da irradiância no interior do equipamento, o espaço interno foi dividido em 3 planos e em cada plano foram definidos nove pontos onde foram executados os testes de repetibilidade para avaliação da irradiância, temperatura e umidade do ar – totalizando 27 pontos, distribuídos tridimensionalmente. A escolha por nove pontos para mapeamento de irradiância está intrinsicamente vinculado aos nove ganchos incluídos na estrutura mecânica do equipamento. O objetivo é mapear nos exatos nove locais onde os respiradores N95 devem ser desinfetados.

Na tabela 5 constam as alturas definidas para os planos analisados. Na base da câmara fica o plano 1 e, nesse plano foi arbitrado o zero da altura. O plano 2 foi definido a 17,5 cm acima da base e o plano 3 definido a 30,5 cm da base.

Tabela 5 – Altura dos planos internos da CHC.

Plano	Altura (cm)
1	0
2	17,5
3	30,5

Fonte: A autora, 2022.

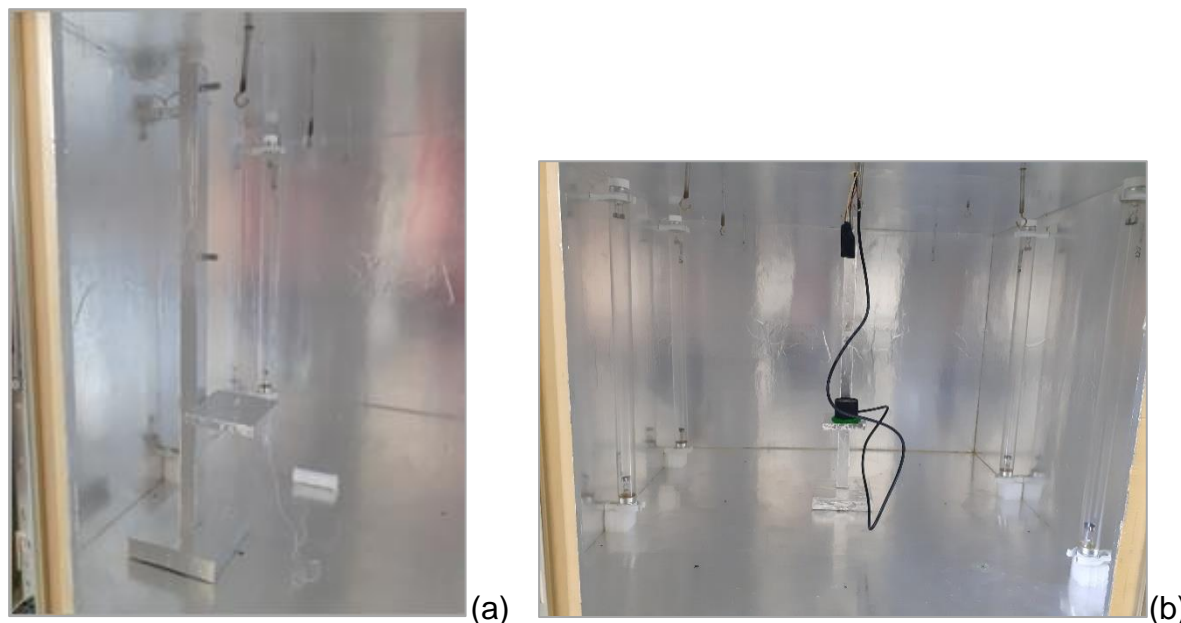
Portanto, para fazer os registros das medidas de irradiância, o sensor do radiômetro foi colocado alinhado na direção dos ganchos instalados do teto da área de irradiação. No plano 1, o sensor foi colocado diretamente na base da câmara. Para fazer as baterias de medidas nos planos 2 e 3 foi produzido um suporte de madeira, revestido de papel alumínio. Para garantir que o sensor ficasse alinhado com os ganchos instalados foi usado um fio de prumo todas as vezes que o sensor foi posicionado para registrar as medidas de irradiância.

O sensor DHT22 foi inserido dentro da área de irradiação, na parte superior do equipamento, para registro da temperatura e da umidade do ar. Este sensor tem tempo de resposta de 2 segundos, portanto, ele mede e informa ao microcontrolador os dados sobre a temperatura e a umidade relativa do ar a cada 2 segundos. Por meio da programação em Arduino, foi utilizada uma versão do sistema embarcado que mostra os valores registrados pelo DHT22 na tela do computador que esteja conectado via cabo USB/micro B ao microcontrolador ESP32 e as medidas

registradas pelo sensor foram salvas em documento .txt para posterior consulta, se necessário.

A figura 36 contém as fotos do suporte criado para a elevação do sensor do radiômetro pelos planos de análise e o posicionamento do equipamento de medida.

**Figura 36 – Visão interior da câmara com posicionamento do suporte e sensor.**



Legenda: (a) Posicionamento do suporte com o fio de prumo indicando onde o sensor do radiômetro deve ser colocado. (b) Suporte com o sensor do radiômetro posicionado para a realização das medidas.

Fonte: A autora, 2022.

Os valores de irradiância foram registrados pelo radiômetro MRUR-203 minuto a minuto. Assim, uma vez que a CHC foi ligada, as medidas para o mapeamento da irradiância foram realizadas a cada minuto em diferentes baterias de medidas com diferentes durações de intervalo de realização de medida. O MRUR-203 tem um display digital que mostra a irradiância aferida e, portanto, os valores medidos pelo radiômetro foram registrados manualmente em tabela *excel* juntamente com os valores de temperatura e umidade do ar mostrados em tela através da IDE do Arduino.

A primeira avaliação realizada foi a observação da estabilidade do sensor do radiômetro. Uma vez estabelecido o tempo de estabilização, foram realizadas, em seguida, medidas de irradiância com respectivo registro das variações de temperatura e umidade do ar em diferentes intervalos de tempo.

Foram, ainda, realizadas medidas na área externa em distâncias variadas em relação a CHC e não foi detectada irradiância mesmo com o sensor do radiômetro posicionado a 2,0 cm das frestas do equipamento. A CHC, portanto, opera de forma segura sem escape da radiação UVC.

## 4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados em relação ao mapeamento da irradiância e às variações de temperatura e umidade do ar registrados durante as medições de irradiância realizadas.

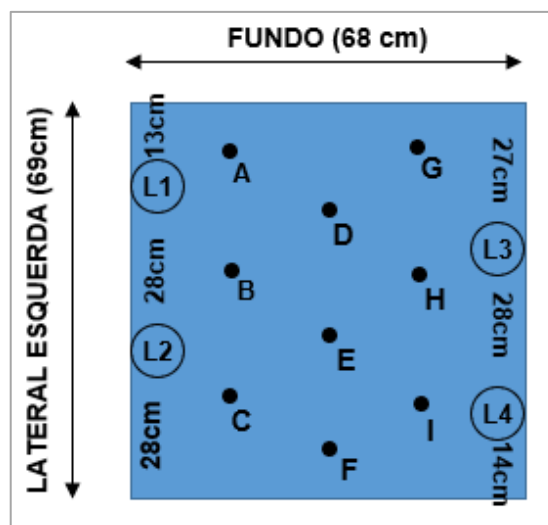
### 4.1 Irradiância

A irradiância é definida como o fluxo de energia radiante que atinge uma superfície dividida pela área dessa superfície. Aqui serão apresentados os valores teóricos previstos a partir do cálculo do parâmetro FRI (*fractional radiative irradiance*), os valores experimentais, assim como a comparação entre os valores teóricos e os valores de irradiância efetivamente medidos.

#### 4.1.1 Valores esperados

Para mapear a irradiância dentro do equipamento foram definidos nove pontos identificados pelas letras de A a I (figura 37). Esses mesmos pontos foram avaliados em 3 alturas diferentes com o objetivo de proporcionar o mapeamento tridimensional da irradiância dentro da câmara, totalizando 27 pontos avaliados.

**Figura 37 – Esquema dos pontos de mapeamento da irradiância em visão vertical da base da CHC.**



Fonte: A autora, 2022.

A tabela 6 mostra a distância dos 9 pontos supracitados às quatro lâmpadas instaladas nas laterais do equipamento e identificadas por L1, L2, L3 e L4.

Tabela 6 – Distâncias entre as lâmpadas e os pontos de medidas.

Lâmpada S	Distância (cm)								
	A	B	C	D	E	F	G	H	I
L1	11,3	20,6	40,3	29,7	36,7	52,0	48,7	51,5	62,0
L2	33,2	15,1	15,5	39,7	30,4	33,6	58,0	50,2	49,8
L3	51,3	48,8	54,4	32,7	30,3	41,6	20,4	11,3	26,7
L4	66,3	54,5	48,6	50,3	35,8	29,5	46,8	27,1	11,6

Fonte: A autora, 2022.

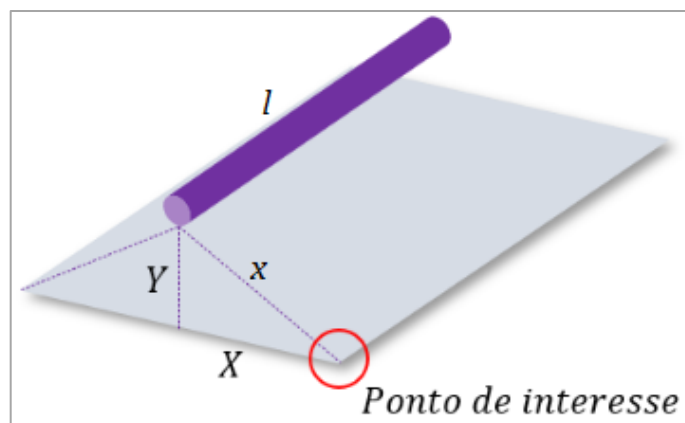
As lâmpadas utilizadas na CHC são fontes extensas de emissão de radiação. Ao determinar nove pontos para mapeamento dentro do equipamento se faz necessário estimar qual irradiância chega em cada um desses pontos, assim como também estimar se essa irradiância é uniforme no interior da CHC. Uma vez que as distâncias indicadas na tabela 6 são da mesma ordem de grandeza do comprimento das lâmpadas, as fontes de emissão da RUVVC não podem ser aproximadas a fontes pontuais. As lâmpadas, nesse contexto são, portanto, fontes extensas e sua geometria precisa ser levada em consideração na predição dos valores de irradiância a serem mapeados. Determinar se há uniformidade da irradiância dentro da CHC é fundamental para garantir que o equipamento realize desinfecções seguras uma vez que as regiões de menor irradiância precisam receber a dose mínima, mas que seja suficiente para a inativação do SARS-CoV-2 ou de qualquer outro microrganismo de interesse.

Para fontes pontuais a intensidade da irradiância é inversamente proporcional ao quadrado da distância. No caso de fontes extensas, toda a extensão da lâmpada contribui para irradiância aferida em um determinado ponto de interesse. A literatura de referência indica que modelagem matemática que melhor teve resultados em relação à previsão de dados experimentais é o modelo baseado em fatores de visão de radiação térmica (MODEST, 1993) no qual é calculado um parâmetro chamado irradiância radioativa fracional ou *fractional radiative irradiance* (FRI) que determina a fração de irradiância que chega em diferentes pontos de uma superfície (PESSÔA, 2021). O FRI também é conhecido como fator de visão que é a fração de energia que

deixa uma superfície difusa e que é absorvida por uma outra superfície. Esta fração é uma função geométrica que depende do tamanho da fonte, da distância de separação e orientação das superfícies envolvidas (MODEST, 2003).

Tanto a irradiância de uma ou mais lâmpadas quanto a irradiância devido a superfícies reflexivas podem ser determinadas através do uso de fatores de visão de radiação térmica (KOWALSKI, 2009). Entretanto, a seguir serão calculados apenas os fatores de visão de origem nas lâmpadas que desconsidera a contribuição da RUVC refletida pelo revestimento de alumínio no interior na CHC. Assim, os fatores de visão obtidos nesse trabalho servem não como uma exata e quantitativa previsão dos valores medidos experimentalmente, mas podem ser utilizados em análise comparativa de modo a sinalizar qualitativamente se os dados experimentais apresentam tendência de comportamento de acordo com a modelagem matemática indicada na literatura. Se os dados experimentais estiverem de acordo com a previsão teórica relatada na literatura, a confiabilidade em relação ao desempenho do equipamento para a obtenção de desinfecções seguras tende a aumentar. A figura 38 contém o esquema geométrico de iluminação indicando os parâmetros considerados para o cálculo do fator FRI.

**Figura 38 – Geometria de iluminação de um plano por uma lâmpada linear.**



Fonte: PESSÔA, 2021, p. 5. Adaptado pela autora.

Portanto, a irradiância radioativa fracional, ou FRI, é um adimensional dado por:

$$FRI = \left( \frac{L}{\pi H} \right) \left[ \frac{1}{L} \arctg \left( \frac{L}{\sqrt{H^2 - 1}} \right) - \arctg \left( \frac{H - 1}{\sqrt{H + 1}} \right) + \left( \frac{X - 2H}{\sqrt{XY}} \right) \arctg \left( \frac{X(H - 1)}{\sqrt{Y(H - 1)}} \right) \right] \quad (10)$$



Onde:

$$H = \frac{x}{r} \quad (11)$$

$$L = \frac{l}{r} \quad (12)$$

$$X = (1 + H)^2 + L^2 \quad (13)$$

$$Y = (1 - H)^2 + L^2 \quad (14)$$

Sendo:

$x$  é a distância do ponto de interesse à lâmpada;

$l$  é o comprimento do segmento da lâmpada que irradia o ponto de interesse;

$r$  é o raio da lâmpada.

A partir do cálculo da FRI, a irradiância num determinado ponto P,  $I_P$ , será dada por:

$$I_P = \frac{P_{uvc}}{2\pi r l} FRI \quad (15)$$

Onde  $P_{uvc}$  é a potência de radiação UVC irradiada pela lâmpada.

No caso das lâmpadas utilizadas na CHC foram utilizadas quatro lâmpadas do mesmo modelo e, segundo a ficha de dados do fornecedor, cada uma delas emite 4,9 W de potência de UVC.

No caso dos pontos de avaliação indicados na figura 39, para cada um desses pontos existe a contribuição das quatro lâmpadas na composição da irradiância total. Assim, para cada ponto é necessário o cálculo de quatro parâmetros FRI – um para cada lâmpada por ponto avaliado. O valor teórico da irradiância naquele ponto, proveniente exclusivamente das lâmpadas, é assim, uma superposição dos fluxos radiantes emitidos por cada lâmpada. Logo, no ponto A chega a irradiância produzida pela lâmpada L1 somada à irradiância proveniente da lâmpada L2, mais a irradiância das lâmpadas L3 e L4:

$$I_A = \frac{P_{uvc}}{2\pi r l} FRI_{A-L1} + \frac{P_{uvc}}{2\pi r l} FRI_{A-L2} + \frac{P_{uvc}}{2\pi r l} FRI_{A-L3} + \frac{P_{uvc}}{2\pi r l} FRI_{A-L4} \quad (16)$$

Como são utilizadas quatro lâmpadas idênticas de mesmo raio, comprimento e potência de UVC emitida, a equação 16 pode ser reescrita como:

$$I_A = \frac{P_{uvc}}{2\pi r l} (FRI_{A-L1} + FRI_{A-L2} + FRI_{A-L3} + FRI_{A-L4}) \quad (17)$$

O cálculo indicado na equação 17 foi aplicado para todos os nove pontos arbitrados, na base do equipamento e, portanto, considerando toda a extensão da lâmpada e, assim, a contribuição toda a potência de UVC emitida. Com esse cálculo foram obtidos os valores teóricos da irradiância indicados na tabela 7

Tabela 7 – Valores de irradiância previstos pelo cálculo do parâmetro FRI ordenados do maior para o menor valor no plano 1.

Pontos	Irradiância Teórica (mW/cm <sup>2</sup> )		
	Plano 1	Plano 2	Plano 3
<b>H</b>	1,36	1,24	1,00
<b>I</b>	1,32	1,20	0,96
<b>B</b>	1,27	1,15	0,88
<b>A</b>	1,25	1,13	0,92
<b>C</b>	1,02	0,89	0,65
<b>E</b>	0,97	0,81	0,52
<b>D</b>	0,85	0,70	0,44
<b>G</b>	0,83	0,70	0,47
<b>F</b>	0,83	0,67	0,42

Fonte: A autora, 2022.

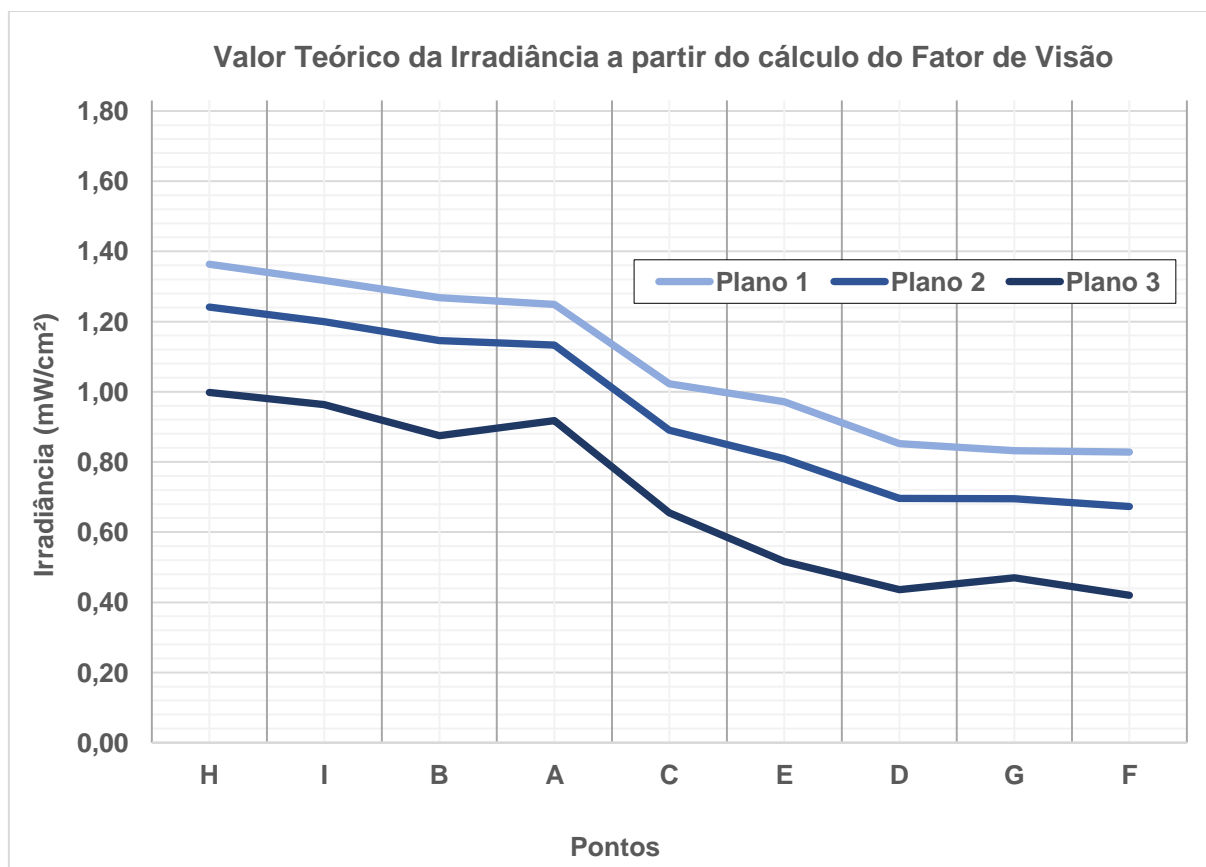
Numa primeira avaliação dos dados indicados na tabela 7 é possível dividir os pontos de mapeamento em dois grupos: o grupo onde são esperadas as maiores medidas de irradiância composto pelos pontos H, I, B e A e um segundo grupo composto pelos demais pontos, onde são esperados os menores valores de irradiância. Esse comportamento se repete nas três seções transversais avaliadas e indicadas na tabela por plano 1, plano 2 e plano 3.

A partir do cálculo do parâmetro FRI e da obtenção dos valores previstos da irradiância nos pontos de mapeamento nas três seções transversais, também

arbitradas no interior do equipamento, é possível definir três curvas de tendência esperadas para os valores da irradiância medidos experimentalmente (figura 39). As curvas foram montadas com os valores de irradiância, em geral, de forma decrescente.

Os valores esperados com suas respectivas curvas de tendência serão retomados nas seções a seguir quando da comparação com os dados experimentais do mapeamento da irradiância na CHC.

**Figura 39 – Curvas de tendência dos valores teóricos de irradiância no interior da CHC.**



Fonte: A autora, 2022

#### 4.1.2 Valores experimentais: média da irradiância.

Conforme citado na sessão 3.1.2, o sensor do radiômetro demanda um tempo para estabilizar a medida de irradiância. Quando o equipamento MRUR-203 é ligado e exposto à radiação UVC é observado que ele começa a registrar as medidas de irradiância de forma crescente até um determinado momento no qual a medida

apresentada no *display* se mantém constante. Este comportamento do radiômetro foi observado tanto quando ligado ao mesmo tempo das lâmpadas, quanto ligado posteriormente às lâmpadas. Ou seja, as lâmpadas ligadas simultaneamente ou não ao radiômetro não tiveram impacto, aparentemente, na forma como a medida de irradiância é gerada – o que demonstra que o sensor do radiômetro demanda, de fato, um tempo de estabilização e, portanto, as primeiras medidas registradas pelo equipamento não equivalem a efetiva irradiância que chega ao ponto de interesse no qual é posicionado o sensor. Foi observado, portanto, que no caso do radiômetro MRUR-203 as medidas realizadas nos primeiros 5 minutos a partir do momento que o equipamento é ligado precisaram ser desconsideradas.

Assim, desconsiderando os 5 minutos iniciais, os 35 minutos seguintes foram integralmente considerados e obtidos os valores médios de irradiância, com respectivos desvios padrão, desvios das médias e erros relativos indicado na tabela 8. Os valores são apresentados com 3 algarismos significativos. A partir do desvio padrão é calculado o desvio da média que é dado por:

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma_x}{\sqrt{N}} \quad (18)$$

E a partir do desvio da média, obtém-se o erro relativo dado pela equação:

$$\text{erro relativo} = \frac{\sigma_{\bar{x}}}{|\bar{x}|} \quad (19)$$

Para  $N = 35$ , foram obtidos os dados indicados na tabela 8, com erros relativos inferiores a 1%. Os baixos percentuais para os erros sugerem que os dados experimentais foram registrados em condições controladas e que o radiômetro atingiu estabilidade da leitura da irradiância mostrando valores precisos.

Comparando os dados de irradiância média indicados na tabela 8, que equivalem aos valores de irradiância aferidos após a estabilização do sensor, com os valores da previsão teórica do cálculo do parâmetro FRI obteve-se o gráfico indicado na figura 40. Nesse gráfico as curvas vermelhas equivalem aos dados experimentais e as curvas azuis aos valores teóricos de irradiância com origem nas lâmpadas sem considerar a contribuição de reflexão nas paredes revestidas de papel alumínio no interior da CHC.

Tabela 8 – Irradiância média para os pontos mapeados nas três alturas.

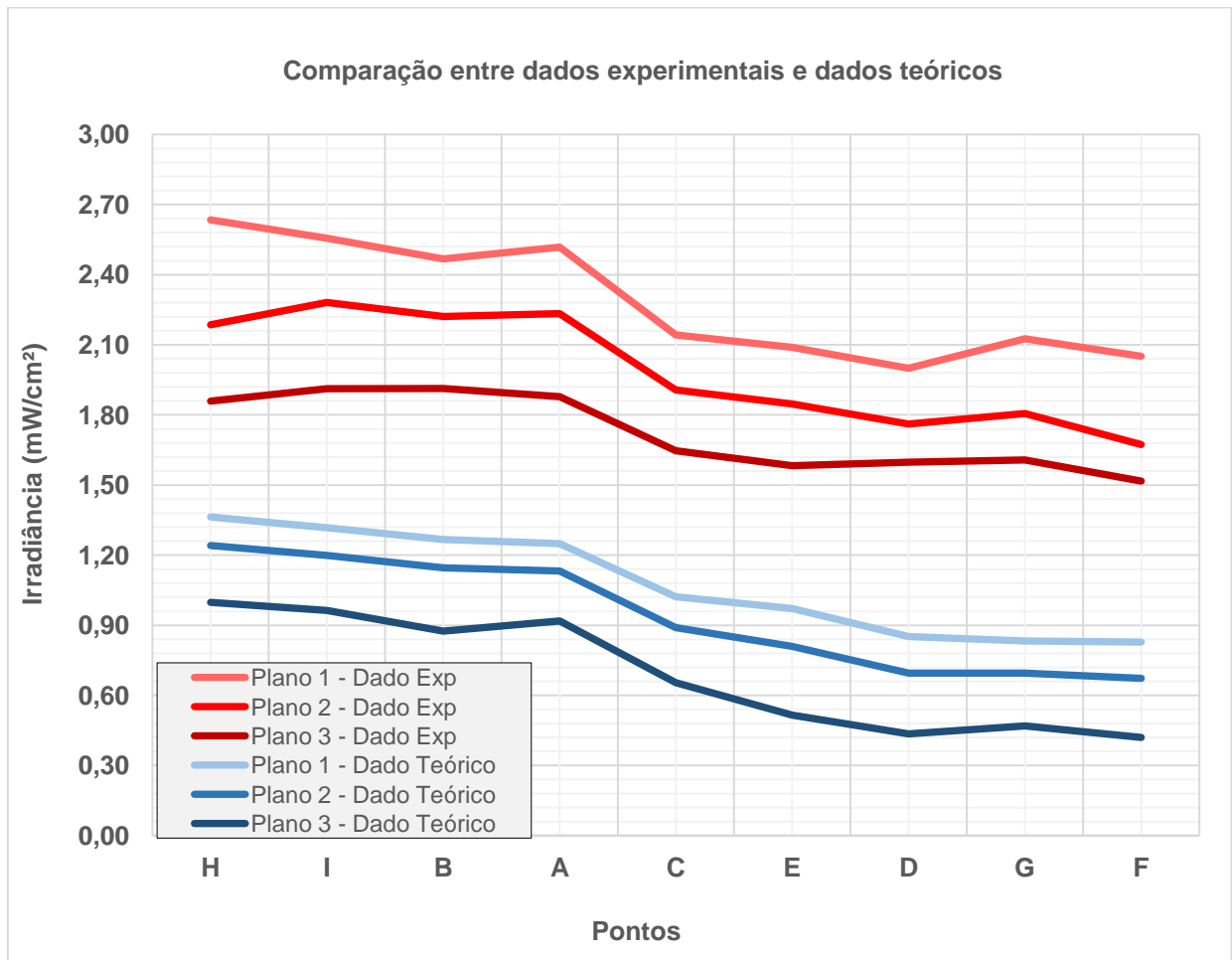
Nível	Ponto	Irradiância média (mW/cm <sup>2</sup> )	Desvio padrão (mW/cm <sup>2</sup> )	Desvio da média (mW/cm <sup>2</sup> )	erro relativo (%)
1	A	2,52	0,0221	0,00374	0,149
	B	2,47	0,0243	0,00410	0,166
	C	2,14	0,0291	0,00492	0,230
	D	2,00	0,0291	0,00492	0,246
	E	2,09	0,0204	0,00345	0,165
	F	2,05	0,0340	0,00574	0,280
	G	2,13	0,0148	0,00250	0,117
	H	2,63	0,0247	0,00417	0,158
	I	2,56	0,0329	0,00556	0,217
2	A	2,23	0,0112	0,00189	0,0847
	B	2,22	0,0188	0,00319	0,143
	C	1,91	0,0181	0,00307	0,161
	D	1,76	0,0191	0,00323	0,183
	E	1,85	0,0233	0,00393	0,213
	F	1,67	0,0128	0,00217	0,130
	G	1,81	0,0086	0,00145	0,0805
	H	2,19	0,0196	0,00331	0,151
	I	2,28	0,0188	0,00318	0,139
3	A	1,88	0,0162	0,00274	0,146
	B	1,91	0,0089	0,00150	0,0780
	C	1,65	0,0202	0,00341	0,207
	D	1,60	0,0147	0,00248	0,155
	E	1,58	0,0120	0,00203	0,129
	F	1,52	0,0133	0,00224	0,148
	G	1,61	0,0120	0,00202	0,126
	H	1,86	0,0156	0,00263	0,142
	I	1,91	0,0172	0,00290	0,152

Fonte: A autora, 2022.

Comparando os dois conjuntos de curvas da figura 40, é possível observar que os dados experimentais possuem um comportamento semelhante aos valores teóricos considerados. Observa-se que no interior do equipamento há um grupo de pontos que recebe, efetivamente, uma maior irradiância do que o outro grupo. Nos pontos H, I, B

e A a irradiância é maior do que nos pontos C, D, E, G e F. Esta tendência se confirma quando por meio da análise dos dados experimentais nos testes realizados para avaliar a estabilidade do sensor do radiômetro MRUR-203. As curvas dos dados experimentais possuem um desenho ligeiramente diferente, com destaque para alguns pontos onde aparentemente chega uma maior irradiância (quando comparada com a curva teórica). Essas pequenas diferenças no desenho das curvas dos dados experimentais, assim como a aferição de valores a maior em comparação aos valores teóricos calculados, podem ser atribuídas à contribuição da reflexão da irradiância que ocorre na superfície laminada de alumínio que reveste o interior da CHC.

**Figura 40 – Comparação das curvas dos valores teóricos e dos dados experimentais de irradiância.**



Fonte: A autora, 2022.

#### 4.1.3 Valores experimentais: testes de repetibilidade dos valores de irradiância em diferentes intervalos de tempo.

Após as primeiras medidas para aferição da irradiância média, foram realizados testes de repetibilidade em diferentes intervalos de tempo. Foram definidos cinco intervalos para avaliação da irradiância com as respectivas durações: 1 minuto, 3 minutos, 5 minutos, 7 minutos e 10 minutos. A escolha de intervalos de curta duração foi feita tendo em vista a quantidade de pontos a serem avaliados (27 pontos no total) e a possibilidade de repetir cada avaliação 3 vezes.

Assim, para os testes de repetibilidade nos intervalos supracitados foi elaborado o seguinte procedimento: ligar o sensor e as lâmpadas simultaneamente e registrar as medidas de irradiância, temperatura e umidade do ar minuto a minuto na duração do intervalo avaliado. A condição para a realização dos testes nos intervalos é o que sensor estivesse desligado por um tempo igual à duração do intervalo avaliado. Portanto, cada intervalo de avaliação é precedido pelo tempo equivalente do equipamento desligado. Neste caso, para avaliar o intervalo de 1 minuto, as lâmpadas do equipamento foram antes desligadas por 1 minuto; da mesma forma o intervalo de 3 minutos foi precedido de 3 minutos de interrupção da emissão da radiação UVC. E assim sucessivamente para a avaliação dos intervalos de 5, 7 e 10 minutos. Todas as medidas foram feitas em sequência e, quando realizadas em dias diferentes, os intervalos somente foram medidos após, pelo menos, o equipamento e o radiômetro ficarem ligados por 40 minutos.

As medidas foram registradas minuto a minuto. Assim, para o intervalo de 1 minuto, há uma medida de irradiância quando o relógio registra o equipamento e o sensor ligados por 1 minuto; para o intervalo de 3 minutos há 3 medidas de irradiância correspondentes aos 3 minutos que o equipamento e o sensor permaneceram ligados e o mesmo se dá para os intervalos de 5, 7 e 10 minutos. A tabela 9 mostra o total de medidas realizadas por intervalo, uma vez que cada bateria de medidas foi repetida 3 vezes para cada ponto de mapeamento.

Tabela 9 – Quantidade de medidas de irradiância, temperatura e umidade do ar aferidas nos intervalos avaliados nos testes de repetibilidade.

<b>Intervalos (min)</b>	<b>Total de medidas realizadas</b>
<b>01</b>	3
<b>03</b>	9
<b>05</b>	15
<b>07</b>	21
<b>10</b>	30
<b>total</b>	<b>78</b>

Fonte: A autora, 2022.

A tabela 10 mostra a quantidade de medidas válidas por bateria de medições considerando que as medidas de cada intervalo foram repetidas três vezes.

Tabela 10 – Quantidade de medidas válidas por bateria de medidas com respectivos totais.

<b>Intervalos (min)</b>	<b>Medidas válidas por intervalo</b>	<b>Total de medidas válidas realizadas</b>
<b>01</b>	1	3
<b>03</b>	3	9
<b>05</b>	4	12
<b>07</b>	6	18
<b>10</b>	9	27
<b>subtotal</b>	<b>23</b>	<b>69</b>
<b>40</b>	<b>35</b>	<b>35</b>
<b>total</b>	<b>58</b>	<b>104</b>

Fonte: A autora, 2022.

Assim, há um total de 69 medidas de irradiância por ponto de mapeamento interno da CHC nos testes de repetibilidade e a partir dessas medidas foram obtidos valores médios de irradiância por intervalo avaliado por ponto de mapeamento e os resultados compilados na tabela 11.



Tabela 11 – Valores de irradiância média por intervalo analisado e por ponto de mapeamento.

Nível	Pontos	Média da irradiação (mW/cm <sup>2</sup> )				
		01 (min)	03 (min)	05 (min)	07 (min)	10 (min)
1	A	2,57	2,55	2,57	2,57	2,58
	B	2,54	2,52	2,53	2,62	2,64
	C	2,26	2,24	2,23	2,31	2,24
	D	2,07	2,06	2,07	2,07	2,08
	E	2,13	2,11	2,14	2,13	2,13
	F	2,13	2,13	2,15	2,15	2,14
	G	2,20	2,18	2,21	2,18	2,18
	H	2,68	2,66	2,69	2,69	2,69
	I	2,65	2,64	2,66	2,65	2,65
2	A	2,28	2,24	2,27	2,29	2,26
	B	2,24	2,19	2,23	2,25	2,25
	C	2,00	2,00	2,01	1,99	1,95
	D	1,80	1,79	1,80	1,80	1,80
	E	1,86	1,83	1,85	1,85	1,85
	F	1,74	1,73	1,72	1,71	1,73
	G	1,91	1,89	1,91	1,87	1,89
	H	2,38	2,42	2,37	2,23	2,29
	I	2,34	2,34	2,32	2,28	2,30
3	A	1,87	1,86	1,88	1,90	1,94
	B	1,90	1,90	1,92	1,94	1,94
	C	1,70	1,68	1,70	1,69	1,68
	D	1,61	1,61	1,61	1,61	1,61
	E	1,62	1,61	1,62	1,62	1,62
	F	1,55	1,54	1,55	1,54	1,54
	G	1,61	1,60	1,61	1,62	1,61
	H	1,85	1,83	1,84	1,86	1,87
	I	1,93	1,93	1,94	1,94	1,93

Fonte: A autora, 2022.

Os valores indicados na tabela 11 possuem 3 algarismos significativos, os erros médios podem ser considerados baixos em relação aos valores médios de irradiância produzindo erros relativos abaixo de 2%. A variação entre os valores médios quando comparados diferentes intervalos de tempo são, em geral, pequenas variações entre

os valores máximo e mínimo obtidos para um mesmo ponto de mapeamento. A maior variação entre as médias de um mesmo ponto ocorre nas medidas do ponto H2, no qual a menor média de irradiância de 2,23 mW/cm<sup>2</sup> se dá quando são avaliados intervalos de 7 minutos enquanto que a maior média no valor de 2,42 mW/cm<sup>2</sup> ocorre nas medidas de irradiância quando os intervalos de 3 minutos são considerados. A menor variação, por sua vez, dos valores indicados na tabela 11, ocorre no ponto D3 com uma variação de 0,00778 mW/cm<sup>2</sup> de diferença entre os valores de irradiância máximo e mínimo aferidos nesse ponto.

A tabela 11 mostra os valores de irradiância média apenas. Os dados completos com a indicação dos respectivos desvios médios seguem em tabela destacada no APÊNDICE D.

#### 4.1.4 Mapeamento tridimensional da irradiância no interior da CHC.

A partir dos valores aferidos de irradiância para cada intervalo indicado na tabela 11, é possível estimar o valor médio da irradiância em cada ponto, considerando todas as medidas válidas, incluindo as medidas de avaliação de estabilidade do sensor indicadas na tabela 8. Assim, considerando 104 medidas por ponto de mapeamento, foram obtidos valores médios de irradiância com respectivos desvios médios e erros relativos (tabela 12).

Os baixos erros relativos sugerem que os dados experimentais foram tomados em condições controladas e que o radiômetro atingiu estabilidade da leitura da irradiância apresentando valores precisos. Na figura 41, as curvas vermelhas equivalem aos dados experimentais do mapeamento da irradiância dentro da câmara e que estão indicados na tabela 12, já as curvas azuis correspondem aos valores teóricos de irradiância com origem nas lâmpadas sem considerar a contribuição de reflexão nas paredes revestidas de papel alumínio no interior da CHC.

Comparando os dois conjuntos de curvas, assim como no caso da comparação com dados experimentais da avaliação da estabilidade do sensor conforme exposto na figura 41, é possível, mais uma vez, observar que os dados experimentais possuem um comportamento semelhante aos valores teóricos considerados. Mantém-se a divisão entre dois grupos de pontos analisados: o grupo formado pelos pontos H, I, B

e A compreende os pontos que recebem maior irradiância, enquanto que a irradiância que chega aos pontos C, D, E, G e F é menor.

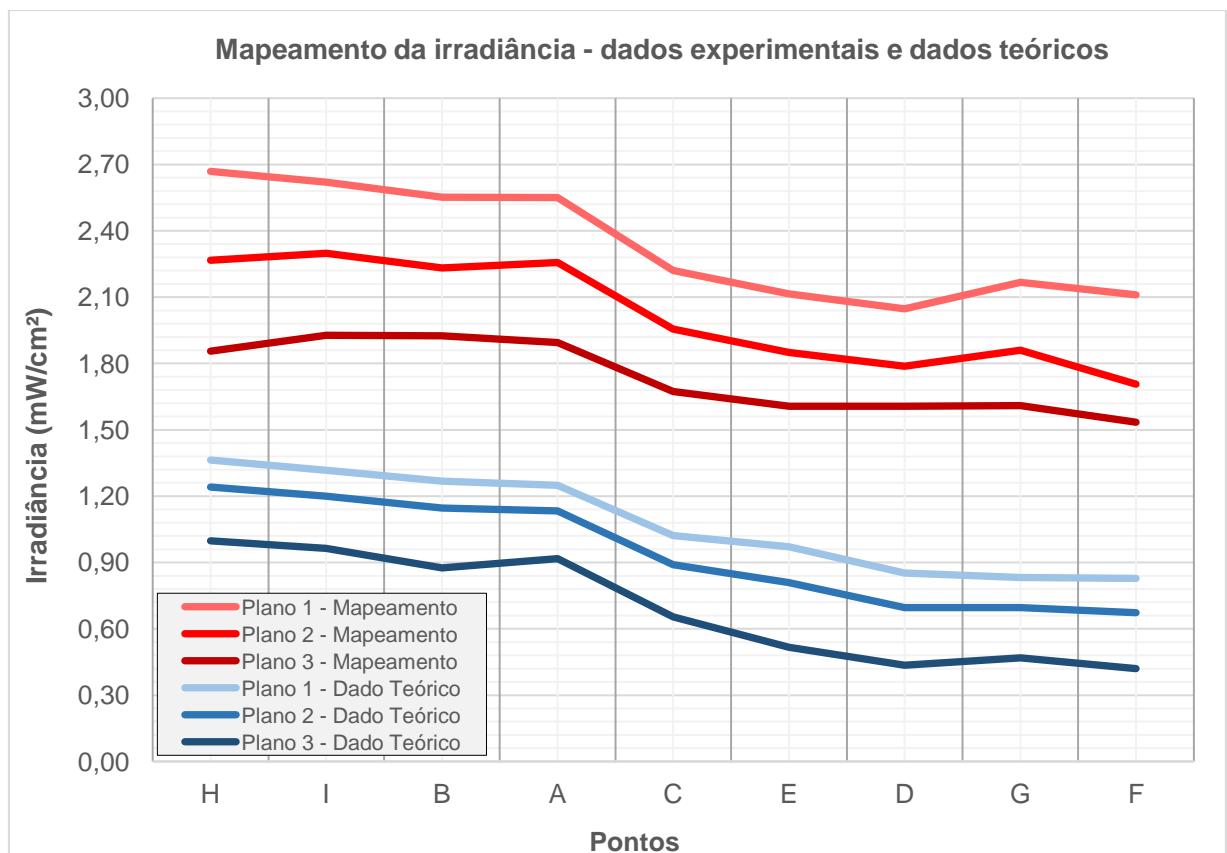
Tabela 12 – Valores de mapeamento da irradiância e respectivos erros associados.

<b>Nível</b>	<b>Pontos</b>	<b>Irradiância média (mW/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>erro relativo (%)</b>
<b>1</b>	<b>A</b>	2,55 ± 0,00414	0,162
	<b>B</b>	2,55 ± 0,00890	0,349
	<b>C</b>	2,22 ± 0,00681	0,307
	<b>D</b>	2,05 ± 0,00445	0,218
	<b>E</b>	2,11 ± 0,00308	0,146
	<b>F</b>	2,11 ± 0,00477	0,226
	<b>G</b>	2,17 ± 0,00404	0,187
	<b>H</b>	2,67 ± 0,00371	0,139
	<b>I</b>	2,62 ± 0,00506	0,193
<b>2</b>	<b>A</b>	2,26 ± 0,00298	0,132
	<b>B</b>	2,23 ± 0,00301	0,135
	<b>C</b>	1,96 ± 0,00502	0,256
	<b>D</b>	1,79 ± 0,00280	0,157
	<b>E</b>	1,85 ± 0,00221	0,120
	<b>F</b>	1,71 ± 0,00362	0,212
	<b>G</b>	1,86 ± 0,00469	0,252
	<b>H</b>	2,27 ± 0,00979	0,432
	<b>I</b>	2,30 ± 0,00453	0,197
<b>3</b>	<b>A</b>	1,89 ± 0,00327	0,173
	<b>B</b>	1,92 ± 0,00301	0,156
	<b>C</b>	1,67 ± 0,00272	0,163
	<b>D</b>	1,61 ± 0,00213	0,133
	<b>E</b>	1,61 ± 0,00257	0,160
	<b>F</b>	1,53 ± 0,00200	0,130
	<b>G</b>	1,61 ± 0,00180	0,112
	<b>H</b>	1,86 ± 0,00292	0,157
	<b>I</b>	1,93 ± 0,00287	0,149

Fonte: A autora, 2022.

As curvas dos dados experimentais mantêm um desenho ligeiramente diferente quando comparada com a curva dos valores teóricos calculados a partir do parâmetro FRI. Essas pequenas diferenças no desenho das curvas dos dados experimentais, assim como a aferição de valores a maior em comparação aos valores teóricos calculados, podem ser atribuídas à contribuição da reflexão da irradiância que ocorre na superfície laminada de alumínio que reveste o interior da CHC.

**Figura 41 – Curvas dos valores teóricos e dos dados experimentais obtidos para o mapeamento da irradiância no interior da CHC.**



Fonte: A autora, 2022.

Para visualizar de forma tridimensional os valores das médias da irradiância efetiva medida na CHC foram realizadas interpolações por *Thin-Plate Splines* (TPS), que são combinações lineares de funções polinomiais de efeito não global e que geralmente são utilizadas para modelagens de superfícies que sofrem distorções locais ou que sejam compostas por dados irregularmente espaçados. A interpolação por TPS é um tipo de aproximação aplicada a uma dispersão de dados utilizando o método de mínimos quadrados móveis, também conhecido como método MLS

(*Moving Least Squares*). O impacto de quadrados móveis nessa abordagem implica que efeitos de distorções provocados em alterações de coordenadas locais não sejam propagados para toda função alterando o desenho da superfície interpolada. O conceito da TPS foi inicialmente desenvolvido como uma ferramenta que expressa a minimização da energia necessária para deformação em alguns pontos amostrais de uma placa de metal fixa. A formulação matemática decorrente garante que a deformação nesses pontos seja mínima e suave (BOOKSTEIN, 1989).

As funções *thin-plate* também são funções de base radial ou RBFs (*radial basis functions*) e possuem a forma:

$$w(d) = \begin{cases} d^k, & \text{se } k = 1,3,5, \dots \\ d^k \ln(d), & \text{se } k = 2,4,6, \dots \end{cases} \quad (20)$$

Funções de base radial produzem um único interpolante que se ajuste a todos os dados de pontos dispersos fornecidos. Assim, o método de interpolação por TPS produz uma superfície com mínima curvatura e que passa por todos os pontos dispersos (GOMES, 2009).

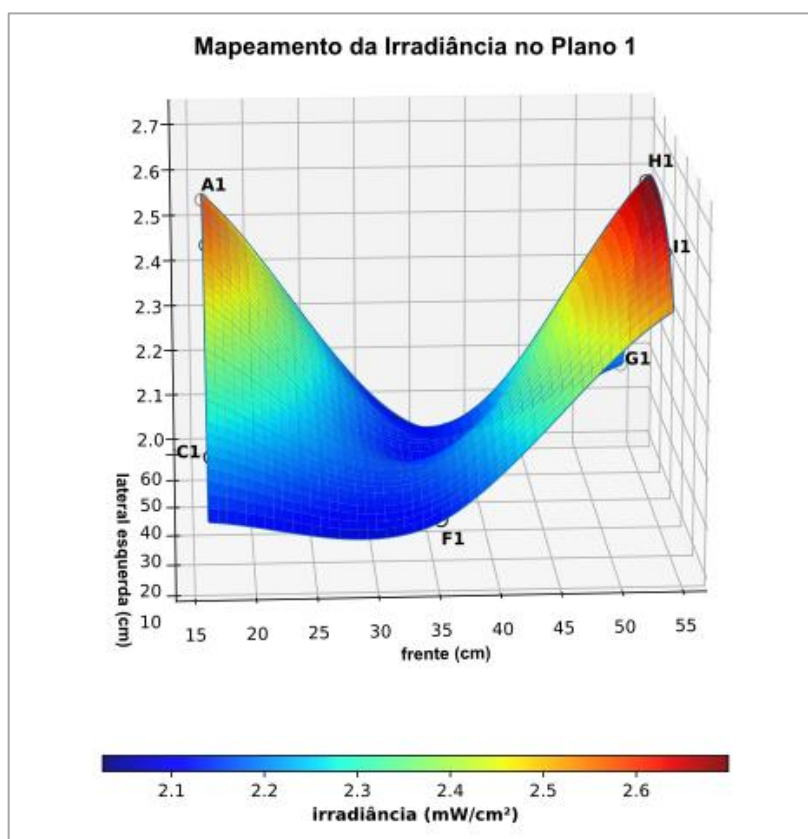
Os gráficos com a interpolação da irradiância medida na CHC foram construídos a partir das bibliotecas NumPy, SciPy e Matplotlib para programação em Python, sendo a interpolação por funções do tipo RBF em n-dimensões acessível através de uma função já disponível na biblioteca SciPy. A interpolação por *spline* do tipo *thin-plate* foi escolhida, também, devido o melhor ajuste ao conjunto de dados dispersos disponíveis quando comparado com as demais funções do tipo RBF disponíveis na biblioteca SciPy. Portanto, a partir dos dados de irradiância média indicados na tabela 14 foram elaborados três gráficos: um para cada plano avaliado.

A figura 42 mostra o gráfico com os pontos de A a I que apresenta os valores de irradiância média calculados para o plano 1, no qual o sensor da RUVC foi posicionado na base da câmara. O gráfico foi construído em 3D para facilitar a visualização da distribuição a irradiância no interior do equipamento, assim como para favorecer a identificação dos pontos e, conseqüentemente regiões onde a irradiância é menor.

No gráfico, o eixo da abscissa corresponde à frente do equipamento, enquanto que o eixo das ordenadas corresponde à lateral esquerda da CHC – esses dois eixos possuem as coordenadas de localização dos pontos de medição. É no eixo de cotas

que se encontra a escala dos valores de irradiância. Assim, os valores das irradiâncias médias juntamente às distâncias medidas em relação à aresta frontal esquerda do equipamento compõem pontos em três dimensões que formam, por sua vez, um gráfico de dispersão.

**Figura 42 – Dispersão dos pontos de irradiância no plano 1 e interpolação por *thin-plate spline*.**



Fonte: A autora, 2022.

Sobre os pontos dispersos é interpolada uma superfície – uma *spline* do tipo *thin-plate* conforme já citado – que mostra de forma contínua como a irradiância se comporta, com maiores valores aferidos nas regiões mais próximas às lâmpadas de UVC. Assim, lendo o gráfico da esquerda para a direita é observado que os valores de irradiância decrescem, conforme a radiação se afasta da fonte emissora e voltam a crescer conforme se aproximam das lâmpadas fixadas na lateral direita do equipamento.

A interpolação por *spline* do tipo *thin-plate* passa por todos os pontos de dispersão obtidos a partir dos dados experimentais e traz como resultado uma

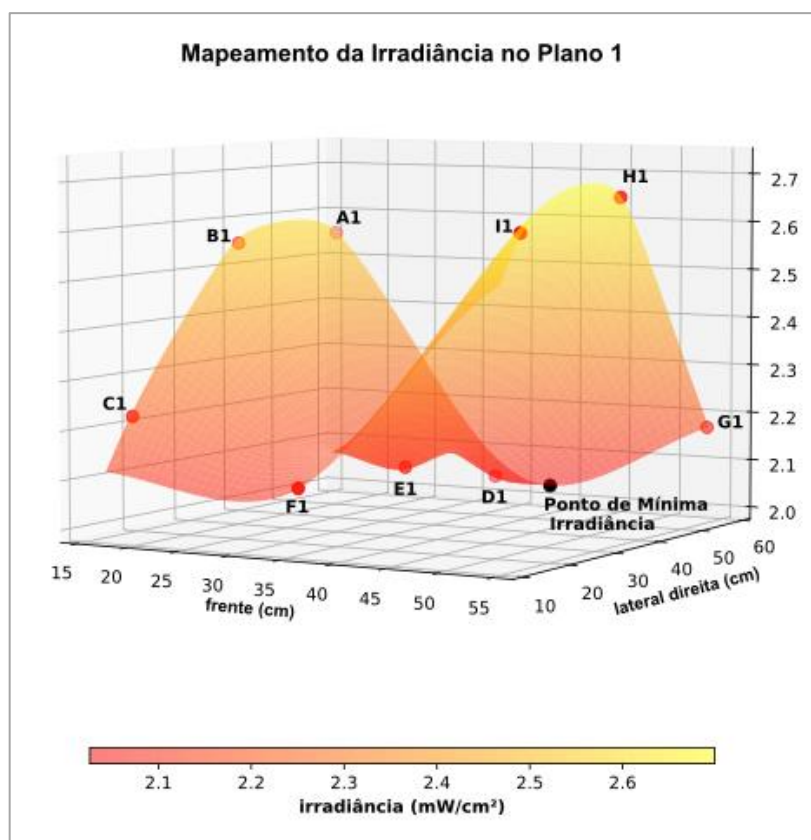
superfície que sugere como os valores de irradiância variam no interior do equipamento. A partir da superfície interpolada é possível obter o valor mínimo de irradiância alcançado. Após esse valor mínimo, os valores de dose de inativação devem ser estimados. Pois, é nesse ponto de valor mínimo que deve chegar a irradiância da RUVC por tempo suficiente de modo que a dose de inativação do microrganismo de interesse produza, pelo menos, um log de redução na amostra irradiada. Para o mapeamento de irradiância do plano 1, o ponto de mínimo se dá nas coordenadas:

$x \approx 38,4$  cm (distância em relação à lateral esquerda do equipamento);

$y = 58,5$  cm (distância em relação à frente da câmara);

$z \approx 2,03$  mW/cm<sup>2</sup>

**Figura 43 – Mapeamento da Irradiância com superfície interpolada e indicação de ponto de mínimo no plano 1.**

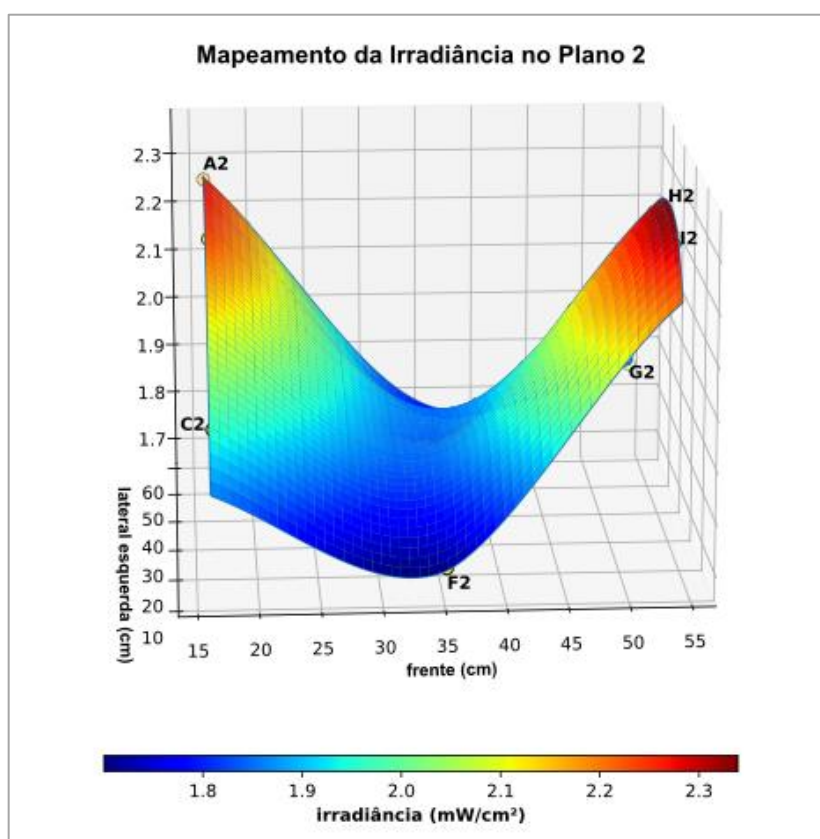


Fonte: A autora, 2022.

Na figura 43 está indicado o lugar onde esse ponto mínimo ocorre e mostra um gráfico com uma rotação azimutal de - 60 graus em relação ao gráfico da figura 42. Nele é possível visualizar que a superfície interpolada passa por todos os pontos de dispersão disponíveis e com destaque para o ponto de mínima irradiância.

Comparando os gráficos das figuras 43 e 44 é possível observar que o ponto de mínimo ocorre próximo ao ponto D1, próximo ao fundo do equipamento e também praticamente alinhado aos pontos F1 e E1 localizados na faixa central do equipamento e, portanto, a uma distância média entre as lâmpadas de UVC instaladas nas laterais internas da câmara. É nessa região central que os menores valores de irradiância foram medidos nos mapeamentos realizados nos três planos avaliados.

**Figura 44 – Dispersão dos pontos de irradiância no plano 2 e interpolação por *thin-plate spline*.**



Fonte: A autora, 2022.

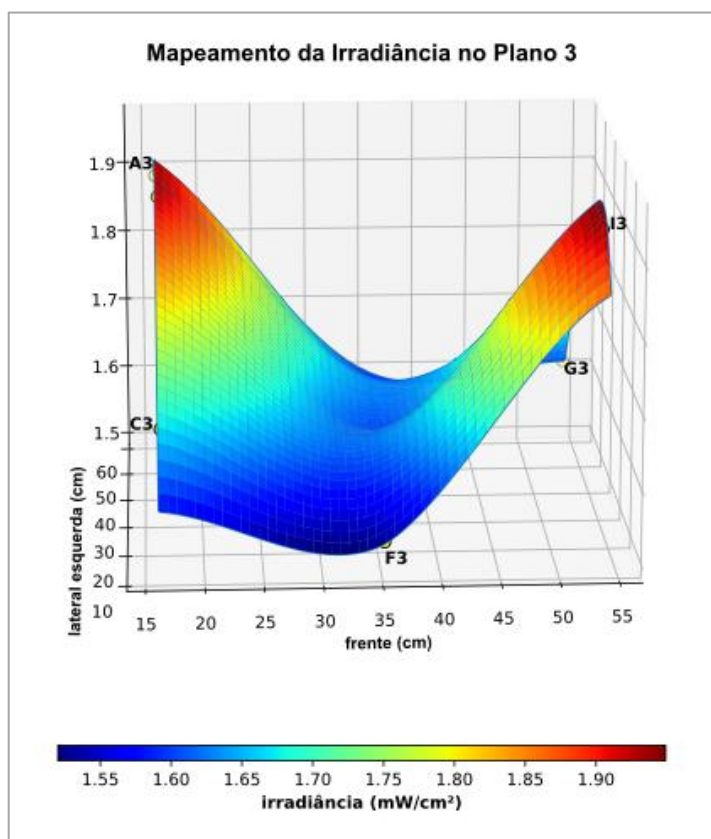
Os mapeamentos dos valores de irradiância no plano 2 e no plano 3 produzem gráficos com desenho semelhante àquele apresentado na figura 42, o que é um comportamento esperado, uma vez que se tratam de mapeamentos realizados nas



mesmas ordenadas e abscissas das medidas do plano 1, variando apenas a altura do sensor de RUV. A figura 44 mostra os dados de mapeamento da irradiância no plano 2 e a respectiva *thin-plate spline* interpolada.

É importante destacar que o sensor utilizado não é omnidirecional e, portanto, os mapeamentos dos planos 2 e 3 não são registros da efetiva irradiância que chega nesses pontos. Como a distância entre os pontos onde as medidas são realizadas é comparável ao tamanho das lâmpadas, a utilização de um sensor que possui uma região de captação da UVC com direção preferencial faz com que parte da irradiância da lâmpada deixe de ser medida. Entretanto, é esperado que o valor que é aferido nos planos 2 e 3 tenham um comportamento semelhante ao mapeamento realizado no plano 1. É, portanto, esperado que nos pontos mais próximos às lâmpadas a irradiância medida seja maior e que na região central do equipamento sejam registrados os menores valores. A figura 45 mostra os dados de mapeamento da irradiância no plano 3 e a respectiva *spline thin-plate* interpolada.

**Figura 45 – Dispersão dos pontos de irradiância no plano 3 e interpolação por *thin-plate spline*.**

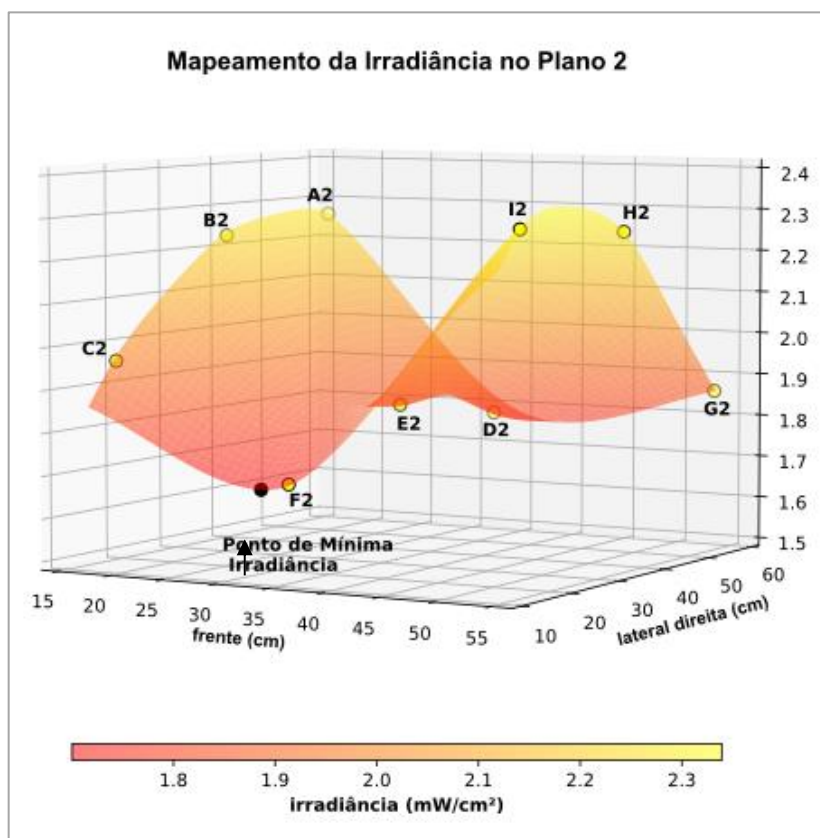


Fonte: A autora, 2022.

Portanto, as figuras 45 e 46, assim como no mapeamento da irradiância no plano 1, mostram as interpolações por *spline* do tipo *thin-plate* e repetem o comportamento do gráfico da figura 42. O formato em V do gráfico se mantém pelos 3 planos com os pontos A, B, H e I apresentando os maiores valores de irradiância; os valores de irradiância decrescem conforme esse fluxo de energia se afasta das fontes emissoras de UVC, e tem os menores valores aferidos na região onde se encontram os pontos D, E e F.

A avaliação dos pontos mínimos nos planos 2 e 3 não equivalem aos valores mínimos de irradiância efetivos nesses pontos devido a direção preferencial do sensor da RUVC, mas indicam, confirmando o resultado do mapeamento do plano 1, que os menores valores de irradiância ocorrem na região central do equipamento. No caso do plano 2, o valor mínimo ocorre nas proximidades no ponto F2, na parte central e frontal do equipamento com valor de 1,70 mW/cm<sup>2</sup> de irradiância.

**Figura 46 – Mapeamento da Irradiância com superfície interpolada e indicação de ponto de mínimo no plano 2.**

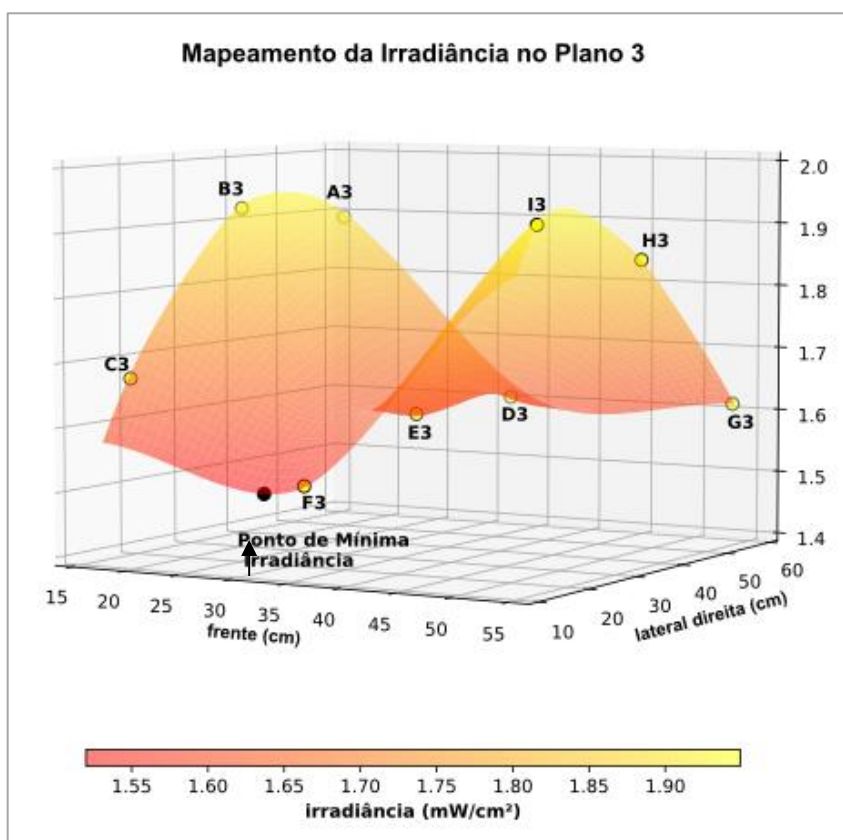


Fonte: A autora, 2022.

A figura 46 mostra a superfície interpolada passando por todos os pontos de dispersão e indica a posição onde o valor de mínima irradiância acontece nessa interpolação.

No caso do plano 3, o valor mínimo fornecido pela superfície interpolada também ocorre na região frontal e central do equipamento na proximidade do ponto F3 com valor de, aproximadamente, 1,51 mW/cm<sup>2</sup> de irradiância. A figura 47 mostra a superfície interpolada passando por todos os pontos de dispersão e indica a posição onde o valor de mínima irradiância acontece na interpolação dos dados do plano 3.

**Figura 47 – Mapeamento da irradiância com superfície interpolada e indicação de ponto de mínima no plano 3.**



Fonte: A autora, 2022.

Para fins de estimativa de dose para inativação de microrganismos de interesse serão considerados como efetivos somente as medidas de irradiância realizadas na base do equipamento, pois nessa posição o sensor do radiômetro MRUR-203 recebe RUVc de toda a extensão das lâmpadas utilizadas, assim como também recebe contribuição da reflexão de uma área maior revestida de papel alumínio. Ainda que

esse trabalho não tenha quantificado a contribuição da radiação refletida nas folhas de alumínio, é esperado, devido às referências na literatura, que essa contribuição não seja nula.

#### **4.2 Temperatura e umidade do Ar**

A temperatura e a umidade do ar foram monitoradas através do sensor DHT22 instalado dentro da CHC durante o seu funcionamento quando realizados os testes de estabilidade do sensor para as medidas de irradiância da RUVC e nos testes de repetibilidade nos intervalos de 01, 03, 05, 07 e 10 minutos de funcionamento da câmara. Foi observado que com a câmara em operação, o funcionamento das lâmpadas UVC promoveram o aumento gradativo da temperatura no interior do equipamento o que foi acompanhado de uma redução gradativa da umidade do ar – quanto maior o tempo que o equipamento permanecia em operação maior aumento da temperatura foi observado, assim como maior redução da umidade do ar.

O funcionamento das lâmpadas UVC gera calor. O aquecimento interno da câmara de desinfecção gera maior agitação das moléculas de água presentes no seu interior. O equipamento, por sua vez, não é vedado, então, há escape das moléculas de água por frestas e perfurações feitas na madeira para a passagem dos fios que conectam as lâmpadas e sensores instalados no seu interior. Assim, quanto mais a temperatura sobe, maior a agitação das moléculas de água suspensas no ar dentro do equipamento, ocorrendo maior escape dessas moléculas provocando a redução da umidade do ar.

A umidade do ar é um parâmetro que tem impacto direto na desinfecção dos microrganismos – algumas bactérias, por exemplo, possuem característica higroscópica e, portanto, tem a capacidade de absorver umidade do ar fazendo com que seu tamanho aumente. Por sua vez, o aumento de tamanho de um microrganismo pode funcionar como um mecanismo de fotoproteção fazendo com que a susceptibilidade à radiação UVC seja menor em alta umidade do ar. Consequentemente, há casos registrados na literatura que em ambientes com menor umidade do ar, a susceptibilidade à radiação UVC cresce, impactando diretamente nas doses necessárias para desinfecção. Esse é o caso da bactéria *Mycobacterium Bovis BCG* que em baixa umidade do ar (22-33%) apresentou uma  $D_{90}$  de 19 J/m<sup>2</sup>,

enquanto que em alta umidade do ar (85-91%) a  $D_{90}$  – dose necessária para desinfecção de pelo menos 90% da amostra inicial – foi de 33 J/m<sup>2</sup> (KO, 2000).

Lembrando que a susceptibilidade é uma característica espécie-dependente e, portanto, precisa ser medida experimentalmente caso a caso. Para o bacteriófago MS2, há na literatura o registro do comportamento inverso: em alta umidade do ar ocorre aumento da susceptibilidade desse vírus à UVC. No trabalho de Walker (2007) em alta umidade do ar a  $D_{90}$  foi de 26 J/m<sup>2</sup>, enquanto que em baixa umidade a dose de desinfecção foi de 61 J/m<sup>2</sup>.

Para o SARS-CoV-2 os estudos disponíveis, até o momento, avaliaram a desinfecção por UVC desse microrganismo em soluções aquosas do vírus. O impacto da umidade do ar, por sua vez, é observado quando testada a desinfecção por UVC em amostras aerolizadas. Portanto, ainda faltam informações experimentais que determinem o quanto a umidade do ar contribui para o aumento ou para a redução da susceptibilidade à radiação UVC do SARS-CoV-2 e mesmo se há impacto desse parâmetro no processo de desinfecção.

A CHC, por sua vez, foi planejada para ser um equipamento de desinfecção não apenas do SARS-CoV-2, mas de qualquer microrganismo de interesse em superfícies de objetos que caibam no seu interior, ou ainda de soluções aquosas contaminadas dispostas em placas de Petri, por exemplo. Não se trata de um equipamento para desinfecção de amostras aerossóis e, portanto, não é esperado, a priori, que haja impacto da variação da temperatura ou da umidade do ar na desinfecção de microrganismos na CHC. Entretanto, o acompanhamento das variações da temperatura e da umidade relativa do ar nessa câmara fornece dados experimentais iniciais correlacionando essas variáveis com o tempo de funcionamento do equipamento e fornecendo insumos para a análise de impacto dessas variações em outros protótipos que possam ser desenvolvidos como desdobramento deste projeto e que avaliem diretamente a desinfecção de amostras aerossóis.

A tabela 13 mostra os valores médios de variação de temperatura durante a avaliação da estabilidade do radiômetro nos testes de repetibilidade. As médias foram obtidas a partir de todas as medidas feitas para os 27 pontos mapeados. Como foram realizadas 3 baterias de medidas para cada intervalo de tempo por ponto, há 81 variações consideradas na obtenção das médias. A partir desses dados, é possível observar que para pequenos intervalos de tempo, ainda que número de medidas seja expressivo, o erro relativo é superior a 2%. Portanto, quando o equipamento fica ligado

por pouco tempo (entre 1 e 3 minutos) ocorre uma maior dispersão dos dados em torno do valor médio.

Tabela 13 – Variação de temperatura nos intervalos de operação da CHC e erros associados.

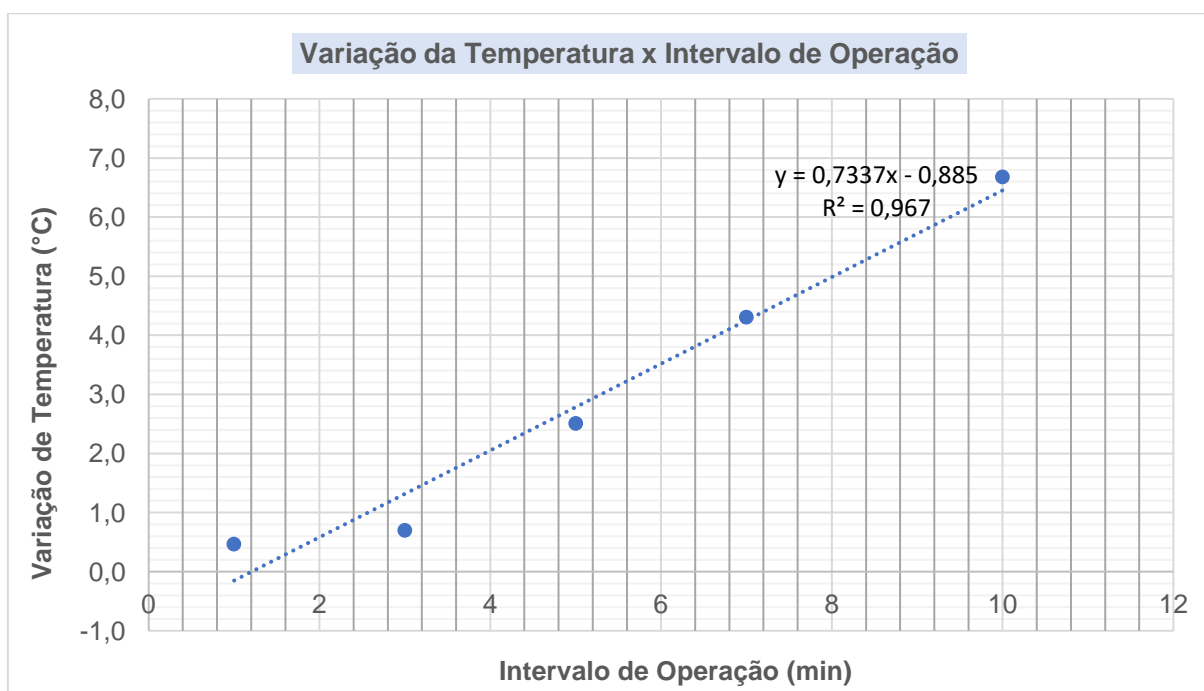
<b>Intervalo (min)</b>	<b>Média de <math>\Delta</math> Temp. (°C)</b>	<b>Desvio da Média (°C)</b>	<b>Erro Relativo (%)</b>
<b>01</b>	0,467	$\pm 0,0232$	4,98
<b>03</b>	0,696	$\pm 0,0236$	3,40
<b>05</b>	2,51	$\pm 0,0299$	1,19
<b>07</b>	4,31	$\pm 0,0317$	0,737
<b>10</b>	6,68	$\pm 0,0454$	0,680

Fonte: A autora, 2022.

Os testes e medidas de temperatura e umidade do ar considerados nesse trabalho foram realizados na CHC entre abril e junho de 2022. Ao longo desse período, as medidas foram realizadas em diferentes condições climáticas – dias de maior e menor temperatura na sala onde os testes com a CHC foram conduzidos. É importante destacar que a temperatura ambiente e a umidade relativa do ar no interior da sala de condução dos testes realizados com a CHC não foram controladas. Portanto, é possível que para os menores intervalos de tempo de operação da câmara, os efeitos de diferentes temperaturas ambiente tenham sido mais perceptíveis provocando maiores desvios e uma maior dispersão de valores. Para os intervalos maiores que 3 minutos, os erros relativos caem, o que sugere que distorções ou efeitos externos que possam interferir nessas medidas são minimizados.

A partir dos dados da tabela 13 obteve-se um gráfico com uma regressão linear com R-quadrado de 0,967 indicando que 96,7% dos dados podem ser explicados por uma tendência linear. O coeficiente linear de Pearson com valor de 0,983 indica uma correlação linear positiva forte, ou seja, quanto maior é a duração de operação da CHC maior é a variação de temperatura observada – o que caracteriza uma correlação linear e crescente. Assim, entre 1 e 10 minutos, é possível afirmar que nesse intervalo a relação entre o tempo de operação do equipamento e a variação de temperatura registrada é linear (figura 48).

**Figura 48 – Avaliação e interpolação de dados da variação da temperatura nos intervalos de operação da CHC.**



Fonte: A autora, 2022.

O caso da variação da umidade do ar é semelhante ao caso da variação de temperatura. Os dados da tabela 14 mostram as médias das variações de umidade, com respectivos desvios e erros relativos.

**Tabela 14 – Variação de umidade do ar, em módulo, nos intervalos de operação da CHC e erros associados.**

<b>Intervalo (min)</b>	<b>Módulo da Média de <math>\Delta</math> umidade do ar (%)</b>	<b>Desvio da Média (%)</b>	<b>Erro Relativo (%)</b>
<b>01</b>	0,416	$\pm 0,0524$	12,6
<b>03</b>	0,0519	$\pm 0,0578$	111
<b>05</b>	3,32	$\pm 0,102$	3,06
<b>07</b>	6,96	$\pm 0,193$	2,78
<b>10</b>	12,4	$\pm 0,346$	2,79

Fonte: A autora, 2022.

Os erros relativos no caso da avaliação dos dados de variação de umidade do ar são maiores que os erros relativos apurados quando da avaliação das variações de

temperatura. No caso da temperatura ambiente que possivelmente interfere nas medidas, esse efeito aparentemente é mais perceptível no caso da umidade do ar.

Os testes foram conduzidos no LIETA, localizado no bairro de São Cristóvão, na Cidade do Rio de Janeiro entre os dias 08/04/2022 e 06/07/2022. Nesse intervalo de tempo o Município do Rio de Janeiro registrou diferentes temperaturas e grandes variações na umidade relativa do ar. Segundo dados meteorológicos históricos para o período e disponíveis para consulta no site do Instituto Nacional de Meteorologia do Ministério da Agropecuária, Pecuária e Abastecimento, entre os dias 08/04/2022 e 06/07/2022 a menor temperatura registrada nesse período foi de 16,7 °C e a máxima de 35,8 °C. Para o mesmo período, o histórico mostra que a umidade relativa do ar variou entre 26% e 95%<sup>2</sup>. Assim, enquanto há uma variação de 19,1°C entre as máximas e mínimas temperaturas no período em que os testes da CHC foram conduzidos, a variação de umidade relativa do ar para o mesmo período foi bem mais significativa.

Da mesma forma que a temperatura ambiente não foi controlada na sala em que os testes na CHC foram realizados, a umidade relativa do ar também não o foi. Uma vez que o equipamento não é hermeticamente fechado, a influência dessas variáveis ambientais é relevante e, no caso da umidade relativa do ar, as diferenças expressivas registradas entre os dias mais secos e os mais úmidos explicaria a maior distorção dos dados produzindo maiores erros relativos, todos maiores que 2% (tabela 14).

Assim, a partir dos dados da tabela 14 obteve-se um gráfico com uma regressão linear com R-quadrado de 0,932 indicando que 93,2% dos dados podem ser explicados por uma tendência linear. O coeficiente linear de Pearson com valores de 0,965 indica alta correlação linear positiva, ou seja, quanto maior a duração de operação da CHC maior é a variação da umidade relativa do ar observada (em módulo) – o que caracteriza uma correlação linear e crescente (figura 49). No caso da umidade relativa do ar, os menores intervalos possuem alto erro relativo e são candidatos a serem desconsiderados da análise, pois são nesses pequenos intervalos de operação que aparentemente os impactos da umidade relativa do ar, externa à

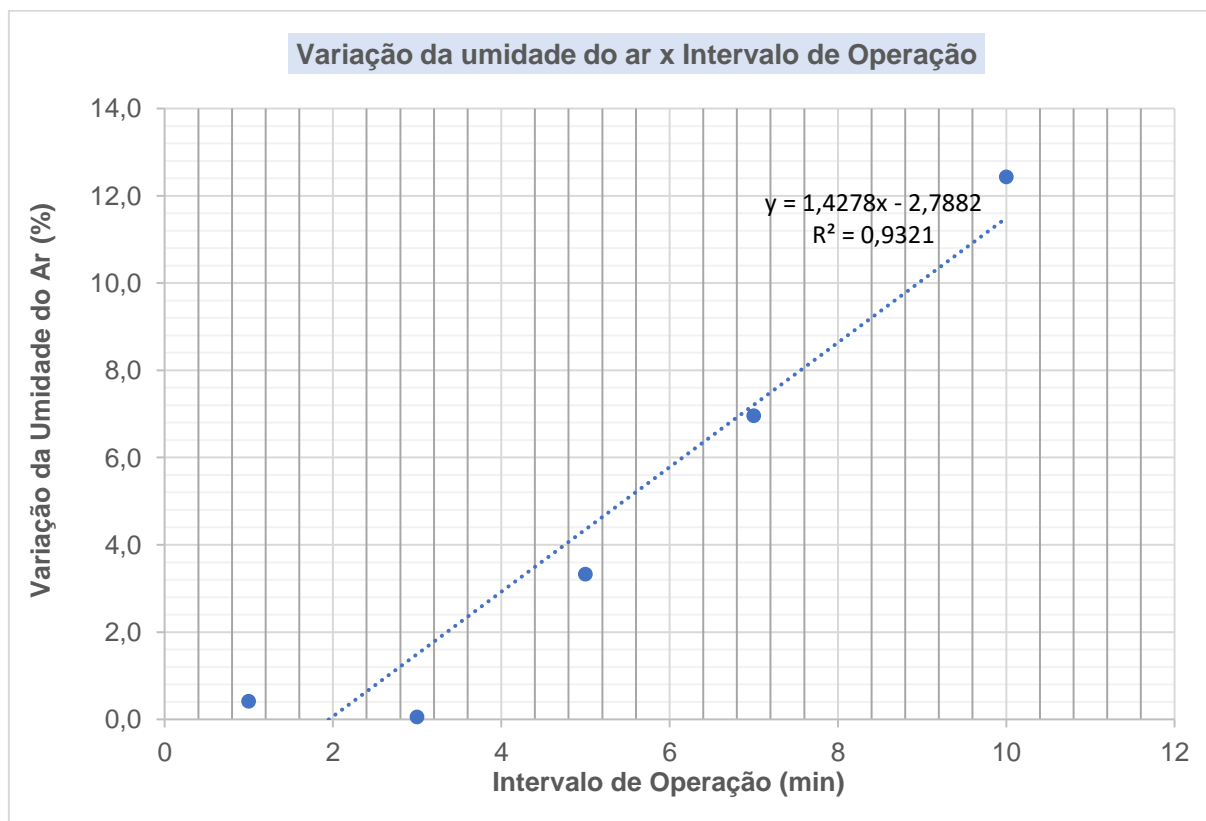
---

<sup>2</sup> Os dados de temperatura ambiente e umidade do relativa ar foram extraídos do banco de dados da estação meteorológica do Forte de Copacabana (INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA, 2022).



câmara, são maiores.

**Figura 49 – Avaliação e interpolação de dados da variação da umidade relativa do ar nos intervalos de operação da CHC.**



Fonte: A autora, 2022.

### 4.3 Inativação do SARS-CoV-2

A partir de resultados encontrados na literatura, é possível estimar o tempo de operação da CHC para a inativação de qualquer microrganismo de interesse para os quais a susceptibilidade à radiação UVC e, conseqüentemente, as doses de inativação já tenham sido avaliadas e aferidas em trabalhos anteriores. No caso específico da inativação do SARS-CoV-2 serão consideradas as doses indicadas na tabela 2 dos trabalhos de Ma, Ruetalo, Biasin, Bello-Perez e Gracheva – ainda que tratem de experimentos que atuaram na inativação do vírus por RUVVC em soluções aquosas, as doses então aferidas servem como referência para estimar o tempo de operação da CHC.

A irradiância que deve ser considerada é a mínima mapeada resultante dos testes realizados e já apresentados nesse estudo. Retomando o valor mínimo indicado

na figura 43, o valor de referência de irradiância será de 2,03 mW/cm<sup>2</sup>. É importante ressaltar que a estimativa de tempo de operação calculada em cima do valor mínimo de irradiância garante que toda a região irradiada dentro da câmara receberá, pelo menos, a dose mínima para inativação do SARS-CoV-2 conforme as condições de contorno específicas de cada um dos trabalhos de referência. A tabela 15 resume, portanto, em diferentes cenários, os tempos estimados de operação da CHC para a inativação do SARS-CoV-2.

Tabela 15 – Doses de referência de inativação do SARS-CoV-2, irradiância considerada e estimativa de tempo de operação da CHC.

<b>Autor</b>	<b>Dose (mJ/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Irradiância mínima (mW/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Tempo de inativação (s)</b>
<b>Ma et al</b>	1,30	2,03	0,640
<b>Ruetalo et al</b>	3,50	2,03	1,72
	1,75	2,03	0,860
<b>Biasin et al</b>	3,70	2,03	1,82
	16,9	2,03	8,33
	84,4	2,03	41,6
<b>Bello-Perez et al</b>	5,63	2,03	2,77
<b>Gracheva et al</b>	8,70	2,03	4,29
	34,8	2,03	17,1

Fonte: A autora, 2022.

Portanto, tendo como referência doses abaixo de 2,00 mJ/cm<sup>2</sup>, o funcionamento da CHC por um segundo é suficiente para a inativação do SARS-CoV-2. Para doses abaixo de 4,00 mJ/cm<sup>2</sup>, o funcionamento por menos de dois segundos também é suficiente para inativar o vírus. Somente para doses mais altas, que no caso do trabalho de Biasin correspondiam às amostras de SARS-CoV-2 com alta concentração viral, e no caso do trabalho de Gracheva a maior dose está associada a um maior log de redução, o tempo de operação da CHC para a efetiva inativação dessas amostras seria superior a 8 segundos. Ainda assim, no caso da dose de 84,4 mJ/cm<sup>2</sup>, que é suficiente para produzir 3 logs de redução de uma amostra viral com concentração de 1000 MOI, menos de 1 minuto de exposição à radiação UVC na CHC é suficiente para alcançar esse valor de dose.

É importante destacar que essas estimativas desconsideram efeitos de sombreamento da radiação que pode ser provocado quando múltiplos objetos são inseridos no interior do equipamento para fins de desinfecção. Por outro lado, os tempos para desinfecção estimados com câmara consideram doses informadas na literatura, enquanto que o melhor cenário nesse caso seria a realização de testes, com material biológico para a efetiva obtenção da susceptibilidade dos microrganismos testados e averiguação das doses suficientes para desinfecção dentro das condições de contorno e limitações da CHC.

## CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

A confecção de um projeto que tem por objetivo criar protótipos e equipamentos para um fim específico é desafiadora. É somente durante a execução de um projeto experimental de construção que, de fato, aprendemos como um equipamento funciona em todos os seus detalhes: cada peça, cada solução encontrada e ideias que não funcionaram e precisaram ser repensadas. A construção e a automação da CHC seguiram a dinâmica do faz e refaz algumas vezes, o que é inerente ao processo de criação e desenvolvimento de protótipos, fazendo com que projetos dessa natureza sejam ricos de detalhes, informações e aprendizado. De uma ponta a outra – da placa de madeira cortada, colada, pregada até a realização de medidas, mapeamento e análise de dados – o projeto se deu em fases por vezes extensas: confecção artesanal, soluções mecânicas, soluções de IoT e horas de programação, entendimento e interpretação dos dados e dos fenômenos físicos envolvidos.

A partir dos resultados e análises feitas é possível afirmar que o equipamento funciona com estabilidade, automatizado e com segurança de operação. A quantidade de medidas realizadas traz confiabilidade para os resultados experimentais apresentados e, a CHC está pronta para a realização de testes efetivos de desinfecção em qualquer objeto que possa comportar assim como em respiradores N95.

Como qualquer protótipo, a sua finalização, ainda que bem-sucedida, está repleta de sugestões de melhorias para trabalhos futuros. No caso da CHC, o número elevado de correias conectadas em série, a utilização de apenas um motor de passo pode ter contribuído para uma sobrecarga de tensionamento nas correias que frequentemente travam ou rompem. Uma forma de contornar esse problema seria a utilização de dois motores de passos acionados simultaneamente pelo microcontrolador – assim, a carga das correias ficaria dividida fazendo o sistema girar com menos resistência mecânica.

Para um melhor alinhamento dos eixos de rotação poderiam ser incluídas placas de alumínio entre a madeira e as polias com um furo mais justo para o encaixe do eixo, de modo a evitar que ocorra inclinação dessa peça quando o movimento das correias é deflagrado pelo motor.

Ainda que a quantidade de medidas e os resultados experimentais obtidos tragam confiabilidade para o equipamento, serão necessários novos testes que

proporcionarão uma melhor análise de funcionamento e um mapeamento mais robusto para a caracterização da CHC. Um possível teste para avaliar a reprodutibilidade dos resultados seria realizar o mapeamento da irradiância em um cenário (ou cenários) em que há controle da umidade do ar e da temperatura para avaliar se a variação desses parâmetros causa impacto na irradiância registrada pelo radiômetro.

Uma forma de trazer também consistência para a avaliação da estabilidade do sensor seria realizar as medidas de mapeamento com outro modelo de radiômetro e compará-las com os dados obtidos nesse trabalho para identificar se há um padrão de tempo para estabilidade entre diferentes radiômetros.

Para uma melhor avaliação da irradiância nas três alturas e registro efetivo do fluxo de radiação que chega nos pontos mapeados no interior do equipamento seria ideal a utilização de um sensor omnidirecional. Como a câmara é recoberta internamente com papel alumínio, há contribuição da reflexão da radiação nessas superfícies. Usar um sensor omnidirecional possibilitaria confirmar se a irradiância que alcança os três níveis é a mesma para um determinado ponto, ou se os valores são diferentes uma vez que há contribuição da reflexão da radiação.

Outra proposta seria investigar se o tempo de estabilização do sensor permanece com uma resposta linear em intervalos de interrupção da operação do equipamento superiores a 10 minutos, assim como confirmar se a variação de temperatura e umidade do ar apresentam tendência linear em relação ao tempo em intervalos de operação superiores a 10 minutos.

Como principal sugestão para trabalho futuro ficarão os testes de desinfecção em amostras biológicas com a realização de testes de desinfecção de superfície em placas de petri – ou em lâminas usadas em microscopia – de modo a identificar a susceptibilidade à RUVC e estabelecer direta e efetivamente o percentual de redução das populações dos microrganismos testados.

Como um dos objetivos da CHC é também a desinfecção de EPIs, fica, também, como sugestão de trabalho futuro a análise por microtomografia de raios X da estrutura de respiradores N95 expostos à RUVC.

## REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA (ANVISA). *Covid-19: tudo sobre máscaras faciais de proteção*. 2021. Disponível em: <https://bit.ly/3VJK59f>. Acesso em 07 mar. 2022.

ASADI, S. *et al.* Aerosol emission and superemission during human speech increase with voice loudness. *Scientific Reports*, [s. l.], v. 9, n. 2348, 20 fev. 2019.

ATKINS, P.; JONES, L.; LAVERMAN, L. *Princípios de química: questionando a vida moderna e o meio ambiente*. 3. ed. São Paulo: Ciência Moderna, 2007.

BABIUCH, M. *et al.* Using the ESP32 microcontroller for data processing. In: INTERNATIONAL CARPATHIAN CONTROL CONFERENCE – ICC, 20., 2019, Krakow-Wieliczka, Poland. [*Proceedings...*]. Krakow-Wieliczka, 2019, p. 88-93.

BEDFORD, T. H. B. The nature os the action of ultra-violet light on micro-organisms. *The British Journal of Experimental Pathology*, [s. l.], v. 8, n. 6, p. 437-441, dez. 1927.

BELLO-PEREZ, M. *et al.* Pulsed-xenon ultravioleta light highly inactivates human coronaviruses on solid surfaces, particularly SARS-CoV-2. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, [s. l.], v. 19, n. 21, p. 13780, 23 out. 2022.

BIASIN, M. *et al.* UV-C irradiation is highly effective in inactivating SARS-CoV-2. *Scientific Reports*, [s. l.], v. 11, n. 6260, 18 mar. 2021.

BOOKSTEIN, F. L. Principal Warps: Thin-Plate Splines and the Decomposition of Deformations. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, [s. l.], v. 11, n. 6, p. 567-585, 1989.

CAMPOS, M. R. Carga de doença da COVID-19 e de suas complicações agudas e crônicas: reflexões sobre a mensuração (DALY) e perspectivas no Sistema Único de Saúde. *Cadernos de Saúde Pública*, Rio de Janeiro, [s. l.], v. 36, n. 11, nov. 2020.

CARLESSO, F. *et al.* Conceitos básicos de radiômetros de substituição elétrica para medidas da Irradiância Solar Total. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, [s. l.], v. 41, n. 2, 2019.

CENTERS FOR DISEASE CONTROL AND PREVENTION (CDC). *Implementing Filtering Facepiece Respirator (FFR) Reuse, Including Reuse after Decontamination, When There Are Known Shortages of N95 Respirators*. 2020. Disponível em: <https://bit.ly/3Fk2Af1>. Acesso em 03 mar. 2022.

CENTERS FOR DISEASE CONTROL AND PREVENTION (CDC). *Interim Guidance on Infection Control Measures for 2009 H1N1 Influenza in Healthcare Settings, Including Protection of Healthcare Personnel*. 2010. Disponível em: <https://bit.ly/3iv2SH4>. Acesso em 03 mar. 2022.

CENTERS FOR DISEASE CONTROL AND PREVENTION (CDC). *Interim Infection Prevention and Control Recommendations for Healthcare Personnel During the Coronavirus Disease 2019 (COVID-19) Pandemic*. 2021. Disponível em: <https://bit.ly/3EWKM8t>. Acesso em 19 abr. 2021.

CHICK, H. An investigation of the laws of disinfection. *Epidemiology & Infection*, [s. l.], v. 8, n. 1, p. 92-158, 1908.

COULLIETTE, A. D *et al.* Persistence of the 2009 Pandemic Influenza A (H1N1) Virus on N95 Respirators. *Applied and Environmental Microbiology*, [s. l.], v. 79, n. 7, p. 2148-2155, abr 2013.

CUTLER, T. D.; ZIMMERMAN, J. J. Ultraviolet irradiation and the mechanisms underlying its inactivation of infectious agents. *Animal Health Research Reviews*, [s. l.], v. 12, n. 01, p. 15–23, 2011.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). *Ultraviolet disinfection guidance manual for the final long term 2 enhanced surface water treatment rule*. nov. 2006. Disponível em: <https://bit.ly/3VmA6Hc>. Acesso em 30 ago. 2022.

EUROPEAN CENTRE FOR DISEASE PREVENTION AND CONTROL (ECDC). *Questions and answers on COVID-19: Basic facts*. 25 jan. 2021. Disponível em: <https://bit.ly/3gRPJaz>. Acesso em 20 abr. 2021.

GATES, F. L. A study of the bactericidal action of ultra violet light. *Journal of General Physiology*, [s. l.], v. 13, n. 2, p. 231-248, 20 nov. 1929.

GOMES, A. J. P. *et al.* Implicit Surface Fitting. In: \_\_\_\_\_. *Implicit Curves and Surfaces: Mathematics, Data Structures and Algorithms*. London: Springer, 2009.

GRACHEVA, A. V. *et al.* Immunogenic properties of SARS-CoV-2 inactivated by ultraviolet light. *Archives of Virology*, [s. l.], v. 167, n. 11, p. 2181-2191, 20 jul. 2022.

GREENHALGH, Trisha *et al.* Ten scientific reasons in support of airborne transmission of SARS-CoV-2. *The Lancet*, 15 abr. 2021. Disponível em: <https://bit.ly/3uh38vR>. Acesso em 19 abr. 2021.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). *Dados Históricos Anuais*. Disponível em <https://bit.ly/3UksfZq>. Acesso em 15 set. 2022

INSTRUTHERM. *Manual de Instruções: Medidor de Luz Ultravioleta Digital Modelo MRUR-203*. Disponível em: <https://bit.ly/3H4hVSc>. Acesso em 15 out. 2021.

KÖRNER, R. W. *et al.* Of Mice and Men: The Coronavirus MHV and Mouse Models as a Translational Approach to Understand SARS-CoV-2. *Viruses*, [s. l.], v. 12, n. 8, p. 880, 12 ago. 2020.

KOWALSKI, W. *Ultraviolet Germicidal Irradiation Handbook: UVGI for Air and Surface Disinfection*. New York: Springer, 2009.

KOWALSKI, W. SARS Coronavirus UV Susceptibility. *Aerobiological Engineering Report*, p. 25-28, 2015.

LI, Y. Exposure to expired infectious aerosols in proximity and distance. *In: NATIONAL ACADEMIES OF SCIENCES, ENGINEERING AND MEDICINE'S WORKSHOP. Airborne Transmission of SARS-CoV-2: a virtual workshop from the environmental health matters initiative.* 26-27 ago. 2020 em formato virtual. Disponível em <https://bit.ly/3Vow0hK> (vídeo nº 20). Acesso em 08 abr. 2021.

MA, B. *et al.* UV Inactivation of SARS-CoV-2 across the UVC Spectrum: KrCl\* Excimer, Mercury-Vapor, and Light-Emitting-Diode (LED) Sources. *Applied and Environmental Microbiology*, [s. l.], v. 87, n. 22, 28 out 2021.

MARR, L. C. Aerosols and Transmission of Respiratory Viruses 101. *In: NATIONAL ACADEMIES OF SCIENCES, ENGINEERING AND MEDICINE'S WORKSHOP. Airborne Transmission of SARS-CoV-2: a virtual workshop from the environmental health matters initiative.* 26-27 ago. 2020 em formato virtual. Disponível em <https://bit.ly/3XTAleo> (vídeo nº 6). Acesso em 16 mar. 2021.

MILLER, S. L. *et al.* Transmission of SARS-CoV-2 by inhalation of respiratory aerosol in the Skagit Valley Chorale superspreading event. *Indoor Air*, [s. l.], v. 31, n. 2, p. 314-323, mar. 2021.

MORAWSKA, L. Droplet fate in indoor environments, or can we prevent the spread of infection? *Indoor Air*, [s. l.], v. 16, n. 5, p. 335–347, out. 2006.

MORAWSKA, L. *et al.* Size distribution and sites of origin of droplets expelled from the human respiratory tract during expiratory activities. *Journal of Aerosol Science*, [s. l.], v. 40, n. 3, p. 256–269, mar. 2009.

MORAWSKA, L. Size characteristics of particles generated by people. *In: NATIONAL ACADEMIES OF SCIENCES, ENGINEERING AND MEDICINE'S WORKSHOP. Airborne Transmission of SARS-CoV-2: a virtual workshop from the environmental health matters initiative.* 26-27 ago. 2020 em formato virtual. Disponível em <https://bit.ly/3ixTYIM> (vídeo nº 8). Acesso em 19 mar. 2021.

NASCIMENTO J. L. B. *et al.* Protótipo funcional de uma bengala eletrônica para a locomoção de pessoas com deficiência visual. *Journal of Innovation and Science: research and application*, [s. l.], v. 1, n. 1, p. 9, 1 dez. 2021.

NAVY AND MARINE CORPS PUBLIC HEALTH CENTER. *Industrial Hygiene Field Operations Manual Technical Manual NMCPHC-TM6290.91-2: Chapter 11 – Ultraviolet Radiation*, 2019. Disponível em <https://bit.ly/3uhklzZ>. Acesso em 25.04.2022.

NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY (NIST). *Persistent Lines of Neutral Mercury (Hg I)*. Disponível em <https://bit.ly/3gSdmQi>. Acesso em 20 ago. 2022.



OKI SENSOR DEVICE CORPORATION. *Reed Switch Databook*. [Tokyo]: set. 2010. Disponível em: <https://bit.ly/3VGrbAc>. Acesso em 20 ago. 2022.

OKUNO, E.; VILELA, M. A. C. *Radiação Ultravioleta: Características e Efeitos*. São Paulo: SBF, 2005.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE (OMS). *Managing Epidemics: Key facts about major deadly diseases*. [Luxemburgo]: 2018. Disponível em <https://bit.ly/3iq7Zlx>. Acesso em 20 ago. 2020.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE (OMS). *Q&A: Coronavirus disease (COVID-19): How is it transmitted?* [Genebra]: 2020a. Disponível em: <https://bit.ly/3VpXTGj>. Acesso em: 19 abr. 2021.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE (OMS). *WHO Director-General's opening remarks at the media briefing on COVID-19*. [Genebra]: 2020b. Disponível em: <https://bit.ly/3FiVd7Q>. Acesso em 19 abr. 2021.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE (OMS). *Roadmap to improve and ensure good indoor ventilation in the context of COVID-19*. [Genebra]: 2021. Disponível em: <https://bit.ly/3XPWeLP>. Acesso em 19 abr. 2021.

OSRAM; *UV-C PURITEC HNS Germicidal Lamps: Technical Information*. Disponível em: <https://bit.ly/3H56qdA>. Acesso em 17 jul. 2022.

PARK, S. Y. *et al.* Coronavirus Disease Outbreak in Call Center, South Korea. *Emerging Infectious Diseases*, [s. l.], v. 26, n. 8, p. 1666-1670, ago. 2020.

PENDYALA, B. *et al.* Genomic Modeling as an Approach to Identify Surrogates for Use in Experimental Validation of SARS-CoV-2 and HuNoV Inactivation by UV-C Treatment. *Frontiers in Microbiology*, [s. l.], v. 11, set. 2020.

PESSÔA, M. A. S. *et al.* A Física de um Desinfector com Radiação UV-C. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, [s. l.], v. 43, 30 jul 2021.

RAEISZADEH, M., ADELI B. A Critical Review on Ultraviolet Disinfection Systems against COVID-19 Outbreak: Applicability, Validation, and Safety Considerations. *ACS Photonics*, [s. l.], v. 7, n. 11, p. 2941-2951, 14 out. 2020.

RIVERS, T. M., GATES, F. L. Ultra-violet light and vaccine virus: II. The effect of monochromatic ultra-violet light upon vaccine virus. *The Journal of Experimental Medicine*, [s. l.], v. 47, n. 1, p. 45-49, jan. 1928.

RUETALO, N. *et al.* Rapid, dose-dependent and efficient inactivation of surface dried SARS-CoV-2 by 254 nm UV-C irradiation. *Euro Surveill*, [s. l.], v. 26, n. 42, 21 out. 2021.

RYER, A. *The Light Measurement Handbook*. Massachusetts: International Light Technologies, 1997. Disponível em: <https://bit.ly/3EVMB5E>. Acesso em 30 mai 2022.

SARKIS, J. Supply Chain Sustainability: Learning from the COVID-19 Pandemic. *International Journal of Operations & Production Management*. [s. l.], v. 41, n. 1, p 63-73, 04 dez. 2020.

SCHALK S. *et al.* UV-lamps for disinfection and advanced oxidation – Lamp types, technologies and applications. *IUVA News*, [s. l.], v. 8, n.1, p. 32–37, 2006.

TANG, J. W. *et al.* Dismantling myths on the airborne transmission of severe acute respiratory syndrome coronavirus-2 (SARS-CoV-2). *Journal of Hospital Infection*, [s. l.], v. 110, p. 89-96, 13 jan. 2021.

TANG, S. *et al.* Aerosol Transmission of SARS-CoV-2? Evidence, prevention and control. *Environment International*, [s. l.], v. 144, n. 106039, 07 ago. 2020.

TCHARKHTCHI, A. *et al.* An Overview of Filtration Efficiency Through the Masks: Mechanisms of the Aerosols Penetration. *Bioactive Materials*, [s. l.], v. 6, n. 1, p. 106-122, jan. 2021.

TURRO, N. J. The Triplet State. *Journal of Chemical Education*, [s. l.], v. 46, n. 01, p. 2-6, 1969.

XIE, M.; CHEN, Q. Insight into 2019 novel coronavirus — An updated interim review and lessons from SARS-CoV and MERS-CoV. *International Journal of Infectious Diseases*, [s. l.], v. 94, p. 119-124, mai. 2020.

WALKER, C. M.; KO, Gwangpyo. Effect of Ultraviolet Germicidal Irradiation on Viral Aerosols. *Environmental Science & Technology*, [s. l.], v. 41, n. 15, p. 5460–5465, 01 ago. 2007.

WEI, J.; LI, Y. Enhanced spread of expiratory droplets by turbulence in a cough jet. *Building and Environment*, [s. l.], v. 93, p. 86–96, 20 jun. 2015.

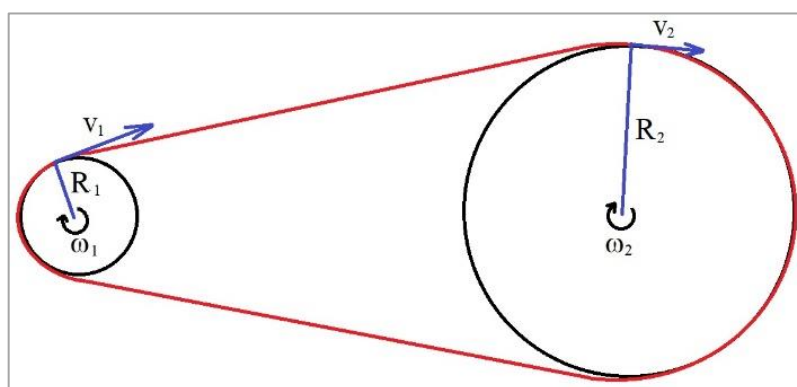
WELCH, D. *et al.* Far-UVC light: A new tool to control the spread of airborne-mediated microbial diseases. *Scientific Reports*, [s. l.], v. 8, n. 2752. 09 fev. 2018.

WILKINSON, E. *Technical Memorandum TIPP-147: Calibration of Ultraviolet Radiometers*. CSIRO Division of Telecommunications and Industrial Physics. Sydney, 2002. Disponível em: <https://bit.ly/3ivLy4S>. Acesso em 10 dez. 2021.

## APÊNDICE A – Transmissão de movimento entre polias.

Para destacar algumas características importantes sobre transmissão de movimento entre sistemas de polias conectadas por correias será abordada a seguir a análise de um sistema composto por duas polias de tamanhos diferentes conforme desenho da figura 50.

**Figura 50 – Sistema de duas polias conectadas por correia.**



Fonte: A autora, 2022.

Polias conectadas por correias giram no mesmo sentido e a velocidade linear é a mesma em qualquer ponto dessa correia desde que esta não deslize e não estique. Temos, portanto:

$$v_1 = v_2 \quad (21)$$

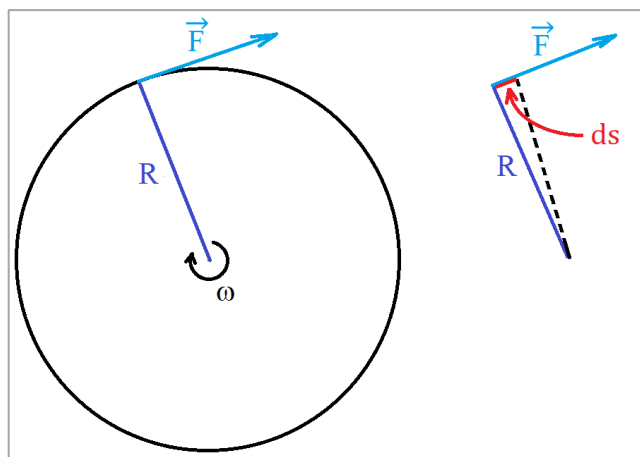
$$\omega_1 R_1 = \omega_2 R_2 \quad (22)$$

$$\omega_2 = \frac{R_1}{R_2} \omega_1 \quad (23)$$

Assim, quanto maior a razão entre os raios  $R_1$  e  $R_2$ , maior será a velocidade angular na polia 2.

Sobre torque: seja uma polia de raio  $R$  que transmite para uma correia uma força  $F$  e que gira com uma velocidade angular  $\omega$ . Supondo que a polia gire no sentido horário e que após um intervalo de tempo infinitamente pequeno  $dt$  o ponto  $A$  sofre um deslocamento  $ds$  sobre a polia (figura 51):

Figura 51 – Deslocamento  $ds$  de uma polia que gira no sentido horário.



Fonte: A autora, 2022.

O trabalho realizado pela força  $F$  ao longo do deslocamento  $ds$  será:

$$dw = F \cdot ds \quad (24)$$

E a potência será:

$$P = \frac{dw}{dt} \quad (25)$$

Substituindo (24) em (25) obtém-se:

$$P = F \cdot \frac{ds}{dt} \quad (26)$$

Logo:

$$P = F \cdot v \quad (27)$$

Usando o resultado (27) e aplicando no sistema de duas polias da figura 50 temos que, não ocorrendo perda de energia, a potência da polia 1 será integralmente transmitida para a polia 2, ou seja:

$$P_1 = P_2 \quad (28)$$

Portanto:

$$F_1 v_1 = F_2 v_2 \quad (29)$$

Mas, sabendo que o torque é:

$$\tau = F \cdot R \quad (30)$$

Temos que:

$$F = \frac{\tau}{R} \quad (31)$$

Aplicando o resultado de (31) em (29) obtém-se:

$$\frac{\tau_1}{R_1} v_1 = \frac{\tau_2}{R_2} v_2 \quad (32)$$

Mas, retomando de (21) a igualdade entre as velocidades e aplicando essa condição em (32) conclui-se que:

$$\frac{\tau_1}{R_1} = \frac{\tau_2}{R_2} \quad (33)$$

De onde é possível afirmar que:

$$\tau_2 = \frac{R_2}{R_1} \tau_1 \quad (34)$$

Portanto, dos resultados indicados em (23) e (34) é possível afirmar que se a intenção da transmissão do movimento for aumentar a velocidade na polia 2, a polia movida, basta diminuir o raio  $R_2$ . Por outro lado, se o objetivo for o aumento de torque, o raio  $R_2$  precisa ser aumentado.

**APÊNDICE B** – Código de programação do sistema de controle da CHC

```
//Programa desenvolvido por Hamilton S. Gama Filho, Roberta M. de P. S. Borges e
Diogo S. S. da Costa.
```

```
//Este programa tem por finalidade o controle de uma câmara de desinfecção por UVC.
```

```
//Ano:2022
```

```
#include "WiFi.h" //biblioteca para mexer com wifi e webserver no ESP32
```

```
#include "ESPAsyncWebServer.h" //biblioteca para mexer com wifi e webserver no
ESP32
```

```
#include "SPIFFS.h" //biblioteca para transferir arquivos para o ESP32
```

```
#include "FS.h" //biblioteca para gerenciar arquivos para o ESP32
```

```
#include "Adafruit_Sensor.h" //biblioteca para o sensor de temperatura e umidade
```

```
#include "DHT.h" //biblioteca para o sensor de temperatura e umidade
```

```
#define DHTTYPE DHT22 // DHT22 (AM2302)
```

```
#include "Wire.h" //biblioteca para o módulo RTC
```

```
#include "RTClib.h" //biblioteca para o módulo RTC
```

```
const char* ssid = "CHC";
```

```
const char* password = "CHC#2022";
```

```
//Criando objeto AsyncWebServer na porta 80 e objeto AsyncWebSocket
```

```
AsyncWebServer server(80);
```

```
AsyncWebSocket ws("/test");
```

```
// Pinos de controle
```

```
#define STP 5 //pino referente ao passo do motor
```

```
#define DIR 18 //pino referente a direção de rotação do motor
```

```
#define ENA 19 // pino referente a ativação e desativação do motor
```

```
#define rele 23 // pino de ativação e desativação do relé
```

```
#define pinDHT22 32 // pino referente ao sensor DHT22
```

```
#define buzzer 33 //pino referente ao buzzer
```

```
#define reedPin 34 // pino referente ao reed switch
```

```

//-----
//ATENÇÃO!!! Pinos 21(SDA) e 22(SCL) são reservados para comunicação do módulo
RTC!
//-----
RTC_DS3231 rtc;
DHT dht(pinDHT22, DHTTYPE);

// Variáveis de controle
float i = 0; //variável do contador
String t; //variável de leitura do Serial monitor
float tempo = 0; // variável referente ao tempo em que o motor ficará ligado
float intervalo = 15000; // variável referente ao tempo, em microsegundos, de ativação
das bobinas
bool evento;
String temperatura;
String umidade;
String tempo1;
String desliga;

//Declaração da função de data e hora do RTC
String dataEhora(){
    DateTime agora = rtc.now(); // Faz a leitura de dados de data e hora
    String Data = String(agora.day())+'/' +String(agora.month())+'/' +String(agora.year())+'
'+String(agora.hour())+':' +String(agora.minute())+':' +String(agora.second())+' ';
    return Data;
}

//Declaração da função para escrever no arquivo de dados
void writeFile(String Data, String temperatura, String umidade, String path) {
    File rFile = SPIFFS.open(path,"w+");
    if(!rFile){
        Serial.println("Erro ao abrir arquivo!");
    } else {
        Serial.println("Êxito ao abrir arquivo!");
    }
}

```

```

//Serial.print("Data, Temperatura e Umidade gravadas: ");
//Serial.println(Data+temperatura+"°C e "+umidade+"%");
rFile.println(Data+" "+temperatura+" "+umidade);
}
rFile.close();
Serial.println("Êxito ao fechar arquivo!");
}

//Declaração da função que pega o valor do tempo
void onWsEvent(AsyncWebSocket * server, AsyncWebsocketClient * client,
AwsEventType type, void * arg, uint8_t *data, size_t len){
if(type == WS_EVT_CONNECT){
Serial.println("Websocket client connection received");
} else if(type == WS_EVT_DISCONNECT){
Serial.println("Client disconnected");
Serial.println("-----");
} else if(type == WS_EVT_DATA){
tempo1 = "";
for (int i=0; i < len; i++) {
tempo1.concat((char) data[i]);
}
evento = true;
}
}

//Função para ativar o motor
void ativaMotor(){
digitalWrite(STP, LOW);
delayMicroseconds(intervalo);
digitalWrite(STP, HIGH);
delayMicroseconds(intervalo);
i = i + ((intervalo*2)/1000000); // incremento em segundos até chegar no tempo
pretendido.
}

```



```
//Função para ativar o buzzer
void ativaBuzzer(){
    digitalWrite(buzzer, HIGH);
    delay(500);
    digitalWrite(buzzer, LOW);
    delay(500);
}

//Função de leitura da temperatura do sensor DHT22
String readDHTTemperature() {
    float temp = dht.readTemperature();
    if (isnan(temp)) {
        //Serial.println("Failed to read from DHT sensor!");
        return "--";
    }
    else {
        //Serial.println(temp);
        return String(temp);
    }
}

//Função de leitura da umidade do sensor DHT22
String readDHTHumidity() {
    float h = dht.readHumidity();
    if (isnan(h)) {
        //Serial.println("Failed to read from DHT sensor!");
        return "--";
    }
    else {
        //Serial.println(h);
        return String(h);
    }
}

void setup() {
```

```
Serial.begin(115200);
pinMode(reedPin, INPUT);
pinMode(buzzer, OUTPUT);
pinMode(rele, OUTPUT);
pinMode(STP, OUTPUT);
pinMode(DIR, OUTPUT);
pinMode(ENA, OUTPUT);
digitalWrite(STP, LOW);
digitalWrite(DIR, HIGH); // Sentido horário de rotação
digitalWrite(ENA, LOW); // Enable ativado
digitalWrite(rele,HIGH); // Inicia com o relé desligado

//Inicializa o SPIFFS
SPIFFS.begin();
if(!SPIFFS.begin()){
  Serial.println("Um erro ocorreu na montagem do SPIFFS.");
}
//bool formatted = SPIFFS.format();
// Iniciando o módulo RTC
Wire.begin();
rtc.begin();
if (!rtc.begin()){
  Serial.println("RTC não inicializado!");
}
//rtc.adjust(DateTime(2022, 04, 04, 14, 55, 00));

// Iniciando o sensor DHT22
dht.begin();

// Conectando ao Wi-Fi
WiFi.mode(WIFI_AP);
WiFi.softAP(ssid, password);

// Mostra o IP local do ESP32
```

```

Serial.println(WiFi.softAPIP());
ws.onEvent(onWsEvent);
server.addHandler(&ws);

// Faz a ligação entre o HTML e o ESP32
server.on("/", HTTP_GET, [](AsyncWebServerRequest *request){
    request->send(SPIFFS, "/index.html", "text/html");
});

//Envia a leitura do sensor DHT22 (temperatura e umidade) para a página HTML
server.on("/temperatura", HTTP_GET, [](AsyncWebServerRequest *request){
    request->send_P(200, "text/plain", readDHTTemperature().c_str());
});
server.on("/umidade", HTTP_GET, [](AsyncWebServerRequest *request){
    request->send_P(200, "text/plain", readDHTHumidity().c_str());
});
server.on("/porta", HTTP_GET, [](AsyncWebServerRequest *request){
    request->send_P(200, "text/plain", (String(digitalRead(reedPin))).c_str());
});

//Inicia o servidor web
server.begin();
}
void loop() {
    //Serial.println(tempo1);
    if(evento == true){
        tempo = tempo1.toFloat();
        i = 0;
        evento = false;
    }

    //Lê o sensor reed switch para ver se a porta está aberta ou fechada
    int digitalVal = digitalRead(reedPin);
    if (digitalVal == 1){

```

```
//Porta aberta ativa buzzer
ativaBuzzer ();
}else{
//Porta fechada, mantenha buzzer deligado e ative o motor, as lâmpadas e a fita de
LED
digitalWrite(buzzer, LOW);
while (i < tempo){
//Serial.println(i);
//Verifica se a porta está fechada
int digitalVal = digitalRead(reedPin);
if (digitalVal == 1){
tempo = 0;
break;
}if (tempo1 == "desliga"){
break;
}else{
//Ativa as lâmpadas
digitalWrite(rele, LOW);
//Ativa o motor
ativaMotor();
//writeFile(dataEhora(), readDHTTemperature(), readDHTHumidity(), "/dados.txt");
}
}
//desliga as lâmpadas
digitalWrite(rele, HIGH);
}
}
```

## APÊNDICE C – Código de programação da interface de operação da CHC

```

<!DOCTYPE html>
<html>
<meta charset='utf-8'/>
<head>
<meta name="viewport" content="height=device-height, width=auto, initial-
scale=1.0">
<style>
html {font-family: Helvetica; background-color: gray; display: inline-block; margin: 0px
auto; text-align: center;}
.titulo {display: block; font-size: 2em; margin-top: 1rem; margin-bottom: -1rem; font-
weight: bold;}
.imagens {padding-left: 20px; padding-right: 20px; padding-bottom: 100px;}
.button {background-color: blue; border-radius: 8px; border: none; color: white;
padding: 12px 26px; text-decoration: none; font-size: 30px; margin: 2px; cursor:
pointer;}
.button2 {background-color: black; border-radius: 8px; border: none; color: white;
padding: 12px 20px; text-decoration: none; font-size: 20px; margin: 2px; cursor:
pointer;}
.button2:hover {background-color: darkslategray;}
</style>
</head>
<body onload= 'Function();'>
<div class="imagens">
</div>
<div class="titulo">Câmara Harriette Chick (CHC)</div>
<p>Câmara de desinfecção de superfície por UVC</p>
<br>
<form method="get">
    <p>Indique abaixo o tempo para desinfecção.</p>
    <p><label for="tempo1">Tempo: <input type='number' id="tempo1"
name='tempo1' value='0' min=0> segundos. </p></label>
</form>

```

```

<br>
<p><button class="button" id='btn' onclick="Function()"> LIGAR </button></p>
<script>
    function pegaTemperatura() {
        var xhttp = new XMLHttpRequest();
        xhttp.onreadystatechange = function() {
            if (this.readyState == 4 && this.status == 200) {
                document.getElementById("temperatura").innerHTML
                =
this.responseText;
            }
        };
        xhttp.open("GET", "/temperatura", true);
        xhttp.send();
    }
    function pegaUmidade() {
        var xhttp = new XMLHttpRequest();
        xhttp.onreadystatechange = function() {
            if (this.readyState == 4 && this.status == 200) {
                document.getElementById("umidade").innerHTML
                =
this.responseText;
            }
        };
        xhttp.open("GET", "/umidade", true);
        xhttp.send();
    }
    function verificaPorta() {
        var xhttp = new XMLHttpRequest();
        xhttp.onreadystatechange = function() {
            if (this.readyState == 4 && this.status == 200) {
                document.getElementById("porta").innerHTML
                =
this.responseText;
                var reedSwitch = document.getElementById("porta").value
                if (reedSwitch == 1){

```

```

        document.getElementById("porta").innerHTML =
'ABERTA';
        desabilita();
    }
    else{
        document.getElementById("porta").innerHTML =
'FECHADA';
    }
}
};
xhttp.open("GET", "/porta", true);
xhttp.send();
}
setInterval(pegaTemperatura, 1000);
setInterval(pegaUmidade, 1000);
setInterval(verificaPorta, 500);
</script>
<p><label for="temperatura"> Temperatura da câmara: <output type='text'
id='temperatura' name='temperatura'> %TEMPERATURA% </output> °C
</p></label>
<p><label for="umidade"> Umidade da câmara: <output type='text' id='umidade'
name='umidade'> %UMIDADE% </output> % </p></label>
<p><label for="tempo2"> Tempo decorrido: <output type='text' id='tempo2'
name='tempo2'> 0 </output> s </p></label>
<p><label for="porta"> Status da Porta: <output type='text' id='porta'
name='porta'></output></p></label>
<br>
<div>
    <div>
        <form action="faq.html">
            <button class="button2" id='faq'> FAQ </button>
        </form>
    </div>
</div>
</div>

```

```
<br>
```

```
<br>
```

```
<h6>Página de controle desenvolvida por Roberta M. de P. S. Borges, Hamilton S. Gama Filho e Diogo S.S. da Costa.</h6>
```

```
<script>
```

```
    var ws = null;
```

```
    ws = new WebSocket("ws://192.168.4.1/test");
```

```
    function Function(){
```

```
        var tempo1, tempo2;
```

```
        if (btn.style.backgroundColor == 'blue'){
```

```
            btn.style.backgroundColor = 'red';
```

```
            btn.textContent = 'DESLIGAR';
```

```
            document.getElementById("tempo1").disabled = true;
```

```
            document.getElementById("faq").disabled = true;
```

```
            tempo1
```

```
            =
```

```
Math.round(parseFloat(document.getElementById("tempo1").value))
```

```
            if(tempo1 < 0 || isNaN(tempo1)){
```

```
                alert("Atenção! O valor de tempo fornecido não é um
```

```
número inteiro e positivo. Por favor, entre com um valor aceitável.");
```

```
                desabilita();
```

```
            }else{
```

```
                enviaTempo();
```

```
                document.getElementById("tempo1").innerHTML
```

```
                =
```

```
tempo1;
```

```
                countDown();
```

```
            }
```

```
        }else{
```

```
            desabilita();
```

```
        }
```

```
    }
```

```
    function desabilita(){
```

```
        btn.style.backgroundColor = 'blue';
```

```
        btn.textContent = 'LIGAR';
```

```
        document.getElementById("tempo1").disabled = false;
```



```

        document.getElementById("faq").disabled = false;
        doc

document.getElementById("tempo2").innerHTML = '0';
        ws.send("desliga");
    }
    function countdown(){
        var timeleft = document.getElementById("tempo1").value -1;
        var downloadTimer = setInterval(function(){
            if(timeleft <= 0){
                clearInterval(downloadTimer);
            }
            if(btn.style.backgroundColor == "red"){
                document.getElementById("tempo2").innerHTML =
timeleft;

                timeleft -= 1;
                verificaPorta();
                if(timeleft == "-1"){
                    desabilita();
                    clearInterval(downloadTimer);
                }
            }else{
                desabilita();
                clearInterval(downloadTimer);
            }
        }, 1000);
    }
    function enviaTempo(){
        var tempo = document.getElementById("tempo1").value;
        ws.send(tempo);
    }
</script>
</body>
</html>

```

**APÊNDICE D** – Tabela com os valores de irradiância média com indicação dos desvios

Tabela 16 – Valores de irradiância média por intervalo analisado e por ponto de mapeamento com os respectivos desvios (valores com 3 números significativos).

		Média da irradiação ± desvio (mW/cm <sup>2</sup> )				
Níveis	Pontos	01 (min)	03 (min)	05 (min)	07 (min)	10 (min)
1	A	2,57 ± 0,00943	2,55 ± 0,0230	2,57 ± 0,00707	2,57 ± 0,00829	2,58 ± 0,00653
	B	2,54 ± 0,00	2,52 ± 0,0105	2,53 ± 0,00538	2,62 ± 0,0169	2,64 ± 0,0162
	C	2,26 ± 0,0233	2,24 ± 0,0204	2,23 ± 0,0116	2,31 ± 0,00619	2,24 ± 0,00388
	D	2,07 ± 0,0152	2,06 ± 0,00828	2,07 ± 0,00818	2,07 ± 0,00740	2,08 ± 0,00628
	E	2,13 ± 0,00272	2,11 ± 0,0103	2,14 ± 0,00558	2,13 ± 0,00676	2,13 ± 0,00547
	F	2,13 ± 0,00	2,13 ± 0,00656	2,15 ± 0,00400	2,15 ± 0,00401	2,14 ± 0,00406
	G	2,20 ± 0,00272	2,18 ± 0,0153	2,21 ± 0,00606	2,18 ± 0,00655	2,18 ± 0,00730
	H	2,68 ± 0,00471	2,66 ± 0,0101	2,69 ± 0,00629	2,69 ± 0,00666	2,69 ± 0,00656
	I	2,65 ± 0,00272	2,64 ± 0,00687	2,66 ± 0,00322	2,65 ± 0,00365	2,65 ± 0,00497
2	A	2,28 ± 0,0125	2,24 ± 0,0104	2,27 ± 0,00640	2,29 ± 0,00573	2,26 ± 0,00575
	B	2,24 ± 0,00	2,19 ± 0,0148	2,23 ± 0,00975	2,25 ± 0,00444	2,25 ± 0,00441
	C	2,00 ± 0,00272	2,00 ± 0,01063	2,01 ± 0,00546	1,99 ± 0,00943	1,95 ± 0,00879
	D	1,80 ± 0,00544	1,79 ± 0,00813	1,80 ± 0,00461	1,80 ± 0,00497	1,80 ± 0,00494

		Média da irradiação ± desvio (mW/cm <sup>2</sup> )				
Níveis	Pontos	01 (min)	03 (min)	05 (min)	07 (min)	10 (min)
2	E	1,86 ± 0,00272	1,83 ± 0,00861	1,85 ± 0,00478	1,85 ± 0,00402	1,85 ± 0,00468
	F	1,74 ± 0,00720	1,73 ± 0,0123	1,72 ± 0,00544	1,71 ± 0,00539	1,73 ± 0,00817
	G	1,91 ± 0,00720	1,89 ± 0,00936	1,91 ± 0,00750	1,87 ± 0,00497	1,89 ± 0,00830
	H	2,38 ± 0,0395	2,42 ± 0,00916	2,37 ± 0,0269	2,23 ± 0,00636	2,29 ± 0,0187
	I	2,34 ± 0,0268	2,34 ± 0,0204	2,32 ± 0,0134	2,28 ± 0,00326	2,30 ± 0,0117
3	A	1,87 ± 0,00272	1,86 ± 0,00889	1,88 ± 0,00370	1,90 ± 0,00668	1,94 ± 0,00433
	B	1,90 ± 0,0245	1,90 ± 0,0156	1,92 ± 0,0120	1,94 ± 0,00521	1,94 ± 0,00484
	C	1,70 ± 0,00720	1,68 ± 0,00699	1,70 ± 0,00443	1,69 ± 0,00416	1,68 ± 0,00397
	D	1,61 ± 0,00816	1,61 ± 0,00838	1,61 ± 0,00505	1,61 ± 0,00562	1,61 ± 0,00487
	E	1,62 ± 0,0119	1,61 ± 0,00761	1,62 ± 0,00710	1,62 ± 0,00407	1,62 ± 0,00448
	F	1,55 ± 0,00272	1,54 ± 0,00497	1,55 ± 0,00322	1,54 ± 0,00381	1,54 ± 0,00397
	G	1,61 ± 0,00272	1,60 ± 0,00720	1,61 ± 0,00534	1,62 ± 0,00436	1,61 ± 0,00404
	H	1,85 ± 0,00	1,83 ± 0,0131	1,84 ± 0,00636	1,86 ± 0,00755	1,87 ± 0,00665
	I	1,93 ± 0,00816	1,93 ± 0,0119	1,94 ± 0,00892	1,94 ± 0,00635	1,93 ± 0,00589

Fonte: A autora, 2022.

**APÊNDICE E** – Estimativa de Custo da CHC

Tabela 17 – Relação dos materiais utilizados na construção da CHC com os respectivos custos estimados.

<b>Material</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Valor Unitário</b>	<b>Valor Total</b>
Placa de MDF 10mm	1	R\$ 300,00	R\$ 300,00
Placa de alumínio	1	R\$ 20,00	R\$ 20,00
Papel alumínio	1	R\$ 10,00	R\$ 10,00
Tinta	1	R\$ 50,00	R\$ 50,00
Kit Lâmpadas + reator + soquete	4	R\$ 135,00	R\$ 540,00
Rolamentos (kit com 10)	1	R\$ 40,00	R\$ 40,00
Microtubos de aço inox (KIT COM 2)	1	R\$ 80,00	R\$ 80,00
Rolo de Correia GT2 (5m)	2	R\$ 75,00	R\$ 150,00
Polias GT2 duplas 20 dentes (kit com 4)	3	R\$ 55,00	R\$ 165,00
Polias GT2 simples 20 dentes	1	R\$ 12,00	R\$ 12,00
Polia GT2 40 dentes	1	R\$ 45,00	R\$ 45,00
Polia GT2 60 dentes	1	R\$ 55,00	R\$ 55,00
Microcontrolador ESP32	1	R\$ 85,00	R\$ 85,00
DHT22	1	R\$ 40,00	R\$ 40,00
Buzzer	1	R\$ 5,00	R\$ 5,00
Reed Switch	1	R\$ 3,00	R\$ 3,00
Íma de Neodímio	1	R\$ 3,00	R\$ 3,00
Módulo relé	1	R\$ 8,50	R\$ 8,50
Motor de passo	1	R\$ 160,00	R\$ 160,00
Driver de motor	1	R\$ 80,00	R\$ 80,00
Fita de LED	1	R\$ 15,00	R\$ 15,00
Módulo RTC	1	R\$ 30,00	R\$ 30,00
Fonte chaveada	1	R\$ 30,00	R\$ 30,00
Botão	1	R\$ 5,00	R\$ 5,00
Rolo de fio para eletrônica (50m)	1	R\$ 60,00	R\$ 60,00
Pregos e ganchos	1	R\$ 30,00	R\$ 30,00
Borboletas	1	R\$ 40,00	R\$ 40,00
Puxador para porta	1	R\$ 10,00	R\$ 10,00
Corrediça telescópica para porta deslizante	1	R\$ 35,00	R\$ 35,00
<b>TOTAL</b>			<b>R\$ 2.106,50</b>

Fonte: A autora, 2022.

## ANEXO A – Manual da lâmpada OSRAM

### Ficha técnica do produto

# OSRAM

#### HNS 15 W G13 OFR

PURITEC HNS UV-C | UV-C lamps for purification



#### Áreas de aplicação

- Purificação eficiente do ar, água e superfícies

#### Benefícios do produto

- Purificação eficaz e amiga ao ambiente sem químicos
- Baixo conteúdo de mercúrio
- Longa duração graças ao revestimento específico
- Sem ozono

#### Características do produto

- Comprimento de onda dominante: 254 nm (Versão OFR)

#### Dados técnicos

### Informação de Produto

<b>Referência do pedido</b>	HNS 15W G13
-----------------------------	-------------

### Dados Elétricos

<b>Tensão da lâmpada</b>	90 V
<b>Corrente nominal</b>	0,3 A
<b>Corrente da lâmpada</b>	0,3 A
<b>Potência nominal</b>	14,70 W

### Dados fotométricos

<b>Intensidade luminosa</b>	7800 cd
<b>Comprimento de onda UVC entre 200...280 nm</b>	4.0 W

### Dimensões e peso



<b>Diâmetro</b>	26,0 mm
<b>Comprimento</b>	436,0 mm

### Espectativa de Vida

<b>Vida mediana</b>	8000 h
---------------------	--------

### Informação adicional do produto

<b>Soquete (base)</b>	G13
-----------------------	-----

#### Atributos

<b>Posição de funcionamento</b>	Qualquer
---------------------------------	----------

#### Categoria específica para o país

<b>Referência do pedido</b>	HNS 15W G13
-----------------------------	-------------

#### Environmental information

##### Information according Art. 33 of EU Regulation (EC) 1907/2006 (REACH)

<b>Date of Declaration</b>	19-01-2022
<b>Primary Article Identifier</b>	4008321054227
<b>Declaration No. in SCIP database</b>	In work

#### Instruções de segurança

As lâmpadas germicidas PURITEC emitem radiação UV de alta intensidade que pode causar queimaduras solares e conjuntivite. A pele e os olhos não devem, portanto, ser expostos à radiação direta ou refletida não filtrada.

#### Dados de Logística

<b>Código do produto</b>	<b>Descrição do produto</b>	<b>Embalagem unitária (peças/unidade)</b>	<b>Dimensões (comprimento x largura x altura)</b>	<b>Volume</b>	<b>Peso bruto</b>
4008321054227	HNS 15 W G13 OFR		453 mm x 29 mm x 32 mm	0.42 dm <sup>3</sup>	78.00 g
4008321054234	HNS 15 W G13 OFR		480 mm x 217 mm x 383 mm	39.89 dm <sup>3</sup>	8217.67 g
4008321054241	HNS 15 W G13 OFR		700 mm x 350 mm x 500 mm	122.50 dm <sup>3</sup>	19350.00 g

O código do produto mencionado indica a quantidade mínima a ser adquirida. Uma caixa unitária pode conter um ou mais produtos. Quando for colocar o pedido de compras, indique uma quantidade unitária ou múltiplos da caixa unitária.

### Retratação

Sujeito a alteração sem prévio aviso. Sempre utilize a versão mais recente.