



Universidade Federal da Paraíba

Centro de Tecnologia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica



Camilo Gustavo Araújo Alves

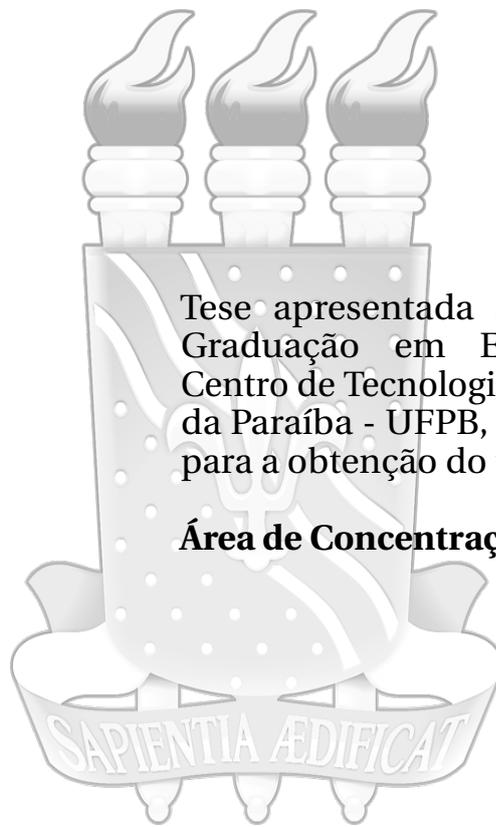
**Modelagem Computacional de Arranjos de
Desinfecção para Melhoria de Qualidade de Ar
Interno em Ambientes Hospitalares**

João Pessoa

2024

Camilo Gustavo Araújo Alves

Modelagem Computacional de Arranjos de Desinfecção para Melhoria de Qualidade de Ar Interno em Ambientes Hospitalares



Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba - UFPB, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor.

Área de Concentração: Termofluidos.

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Charles Peixoto de Oliveira

João Pessoa

2024

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

A474m Alves, Camilo Gustavo Araújo.

Modelagem computacional de arranjos de desinfecção para melhoria de qualidade de ar interno em ambientes hospitalares / Camilo Gustavo Araújo Alves. - João Pessoa, 2024.

129 f. : il.

Orientação: Gustavo Charles Peixoto de Oliveira.
Tese (Doutorado) - UFPB/CT.

1. Engenharia mecânica - Conforto térmico. 2. Dinâmica dos fluidos computacional. 3. Irradiação germicida ultravioleta. 4. Desinfecção - Ambientes hospitalares. 5. Controle de engenharia hospitalar. I. Oliveira, Gustavo Charles Peixoto de. II. Título.

UFPB/BC

CDU 621(043)

Camilo Gustavo Araújo Alves

Modelagem Computacional de Arranjos de Desinfecção para Melhoria de Qualidade de Ar Interno em Ambientes Hospitalares

Tese apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor, ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, da Universidade Federal da Paraíba.

Área de concentração: Termofluidos.

Aprovado em: 06/12/2024

Banca Examinadora:



Prof. Dr. Gustavo Charles Peixoto de Oliveira (Orientador)
Universidade Federal da Paraíba

Documento assinado digitalmente

gov.br

JOAO ALVES DE LIMA

Data: 18/12/2024 16:35:53-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. João Alves de Lima
Universidade Federal da Paraíba

Documento assinado digitalmente

gov.br

ABEL CAVALCANTE LIMA FILHO

Data: 19/12/2024 09:36:49-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Abel Cavalcante Lima Filho
Universidade Federal da Paraíba

Documento assinado digitalmente

gov.br

JULIANA MAGNA DA SILVA COSTA MORAIS

Data: 17/12/2024 15:49:57-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Juliana Magna da Silva Costa Morais
Universidade Federal da Paraíba



Prof. Ph.D. Gustavo Rabello dos Anjos
Universidade Federal do Rio de Janeiro



Prof. Ph.D. Enio Pedone Bandarra Filho
Prince Mohammad Bin Fahd University

João Pessoa-PB

2024

DEDICATÓRIA

"Pois dEle, por Ele e para Ele são todas as coisas. A Ele seja a gloria para Sempre! Amém"

(Rm 11:36).

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, por me guiar e fortalecer durante cada desafio enfrentado ao longo deste caminho. A presença do Espírito Santo em mim, me deu coragem, força e sabedoria para tomar as melhores decisões e manter-me firme diante dos desafios da jornada!

À minha amada esposa, Jossana Alves, e à minha linda filha Marina Alves, vocês foram minha âncora em meio às tempestades e minha razão para seguir em frente. Obrigado por seu amor incondicional, por terem toda a paciência do mundo compreendendo minhas ausências em prol deste objetivo.

Aos meus pais, Sônia e João Gregório, agradeço por serem meus primeiros e mais importantes exemplos de dedicação e perseverança. Seu apoio inabalável e suas palavras de encorajamento foram o combustível que alimentou minha determinação ao longo dos anos. Joias preciosas na minha vida, meus exemplos!

Aos meus familiares e amigos, vocês estiveram ao meu lado, seja nos momentos de comemoração ou nos dias de desânimo, sempre prontos para oferecer um sorriso, um abraço ou uma palavra de estímulo. Sua presença foi fundamental para manter minha motivação ao longo desta jornada.

Gostaria de expressar minha profunda gratidão à Dois A Engenharia e Tecnologia, representada pelo CEO Sérgio Azevedo e pelo meu gestor de área Wisley Moura, bem como a todos os integrantes dessa grande família, pelo inestimável suporte, investimento e apoio que foram fundamentais para a conclusão desta etapa da minha jornada acadêmica."

E ao meu excepcional professor orientador, Gustavo Oliveira, sua sabedoria, paciência e comprometimento foram fundamentais para o meu desenvolvimento acadêmico. Sua orientação firme e seu apoio constante foram fundamentais, guiando-me através das complexidades da pesquisa e do estudo.

RESUMO

ALVES, Camilo Gustavo Araújo *Modelagem Computacional de Arranjos de Desinfecção para Melhoria de Qualidade de Ar Interno em Ambientes Hospitalares*. NS f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba (UFPB), João Pessoa, 2024.

A crescente necessidade de ambientes hospitalares seguros e confortáveis, especialmente em setores críticos como pneumologia, destaca a relevância de tecnologias que melhorem a qualidade do ar e reduzam o risco de infecções. Ambientes climatizados, embora promovam conforto térmico, podem favorecer a propagação de partículas contaminantes, exigindo soluções que integrem segurança microbiológica e eficiência térmica. Nesse contexto, a aplicação de sistemas de Irradiação Germicida Ultravioleta (UVGI) surge como uma alternativa promissora. A falta de estudos detalhados sobre como diferentes configurações de sistemas UVGI impactam tanto a desinfecção quanto as propriedades térmicas e hidrodinâmica dos ambientes hospitalares é um limitante nas escolhas técnicas do uso desta tecnologia. Além disso, há carência de validação experimental e normativas que guiem o uso eficaz desses sistemas em espaços críticos. Esta tese teve como objetivo geral analisar a influência dos arranjos UVGI móvel, fixo perimetral, fixo transversal para circulação higiênica e conforto térmico no setor de pneumologia do Hospital Universitário Lauro Wanderley, através de dinâmica dos fluidos computacional utilizando o software Ansys/Fluent. Foram avaliadas a distribuição de temperatura, velocidade do ar e eficiência de desinfecção através de modelos multifásicos. Os resultados obtidos demonstraram que os sistemas móveis destacaram-se pela flexibilidade, contribuindo para a eliminação de zonas de calor residual e promovendo maior equilíbrio na circulação do ar, além disso, esta configuração alterou $0,403^{\circ}\text{C}$ em temperatura média na sua área de influência, o que não compromete nenhuma exigência das normas brasileiras para conforto térmico. Na análise de desinfecção os arranjos transversais apresentaram maior potencial na análise de modelo multifásico apresentando taxa de 1,07% de desinfecção a 10 segundos de simulação, equiparando-se ao valor de referência teórica (1,56%), com relação de 68,58%. Contudo, observou-se que a eficiência dos sistemas depende de variáveis como tempo de exposição e posicionamento relativo ao fluxo de ar, sugerindo a necessidade de estudos mais detalhados para validação real dos resultados. Esta tese oferece um entendimento técnico e prático sobre a implementação de sistemas UVGI em ambientes hospitalares, contribuindo para a segurança microbiológica e o conforto térmico. Os achados

podem embasar o desenvolvimento de normativas específicas e orientar a aplicação dessa tecnologia em outros contextos coletivos, como escolas e transportes públicos, ampliando seu impacto positivo na saúde pública.

Palavras-chave: Dinâmica dos Fluidos Computacional; Irradiação Germicida Ultravioleta; Conforto Térmico; Desinfecção; Controle de Engenharia Hospitalar.

ABSTRACT

ALVES, Camilo Gustavo Araújo *Computational Modeling of Disinfection Arrangements for Indoor Air Quality Improvement in Hospital Environments*. NS f. Thesis (Doctorate in Mechanical Engineering) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba (UFPB), João Pessoa, 2024.

The growing need for safe and comfortable hospital environments, especially in critical sectors such as pneumology, highlights the relevance of technologies that improve air quality and reduce infection risks. While air-conditioned spaces provide thermal comfort, they can facilitate the spread of contaminants, requiring solutions that integrate microbiological safety and thermal efficiency. In this context, the application of Ultraviolet Germicidal Irradiation (UVGI) systems emerges as a promising alternative. However, the lack of detailed studies on how different UVGI system configurations impact both disinfection and the thermal and hydrodynamic properties of hospital environments poses a limitation to the technical choices for adopting this technology. Moreover, there is a scarcity of experimental validation and regulatory guidelines to ensure the effective use of these systems in critical spaces. This study aimed to analyze the influence of mobile, fixed perimeter, and fixed transversal UVGI arrangements for hygienic air circulation and thermal comfort in the pneumology sector of Lauro Wanderley University Hospital using computational fluid dynamics through the Ansys/Fluent software. Temperature distribution, airflow velocity, and disinfection efficiency were evaluated using multiphase models. The results showed that mobile systems stood out for their flexibility, contributing to the elimination of residual heat zones and promoting a more balanced air circulation. Additionally, this configuration altered the average temperature by only 0.403°C in its area of influence, which complies with Brazilian standards for thermal comfort. In disinfection analysis, transversal configurations demonstrated the highest potential in the multiphase model, achieving a 1.07% disinfection rate after 10 seconds of simulation, which corresponds to 68.58% of the theoretical reference value (1.56%). However, the system's efficiency depends on variables such as exposure time and relative positioning to the airflow, suggesting the need for more detailed studies for real-world validation. This study provides a technical and practical understanding of UVGI system implementation in hospital environments, contributing to microbiological safety and thermal comfort. The findings may support the development of specific guidelines and inform the application of this technology in other collective contexts, such as schools and public transportation, enhancing its positive

impact on public health.

Keywords: Computational Fluid Dynamics; Ultraviolet Germicidal Irradiation; Thermal Comfort; Disinfection; Hospital Engineering Control.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Números de Serviços por Categoria da Empresa Brasileira de Serviços Hospitalares (EBSERH).	23
Figura 2	Localização aproximada do Hospital Universitário Lauro Wanderley na Universidade Federal da Paraíba (HULW/UFPB) vista ampliada fora da escala. Fonte: preparado pelos autores.	23
Figura 3	<i>Sistema de condicionamento de ar do tipo Self-Contained.</i> (CARRIER, 2024) .	28
Figura 4	<i>Chiller Centrífugo Dual Compressor.</i> (DAIKIN, 2024).....	29
Figura 5	<i>Processo de Resfriamento Chiller a Água.</i> (EMBRAR, 2024)	30
Figura 6	<i>Esquema de Distribuição de Ar do Sistema Self-Contained.</i> (ABRAVA, 2024) ...	30
Figura 7	<i>Processos Psicrométricos.</i> (STOECKER; JONES, 1985)	33
Figura 8	<i>Carta Bioclimática de Givoni.</i> (GIVONI, 1992)	35
Figura 9	Mecanismos de exposição de gotículas da SARS-CoV-2 (cor verde-escuro). Cor verde claro: conhecido mecanismo de transmissão aérea da SARS-CoV-1 e de outras gripes. Provas específicas para a SARS-CoV-2 são incipientes. (SANTOS et al., 2020)	46
Figura 10	Ambiente Protetor, sem Antecâmara e sem Recirculação. (ABNT, 2022)	51
Figura 11	Ambiente Protetor, sem Antecâmara e com Recirculação. (ABNT, 2022)	52
Figura 12	Função de Resposta Germicida Padrão em Relação ao Comprimento de Onda (DOSE, 2019).	53
Figura 13	Ranking de Suscetibilidade por Grupo de Microrganismo a Inativação por UV-C .(DOSE, 2019).....	55
Figura 14	Aplicação Potencial do UV-C para Controle de Microorganismos no Ar. (DOSE, 2019).....	57
Figura 15	Dispositivo Robô Biolux 360 Plus - Tecnologia UVGI.	57
Figura 16	Diretrizes aplicadas às lâmpadas UV-C, filtragem de controle de pressão, ações de quartos de descanso e controle da umidade para reduzir a doença coronavírus (COVID-19) em ambientes de UTI e hospitalares, de acordo com a ASHRAE (SANTOS et al., 2020)	60

Figura 17	Nuvem de gás turbulenta multifásica produzida por um espirro humano (BOUROUIBA, 2020).....	66
Figura 18	Ilustração da sedimentação de partículas e fluxo turbulento com uma velocidade de 0,02 m/s (VUORINEN et al., 2020)	66
Figura 19	Perfis de velocidade com velocidade de entrada de 0,75 m/s (ALVES et al., 2021)	67
Figura 20	Mapa de esboços de diferentes modos de ventilação (REN; ZHU; CAO, 2022)	68
Figura 21	Modelo geométrico de máscara de proteção e dos seus principais componentes (LÓPEZ-REBOLLAR et al., 2021)	69
Figura 22	Ferramentas de validação do método (MALISKA, 2017)	71
Figura 23	Esquema de Etapas da Metodologia da Análise Computacional. Fonte: Elaboração Própria	86
Figura 24	Planta da sala de cuidados clínicos em estudo localizada no Hospital Universitário Lauro Wanderley da Universidade Federal da Paraíba (HULW/UFPB). Fonte: Elaboração Própria.	89
Figura 25	Modelo tridimensional da sala de cuidados clínicos em estudo localizada no Hospital Universitário Lauro Wanderley da Universidade Federal da Paraíba (HULW/UFPB). Fonte: Elaboração Própria.....	90
Figura 26	Modelo tridimensional sem escala da sala de cuidados clínicos em estudo com a utilização dos equipamentos móveis de desinfecção. Fonte: Elaboração Própria.	92
Figura 27	Modelos de Instalação de lâmpadas UV-C para estudo de potência de desinfecção. Fonte: Elaboração Própria.	93
Figura 28	Modelo tridimensional sem escala da sala de cuidados clínicos em estudo discretizada em volumes finitos tetraédricos. Fonte: Elaboração Própria.	94
Figura 29	Métrica da malha de estudo Element Quality. Fonte: Elaboração Própria	94
Figura 30	Métrica da malha de estudo Orthogonal Quality. Fonte: Elaboração Própria..	95
Figura 31	Erro Quadrático normatizado para cada malha de elemento analisada. Fonte: Elaboração Própria.....	96
Figura 32	Linhas e Pontos de Amostragem para Análise Térmica. Fonte: Elaboração Própria.	98

Figura 33	Linhas e Pontos de Amostragem para Análise de Desinfecção. Fonte: Elaboração Própria.....	99
Figura 34	Plano horizontal de temperatura. Fonte: Elaboração Própria.....	100
Figura 35	Plano horizontal de velocidade. Fonte: Elaboração Própria	101
Figura 36	Plano vertical de temperatura. Fonte: Elaboração Própria	102
Figura 37	Plano vertical de velocidade. Fonte: Elaboração Própria	103
Figura 38	Gráfico de dispersão - Sala 1. Fonte: Elaboração Própria	104
Figura 39	Gráfico de dispersão - Sala 2. Fonte: Elaboração Própria	104
Figura 40	Gráfico de dispersão - Sala 3. Fonte: Elaboração Própria	104
Figura 41	Gráfico de radar da distribuição de temperatura nas salas com e sem equipamento. Fonte: Elaboração Própria	106
Figura 42	Fração de Sobrevivência e Taxa de Desinfecção em Função do Tempo de Exposição. Fonte: Elaboração Própria	108
Figura 43	Localização dos Planos que Contêm as Amostras para Análise Numérica. Fonte: Elaboração Própria	109
Figura 44	Fração Volumétrica de Água no Plano Horizontal Antes da Zona de Influência da Lâmpada UV-C Transversal. Fonte: Elaboração Própria.	110
Figura 45	Fração Volumétrica de Água no Plano Horizontal Após a Zona de Influência da Lâmpada UV-C Transversal. Fonte: Elaboração Própria.	110
Figura 46	Boxplot da Fração Volumétrica em Cada Linha de Análise. Fonte: Elaboração Própria.	111
Figura 47	Boxplot da Temperatura em Cada Linha de Análise. Fonte: Elaboração Própria.	112
Figura 48	Fração Volumétrica e Temperatura em Corte Vertical na Zona de Influência das Lâmpadas UV-C Transversal. Fonte: Elaboração Própria.....	113
Figura 49	Gráfico da Temperatura em Função da Fração Volumétrica de Água com Curvas de Ajuste. Fonte: Elaboração Própria.	114
Figura 50	Fração Volumétrica de Água no Plano Horizontal Após a Zona de Influência da Lâmpada UV-C Perimetral. Fonte: Elaboração Própria.	115
Figura 51	Fração Volumétrica e Temperatura em Corte Vertical na Zona de Influência das Lâmpadas UV-C Perimetral. Fonte: Elaboração Própria.....	115
Figura 52	Evolução da Fração Volumétrica de Água ao Longo do Tempo de Simulação. Fonte: Elaboração Própria.	117

Figura 53	Curva de Valores Médios de Desinfecção em Relação ao Tempo de Simulação.	118
Figura 54	Carta Psicrométrica. Fonte: Valcon	129

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Condições de Conforto Térmico segundo a Norma ABNT NBR 16401-2 (2008).	38
Tabela 2	Vazão Eficaz Mínima de ar Exterior para Ventilação NBR 16401-3 (2008).....	39
Tabela 3	Eficiência da Distribuição de Ar nas zonas de ventilação.	40
Tabela 4	Padrões Referenciais Resolução ANVISA N° 09/2003.	41
Tabela 5	Parâmetros de Projeto da ABNT NBR 7256(2022).	50
Tabela 6	Comprimento de onda dos tipos de raios UV (PHOSEON, 2021).	53
Tabela 7	Condições de contorno impostas nos modelos de simulação numérica.....	91
Tabela 8	Análise de Vazão Eficaz.	91
Tabela 9	Diferença na temperatura média da sala, com e sem o equipamento, foi calculada considerando os pontos cardeais extraídos ao longo do eixo Z, excluindo aqueles localizados a partir de 2,5 metros.	105
Tabela 10	Erro Acumulado do Polinômio de Ajuste.	112
Tabela 11	Comparação Resultado Teórico e Numérico Multifásico.	116

NOMENCLATURA

Siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANVISA	Agência Nacional de Vigilância Sanitária
ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers</i> (Sociedade Americana de Engenheiros de Aquecimento, Refrigeração e Ar Condicionado)
EAS	Estabelecimentos Assistenciais de Saúde
EBSERH	Empresa Brasileira de Serviços Hospitalares
DFC	Dinâmica dos Fluidos Computacional
FVM	Método dos Volumes Finitos (<i>Finite Volume Method</i>)
HULW	Hospital Universitário Lauro Wanderley
HVAC	Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado (<i>Heating, Ventilation, and Air Conditioning</i>)
ISO	Organização Internacional de Padronização (<i>International Organization for Standardization</i>)
LES	Simulação de Grandes Escalas (<i>Large Eddy Simulation</i>)
NBR	Norma Brasileira Registrada
OMS	Organização Mundial da Saúde
OPAS	Organização Pan-Americana da Saúde
RANS	Média das Equações de Reynolds (<i>Reynolds-Averaged Navier-Stokes</i>)
RTD	Tempo de Residência (<i>Residence Time Distribution</i>)
SARS-CoV-2	<i>Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus 2</i> (Coronavírus da Síndrome Respiratória Aguda Grave 2)
TKE	Energia Cinética Turbulenta (<i>Turbulent Kinetic Energy</i>)
UV-C	Radiação Ultravioleta de Curta Onda
UVGI	Irradiação Germicida Ultravioleta (<i>Ultraviolet Germicidal Irradiation</i>)

Letras Latinas

C_d	Coeficiente de arrasto (<i>Drag Coefficient</i>)
C_p	Calor específico a pressão constante
C_v	Calor específico a volume constante
d	Diâmetro
E	Energia interna específica
f	Fator de atrito
g	Aceleração gravitacional
h	Coeficiente de transferência de calor
I	Intensidade de radiação UV
k	Energia cinética turbulenta
L	Comprimento característico
Nu	Número de Nusselt ($Nu = \frac{hL}{k}$)
P	Pressão
Pr	Número de Prandtl ($Pr = \frac{C_p \mu}{k}$)
Q	Fluxo de calor
Ra	Número de Rayleigh ($Ra = \frac{g\beta\Delta TL^3}{\nu\alpha}$)
Re	Número de Reynolds ($Re = \frac{\rho uL}{\mu}$)
S	Fonte de geração de calor
T	Temperatura
u, v, w	Componentes de velocidade nas direções x, y, z

Letras Gregas

α	Fase dispersa na mistura multifásica
β	Fase contínua na mistura multifásica
Δ	Diferença ou variação
ϵ	Taxa de dissipação de energia cinética turbulenta
γ	Razão dos calores específicos ($\gamma = \frac{C_p}{C_v}$)
κ	Condutividade térmica
λ	Comprimento de onda

μ	Viscosidade dinâmica
ν	Viscosidade cinemática
ρ	Densidade
σ	Tensão superficial
τ	Tensão de cisalhamento
Φ	Potencial de fluido
ψ	Função de corrente
θ	Ângulo de incidência

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	Objetivos	24
1.1.1	Objetivo Geral	24
1.1.2	Objetivos Específicos	25
2	REVISÃO DE LITERATURA	27
2.1	Sistemas de Climatização com Equipamentos Condicionadores de Ar	27
2.1.1	Tecnologias para Sistemas de Climatização	27
2.1.2	Sistemas de Distribuição de Ar Condicionado por Dutos	30
2.1.3	Psicrometria e Conforto Térmico	31
2.1.4	Qualidade do Ar Interior: Aspectos Químicos, Biológicos e a Importância da Manutenção dos Equipamentos	35
2.1.5	Normatização Brasileira para Condicionamento de Ar em Ambientes Clima- tizados	37
2.2	Circulação de Ar em Ambientes Hospitalares	41
2.2.1	Setorização em Ambientes Hospitalares Públicos no Brasil	42
2.2.2	Infecções Hospitalares e Riscos Concomitantes	44
2.2.3	Características das Partículas de Aerossol SARS-CoV-2	46
2.2.4	Normatização Brasileira para a Segurança de Estabelecimentos de Assistência a Saúde	49
2.3	Mitigação Viral com Sistema de Irradiação Germicida Ultravioleta	53
2.3.1	Tecnologias UVGI para Controle do Ar	56
2.3.2	Estudos Sobre Utilização de Equipamentos UVGI em Sistemas HVAC	57
2.3.3	Sistematização da revisão bibliográfica sobre UVGI/HVAC	58
2.4	Fundamentos da Mecânica dos Fluidos	60
2.4.1	Formulações das Leis Básicas da Mecânica dos Fluidos	60
2.4.2	Princípios da Mecânica dos Fluidos Computacional	63
2.4.3	Dinâmica dos Fluidos Computacional na Engenharia Hospitalar	64
2.4.4	Erros e Validações de Soluções Numéricas	69
2.4.5	Métodos Numéricos	71
2.4.6	Processo para Resolução de Simulações de Dinâmica dos Fluidos Computacional	73

2.4.6.1	Modelo de Escoamento Multifásico	76
2.4.6.2	Modelo de Turbulência <i>k-epsilon</i>	82
2.4.6.3	Métricas de Qualidade da Malha.....	83
3	METODOLOGIA	86
3.1	Delimitação do Escopo da Pesquisa	87
3.2	Coleta dos dados Necessários	89
3.3	Pré-Processamento e Processamento do Modelo	92
3.4	Pós-Processamento e Relatório Manuscrito.....	97
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	100
4.1	Análise de Influência Hidrodinâmica e Térmica na Sala	100
4.1.1	Plano Horizontal de Temperatura	100
4.1.2	Plano Horizontal de Velocidade	101
4.1.3	Plano Vertical de Temperatura	102
4.1.4	Plano Vertical de Velocidade.....	103
4.1.5	Análise de Distribuição Vertical	104
4.1.5.1	Análise de Distribuição de Pontos Cardeais	105
4.2	Análise de Potencial de Desinfecção Através de Escoamento Multifásico	107
4.2.1	Análise de Sobrevivência e Potencial Desinfecção Teóricos em Função do Tempo	107
4.2.2	Análise de Sobrevivência e Potencial Desinfecção Numérico em Função da Temperatura	109
4.2.2.1	Análise de Sobrevivência e Potencial Desinfecção Numérico: Modelo Transversal	109
4.2.2.2	Análise de Sobrevivência e Potencial Desinfecção Numérico: Modelo Perimetral	113
4.2.2.3	Relação Entre Modelos Numérico e Teórico.....	116
	CONCLUSÃO	121
	BIBLIOGRAFIA	121

1 INTRODUÇÃO

Na sociedade moderna, os habitantes de áreas urbanas passam mais de 80% do seu tempo em ambientes fechados, tais como residências, escritórios, veículos ou centros comerciais (ZHANG, 2004). Sistemas de condicionamento de ar desempenham um papel crucial para trazer conforto a esses locais. Com o avanço tecnológico, esses sistemas têm oferecido soluções econômicas e customizáveis para o atendimento das necessidades térmicas particulares de cada ambiente.

Entretanto, os ambientes fechados também podem expor seus frequentadores a fluidos respiratórios carregados de agentes patogênicos, tornando-os propícios a elevado risco de infecções respiratórias. Nestas circunstâncias, as vias respiratórias dos indivíduos tornam-se vulneráveis à inalação de gotículas suspensas e partículas de aerossóis responsáveis pela transmissão viral (CDC, 2021; ASHRAE, 2021).

A pandemia da COVID-19 exacerbou pelo estudo de estratégias mitigadoras de risco de infecção viral em espaços climatizados (CHAKRABORTY; MAITY, 2020). No decurso da execução desta pesquisa, dados do surto global da COVID-19 mostravam que 774 milhões de pessoas tiveram diagnóstico confirmado, das quais 7 milhões foram levadas a óbito¹. Este cenário, hoje definido como "pós-pandemia", reforçou a importância de se investigar e implementar práticas que contribuam para a mitigação da disseminação de doenças infecciosas, especialmente em ambientes fechados onde as pessoas passam a maior parte do tempo.

Os ambientes hospitalares, em particular, demandam atenção especial devido a suas atividades essenciais para a prestação de cuidados de saúde e, ao mesmo tempo, por ser um indutor potencial de disseminação de patógenos. São várias as preocupações relativas ao controle de engenharia e à mitigação viral nesses ambientes. Entre elas, destacam-se o transporte de pacientes altamente infectados, o deslocamento das equipes médicas e a configuração do sistema de climatização. A conjunção desses fatores implica ou na disseminação ou na contenção de agentes patogênicos dentro desses ambientes, a exemplo da família dos coronavírus e, por extensão, em espaços comunitários, em geral (ALREBI et al., 2022; DING; YU; CAO, 2020).

Diante das questões expostas, observa-se que a operacionalização de salas de pneumologia assume local de destaque, devido à natureza das atividades realizadas, especialmente

¹Fonte: Painel de Controle do Coronavírus da OMS. Disponível em <<https://covid19.who.int>>. Acesso em 19 de Março de 2024.

considerando a frequência com que nelas ocorrem os procedimentos de profilaxia e tratamento de doenças infecciosas transmitidas pelo ar. Além do SARS-CoV-2 e de toda a família dos coronavírus, outros agentes patogênicos, como o *myxovirus influenzae* (influenza) e o *streptococcus pneumoniae* (pneumonia), são comumente disseminados nesses locais.

Esses agentes patogênicos são conhecidos por causar síndromes respiratórias agudas, algumas das quais podem resultar em complicações graves e até mesmo levar os pacientes à morte (LIU et al., 2020; MACHADO, 2009; SCHWARTZMANN et al., 2010). O potencial de transmissão dessas doenças está intrinsecamente ligado a diversos fatores, como a temperatura ambiente, a velocidade do ar, a taxa de renovação do ar e o nível de umidade. A circulação do ar, influenciada pelos sistemas de condicionamento, pode variar consideravelmente com base na alteração desses parâmetros.

Por meio do uso de ferramentas computacionais avançadas, como a dinâmica dos fluidos computacional (DFC), cientistas realizaram simulações numéricas para compreender como partículas de aerossol carregadas de agentes patogênicos propagam-se considerando esses fatores (SATHEESAN; MUI; WONG, 2020; BOUROUIBA, 2020; LÖHNER et al., 2020). Essas análises detalhadas destacaram a necessidade premente de revisão dos protocolos de segurança em ambientes hospitalares, visando mitigar o risco de transmissão dessas doenças respiratórias através do controle das variáveis associadas à climatização.

A eficácia dos protocolos de mitigação da propagação desses patógenos é vital não apenas para a segurança dos pacientes nas instalações hospitalares, como também para a proteção da equipe médica que por elas transita e para a prevenção da transmissão dessas doenças à comunidade externa. Assim, estratégias específicas de controle de infecções devem ser implementadas e rigorosamente mantidas para garantir a salubridade de recintos fechados, especialmente aqueles dedicados ao tratamento de doenças (ALREBI et al., 2022; DING; YU; CAO, 2020).

Cabe observar que o controle da qualidade do ar em ambientes hospitalares está sujeito a normas e padrões. A *Society of Heating, Ventilation, Refrigeration, and Air-Conditioning Engineers* (ASHRAE), por exemplo, propõe várias soluções tecnológicas, incluindo unidades de purificação do ar, sistemas de Irradiação Germicida Ultravioleta (UVGI) e sistemas de filtração (ZHANG et al., 2020; ASHRAE, 2021). Essas soluções podem ser implementadas de forma individual ou combinada, dependendo da viabilidade local e das necessidades específicas de cada ambiente hospitalar.

Das três soluções apresentadas, a ASHRAE enfatiza os sistemas UVGI como uma tecnologia de destaque devido a sua adaptabilidade aos sistemas de climatização já instalados e elevada eficiência teórica na descontaminação do ambiente. De acordo com estudos recentes, os sistemas de Irradiação Germicida Ultravioleta têm se mostrado eficazes na contenção da disseminação de patógenos em ambientes hospitalares. Pesquisas demonstraram que a exposição a doses adequadas de luz ultravioleta pode inativar uma variedade de vírus respiratórios, incluindo o coronavírus da síndrome respiratória aguda grave (SARS-CoV) e o vírus influenza. Assim, a implementação de sistemas UVGI pode representar uma estratégia promissora para reduzir a transmissão de doenças infecciosas entre pacientes, funcionários e visitantes (KOWALSKI; BAHNFLETH, 2010).

Nesta mesma vertente pode-se destacar a análise conjunta dos estudos de (ZHANG et al., 2019), (LIN; ZHONG; FANG, 2021), (BOUROUIBA; DEHANDSCHOEWERCKER; BUSH, 2020) e (SATHEESAN; KIAKHOobi, 2020), que revelam uma compreensão abrangente dos efeitos dos sistemas de inativação ultravioleta em ambientes climatizados. (ZHANG et al., 2019) investigaram o impacto dos sistemas UVGI no ambiente térmico de edifícios comerciais, destacando a necessidade de considerar não apenas os benefícios de desinfecção, mas também as possíveis alterações no desempenho térmico dos sistemas de climatização. Por sua vez, (LIN; ZHONG; FANG, 2021) abordaram a relação entre a tecnologia UVGI e a eficiência energética dos sistemas HVAC, evidenciando seu potencial para otimizar o consumo de energia em ambientes climatizados. Complementarmente, o estudo de (BOUROUIBA; DEHANDSCHOEWERCKER; BUSH, 2020) explorou os aspectos físicos dos eventos expiratórios violentos, fornecendo *insights* valiosos para entender a dispersão de partículas e a eficácia dos sistemas UVGI na mitigação da transmissão de doenças infecciosas pelo ar. Finalmente, (SATHEESAN; KIAKHOobi, 2020) realizaram simulações computacionais detalhadas para avaliar sistemas UVGI em aplicações HVAC, contribuindo para o desenvolvimento de estratégias eficazes de desinfecção e controle de infecções em ambientes climatizados.

Embora haja uma quantidade significativa de literatura disponível sobre a utilização de sistemas UVGI, incluindo análises de sua influência em sistemas climatizados através do uso de Dinâmica dos Fluidos Computacional (DFC), ainda há uma lacuna considerável no conhecimento sobre o arranjo ideal para implementar esses sistemas em diferentes configurações, considerando os efeitos específicos de cada configuração nas características térmicas do ambiente. A compreensão completa desses aspectos é essencial para otimizar a eficácia e a

eficiência dos sistemas UVGI na mitigação do risco de transmissão de doenças infecciosas em ambientes hospitalares. Esta limitação científica representa uma oportunidade para fornecer valiosa contribuição na área de engenharia e saúde pública, levando em conta a revisão de padrões e normas.

No Brasil, a Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) é a entidade governamental responsável pelo despacho de protocolos de saúde. No viés técnico, ações equivalentes são executadas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) como entidade consultiva e padronizadora. Atualmente, no Brasil, não existem normas relacionadas ao uso de sistemas UVGI, apenas recomendações relacionadas à qualidade do ar e requisitos das propriedades do ar interior para manter o ambiente saudável.

Destacam-se as normas ABNT NBR 16401-1:2008 - Sistemas de ar condicionado - Parte 1: Projetos de instalações de sistemas de ar condicionado, que aborda questões relacionadas ao projeto de sistemas de condicionamento de ar em edifícios, e a ABNT NBR 16401-3:2008 - Sistemas de ar condicionado - Parte 3: Qualidade do ar interior em estabelecimentos assistenciais de saúde, que trata especificamente da qualidade do ar interior em estabelecimentos de saúde, incluindo hospitais. A norma mais usada em termos de projetos de edificações de saúde é a NBR 7256 de 2022, que foi revisada, inclusive, por ocasião da pandemia de COVID-19. Todas essas normas colaboram para recintos seguros, e atendem aos requisitos mínimos estabelecidos pela resolução ANVISA Nº 9/2003.

Esta tese abordará a aplicabilidade de sistemas UVGI em diferentes arranjos, no propósito de avaliar como eles podem interferir nas características hidrodinâmicas e térmicas do ambiente hospitalar, especificamente de salas de atendimento pneumológico, fazendo um paralelo com as normas mais atuais que regem condições operacionais desses ambientes. A pesquisa considerou um modelo computacional que reproduz compartimentos do setor de pneumologia localizado no Hospital Universitário Lauro Wanderley (HULW), cidade de João Pessoa, Brasil (Figura 2), de referência no estado da Paraíba em várias frentes das ciências da saúde e responsável pelo tratamento e recuperação de milhares de pacientes infectados pela COVID-19. Em janeiro de 2023, o Portal Coronavírus do Brasil listava o estado da Paraíba como o 3º dos 9 estados pertencentes à região Nordeste em severidade, com 262 mortes por 100.000 habitantes ². O HULW também faz parte de uma grande e complexa rede de mais de 30 unidades de saúde (hospitais e maternidades) ligadas a universidades federais e que

²Fonte: Painel do Coronavírus do Ministério da Saúde (<<https://covid.saude.gov.br>>). Dados recolhidos em 27 de Janeiro de 2023.

são geridas pela Empresa Brasileira de Serviços Hospitalares (EBSERH). Em valores médios, a rede geriu aproximadamente 300.000 hospitalizações, 6 milhões de consultas médicas, e 18 milhões de exames médicos, que corresponde a 18%, 23% e 26% quando comparado os anos de 2022 e 2023 (Figura 1)³.

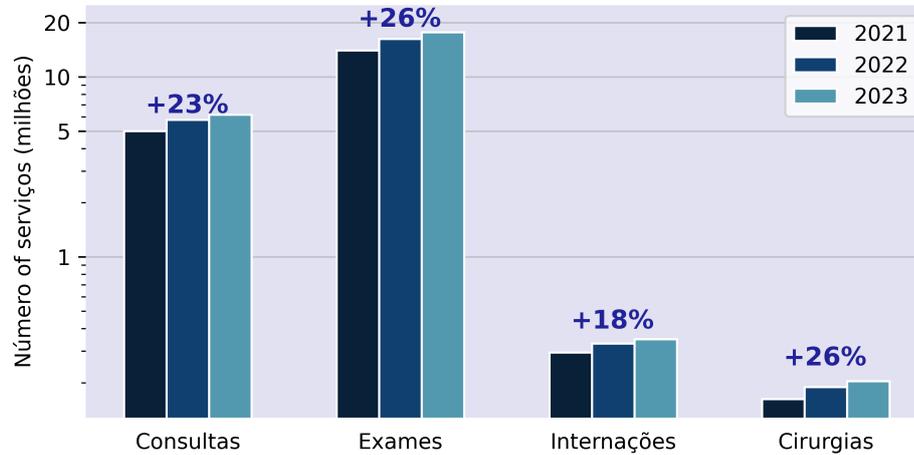


Figura 1: Números de Serviços por Categoria da Empresa Brasileira de Serviços Hospitalares (EBSERH).

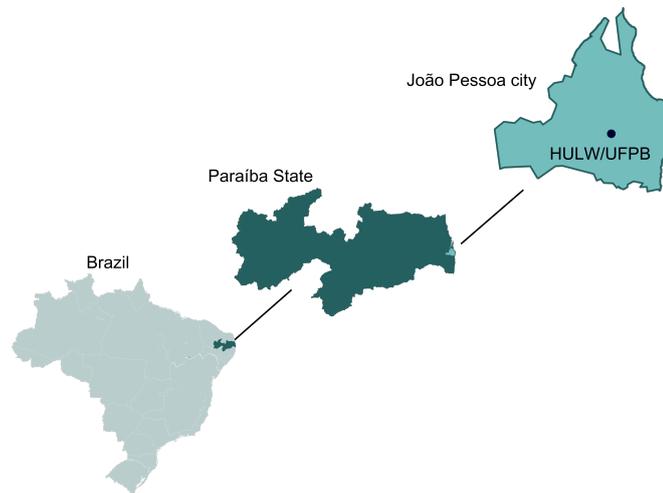


Figura 2: Localização aproximada do Hospital Universitário Lauro Wanderley na Universidade Federal da Paraíba (HULW/UFPB) vista ampliada fora da escala. Fonte: preparado pelos autores.

Foram realizadas quatro simulações numéricas utilizando o software ANSYS-Workbench[®], duas simulações para cada estudo. Na fase inicial, para o estudo hidrodinâmico e térmico foi simulado o ambiente sem nenhuma interferência do sistema UVGI, para mostrar o perfil de velocidade, comportamento do fluxo de ar e características térmicas do ambiente natural.

³Relatório Integrado EBSERH (<<https://www.gov.br/ebserh/pt-br/transparencia/relatorio-integrado>>).

Posteriormente, foi feita a simulação considerando o uso de equipamento móvel de UVGI colocado no centro das salas para obter a influência dos equipamentos inseridos no ambiente. No segundo estudo, para análise de potencial de desinfecção, foram realizadas duas simulações considerando apenas o duto de insuflamento de ar, com dois arranjos de sistemas UVGI distintos, sendo eles: Perimetral e Transversal. Nesta etapa foi verificado o potencial de desinfecção destes dois arranjos, considerando um modelo de escoamento multifásico.

Através desta modelagem será possível obter duas análises fundamentais na aplicação da solução do sistema de Irradiação Germicida Ultravioleta em ambientes hospitalares, a primeira é a resposta do fluxo de ar e temperatura dentro do ambiente fechado com condicionamento de ar dadas as condições impostas pela solução, apresentando considerações ao atendimento das normas regulamentares brasileiras para ambientes hospitalares (ANVISA, 2003; ABNT, 2022; ABNT, 2008a; ABNT, 2008b). A segunda está associada a uma análise do potencial de desinfecção que é possível de ser alcançado nesses ambientes na utilização de solução UVGI no duto de insuflamento.

Se dispositivos de Irradiação Germicida Ultravioleta (UVGI), fixos ou móveis, forem implementados em salas hospitalares, então será possível melhorar o potencial de desinfecção ao reduzir a concentração de microrganismos patogênicos transportados pelo ar, desde que os arranjos e configurações sejam otimizados por meio de análises baseadas na Dinâmica dos Fluidos Computacional (DFC). No entanto, a introdução desses dispositivos também deverá impactar o comportamento hidrodinâmico e térmico do ambiente: como fontes de calor, espera-se que os dispositivos elevem a temperatura local, potencialmente afetando o conforto térmico; e, como barreiras ao fluxo de ar, poderão gerar assimetrias na circulação, criando zonas de ventilação comprometida. Esses efeitos combinados exigem um equilíbrio criterioso entre a eficácia microbiológica e as condições de conforto e segurança ambiental, conforme os requisitos normativos aplicáveis. O que justifica a importância da realização deste estudo.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo desta tese é analisar a influência dos arranjos UVGI móvel, fixo perimetral, fixo transversal para circulação higiênica e conforto térmico no setor de pneumologia do

Hospital Universitário Lauro Wanderley, através de dinâmica dos fluidos computacional utilizando o software ANSYS-Workbench.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Estudar os possíveis arranjos de sistemas de Irradiação Germicida Ultravioleta (UVGI) que podem ser utilizados em salas de atendimento clínico, considerando a tecnologia de climatização utilizada;
- Verificar como os sistemas UVGI interferem nas propriedades hidrodinâmicas e térmicas do fluxo de ar do ambiente dos ambientes simulados;
- Identificar os perfis de fluxo de ar e gradiente de temperatura dos ambientes simulados fazendo um paralelo com os requisitos normativos do Brasil;
- Quantificar a fração de sobrevivência e desinfecção e a taxa de inativação na passagem única do fluxo viral alcançada após passagem do fluxo viral pelo sistema UVGI;

Para alcançar o objetivo proposto, esta tese foi estruturada em três etapas principais. A primeira etapa consiste na revisão de literatura, que fornece a base teórica para o estudo e está organizada em quatro temas centrais. O primeiro tema aborda os sistemas de condicionamento de ar, apresentando as tecnologias mais utilizadas atualmente, suas limitações, os princípios de distribuição de ar, sua relação com a psicrometria, e as normas brasileiras que estabelecem as condições ideais para ambientes climatizados. O segundo tema foca na circulação de ar em ambientes hospitalares, trazendo questões fundamentais como a setorização dos hospitais públicos brasileiros, os aspectos relacionados às infecções hospitalares, especialmente por vias aéreas, as características das partículas de aerossol de SARS-CoV-2, e as normas aplicáveis para garantir a proteção desses ambientes. O terceiro tema explora os fundamentos da mitigação viral com sistemas de Irradiação Germicida Ultravioleta (UVGI), detalhando as tecnologias disponíveis, os estudos relacionados ao seu uso, e os resultados obtidos em diferentes cenários. Por fim, o quarto tema aborda uma introdução à mecânica dos fluidos, apresentando as formulações teóricas e os métodos numéricos computacionais utilizados para a obtenção dos resultados desta tese.

A segunda etapa, dedicada à metodologia, descreve os passos e decisões relacionados ao estudo. Nessa fase, são apresentados o escopo do trabalho, as considerações sobre o estudo

de caso, e os testes e validações iniciais que fundamentam a obtenção de resultados confiáveis. Essa etapa detalha os critérios adotados para análise, desde a definição das condições do ambiente até as técnicas de simulação utilizadas.

Por fim, a terceira etapa, que trata dos resultados e discussões, apresenta os dados obtidos a partir das simulações computacionais realizadas. Os resultados são analisados com base na fundamentação teórica discutida na revisão de literatura e considerando a metodologia previamente estabelecida. As discussões abrangem as duas vertentes principais do estudo: a análise térmica e o potencial de desinfecção proporcionado pelo uso de sistemas UVGI, destacando suas implicações para ambientes hospitalares.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Sistemas de Climatização com Equipamentos Condicionadores de Ar

A climatização, entendida como o controle das condições ambientais internas que asseguram conforto e bem-estar, frequentemente lança mão de equipamentos condicionadores de ar. Segundo (SMITH; JONES, 2022), os sistemas de condicionamento de ar são dispositivos projetados para regular a temperatura e a umidade do ar em espaços fechados, a fim de torná-los adequados às atividades humanas.

A demanda por ambientes climatizados com estes dispositivos na sociedade moderna é cada vez maior, sendo impulsionada por diversos fatores. Conforme destacado por (SILVA, 2023), no Brasil, o uso de sistemas HVAC, do inglês "*Heating, Ventilation, and Air Conditioning*", têm crescido significativamente, especialmente em áreas urbanas e regiões de climas extremos, onde as temperaturas elevadas impõem desafios de controle.

Dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) indicam que mais de 70% dos edifícios comerciais e cerca de 50% dos edifícios residenciais brasileiros são equipados com sistemas HVAC. Essa tendência é observada em todo o país, especialmente em regiões de clima tropical, onde as altas temperaturas são predominantes (MARTINS; OLIVEIRA, 2020).

A relação entre o uso de sistemas condicionadores de ar e a saúde humana é um fator essencial a ser considerado. Conforme ressaltado por (CARVALHO, 2021), os sistemas de climatização eficientes são vitais para a prevenção de doenças relacionadas ao calor, como insolação e desidratação. Por outro lado, podem tornar-se vilões por induzirem a propagação de doenças transmissíveis pelo ar.

2.1.1 Tecnologias para Sistemas de Climatização

Os sistemas de condicionamento de ar podem ser categorizados em duas classes principais: sistemas de expansão direta e sistemas de expansão indireta. Os sistemas de expansão direta, conhecidos como sistemas DX (*Direct Expansion*), trabalham diretamente com o ar ambiente, onde o refrigerante passa por um evaporador, retirando calor do ar e resfriando-o. Em contrapartida, os sistemas de expansão indireta, também chamados de sistemas de água gelada, empregam água gelada como meio intermediário para transferir

calor do ar para o refrigerante. Nesses sistemas, o ar é resfriado de forma indireta por meio de trocadores de calor, como as bobinas de resfriamento, que interagem com a água gelada (ROSENBERG, 2017). Os principais equipamentos dos sistemas de expansão direta são os aparelhos de condicionamento de ar de Janela, *Splits Systems*, *Multisplits*, *Rooftop* e *Self-Contained*, enquanto que o principal equipamento utilizado em sistemas de expansão indireta é o *Chiller/Fancoil* (CREDER, 2004).

Os aparelhos de condicionamento de ar de Janela e *Splits Systems* funcionam de maneira simples, obedecendo os critérios do ciclo de compressão de vapor anteriormente explicados. Eles são amplamente utilizados em edificações residenciais. A diferença entre esses dois equipamentos está na disposição dos seus componentes. Em condicionadores de ar de Janela, os trocadores de calor (condensador e evaporador), compressor e dispositivo de expansão (e demais periféricos específicos) estão dentro de um dispositivo único, enquanto que em equipamentos *Splits Systems* os componentes estão descentralizados, podendo ser instalados sob distâncias padronizadas pelo fabricante (CREDER, 2004).

Os equipamentos *Self-Contained* (Figura 3) são indicados para ambientes espaçosos, como shoppings, hospitais, bibliotecas e auditórios, por terem alta capacidade de refrigeração. São similares aos condicionadores de ar de janela, pois possuem em uma única carcaça todos os componentes necessários para o condicionamento do ar. Porém ainda permitem que as unidade condensadoras sejam instaladas externamente, utilizando resfriamento a ar ou água.



Figura 3: *Sistema de condicionamento de ar do tipo Self-Contained..* (CARRIER, 2024)

Os sistemas do tipo *Rooftop* são parecidos com os *Self-Contained* com a diferença de que o projeto permite que os equipamentos sejam instalados externamente a edificação, assim como o nome diz, sobre a cobertura da edificação. Ambos os equipamentos utilizam distribuem o ar aos ambientes por meio de dutos instalados na estrutura, podendo ou não ter auxílio de ventiladores no duto para insuflar o ar para dentro da edificação, dependendo da

distância do equipamento à área a ser climatizada (CREDER, 2004).

Um equipamento que merece atenção especial é o *Chiller* (Figura 4). O processo de resfriamento deste equipamentos pode ser dividido em três etapas. A primeira está no próprio equipamento, o qual através de transformações termodinâmicas, caracterizadas pelo método de resfriamento do refrigerante (por absorção ou expansão) realiza o resfriamento do fluido de trabalho.



Figura 4: *Chiller Centrifugo Dual Compressor*. (DAIKIN, 2024)

Este fluido não é utilizado diretamente para resfriamento do ambiente e, por isso, esses equipamentos são chamados de dispositivos de expansão indireta. Quando o fluido está frio ele é direcionado para a evaporadora do *Chiller*, onde troca calor com uma solução de água. Após resfriar a solução, a água é bombeada ao ponto de uso. Neste local a solução retira o calor do ambiente através de um *Fancoil* e retorna para a evaporadora do *Chiller*, para reiniciar o ciclo da segunda etapa.

Da mesma forma, a terceira etapa, de rejeição de calor por parte do fluido refrigerante, também pode ser feita com água. Esse método de resfriamento demanda uma torre de resfriamento, que normalmente fica nos telhados das edificações (locais arejados). O fluxo inicia na condensadora do *Chiller*, onde o calor é transferido do fluido refrigerante para a água de arrefecimento. Essa água é então bombeada para a torre que realiza a rejeição do calor para o ambiente por meio do processo de convecção. A água resfriada retorna ao condensador para realizar um novo ciclo (ASHRAE, 2020a). A Figura 5 apresenta os elementos deste sistema.

As tecnologias apresentadas possuem formas específicas para resfriamento do ambiente, processos característicos para distribuir o ar resfriado no ambiente. Tecnologias como a do condicionamento de ar de Janela, *Splits Systems* e *Multisplits* capturam o ar, resfriam-no e o insuflam através da própria unidade interna, por meio de um ventilador com palhetas de direcionamento do fluxo. Os sistemas *Chiller*, utilizam geralmente o bombeamento de água gelada para o ponto de uso. Nesses locais existem geralmente unidades fancoil que possuem

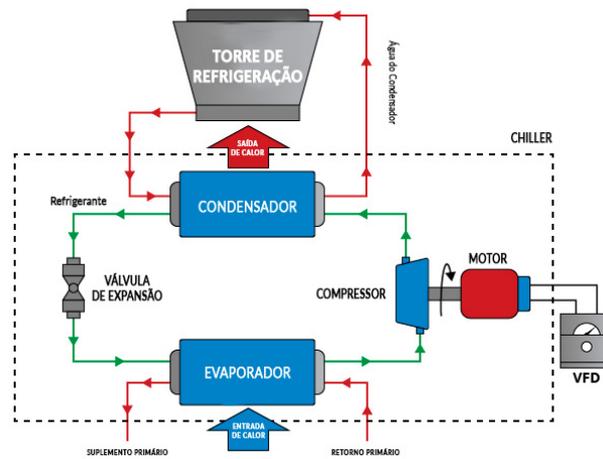


Figura 5: *Processo de Resfriamento Chiller a Água.* (EMBRAR, 2024)

um evaporador (trocador de valor) e um ventilador para forçar a circulação e resfriamento do ambiente.

As tecnologias *Self-Contained* e *Rooftop* são geralmente utilizadas como sistemas centrais, e por isso utilizam a circulação através de dutos isolados termicamente ao longo da edificação. A Figura 6 apresenta um esquema de distribuição de ar condicionado através de dutos. Vale ressaltar que existem diversas formas de insuflar o ar através deste tipo de sistema, como será visto adiante.

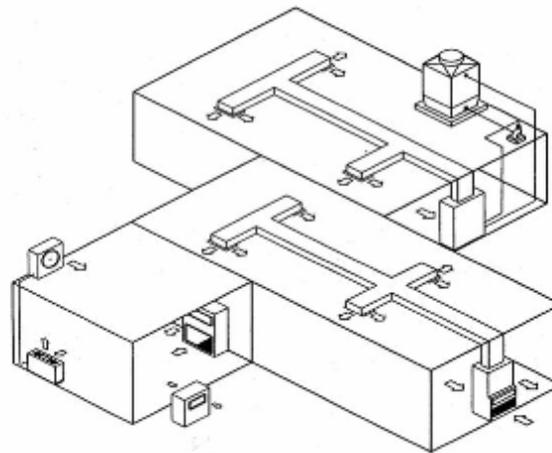


Figura 6: *Esquema de Distribuição de Ar do Sistema Self-Contained.* (ABRAVA, 2024)

2.1.2 Sistemas de Distribuição de Ar Condicionado por Dutos

Como citado anteriormente, existem diversas formas de insuflamento de ar dutado em ambientes climatizados, cada uma com suas características e aplicações específicas. Uma

das abordagens mais comuns é o insuflamento por difusores de teto, que distribuem o ar frio ou condicionado de forma uniforme por todo o ambiente. Esses difusores, muitas vezes, são instalados em padrões regulares ao longo do teto, proporcionando uma dispersão eficaz do ar e contribuindo para a manutenção do conforto térmico (ASHRAE, 2017).

Além do insuflamento por difusores de teto, outra técnica frequentemente utilizada é o insuflamento por grelhas de piso. Essas grelhas são posicionadas no chão do ambiente e permitem que o ar condicionado seja liberado diretamente para a zona de ocupação, promovendo uma sensação de conforto térmico imediato. No entanto, é importante considerar que o insuflamento por grelhas de piso pode resultar em uma distribuição desigual do ar no ambiente, especialmente em espaços com mobiliário ou obstáculos (COAD, 2019).

Uma terceira abordagem comum é o insuflamento por difusores de parede, que são instalados em posições estratégicas ao longo das paredes do ambiente. Esses difusores direcionam o ar condicionado para a zona de ocupação de forma eficiente, ajudando a evitar correntes de ar desconfortáveis e garantindo uma distribuição uniforme do ar no espaço. No entanto, é importante dimensionar adequadamente o número e a localização dos difusores de parede para garantir uma climatização eficaz e confortável (ASHRAE, 2017).

Diversas tecnologias e métodos de insuflamento têm como objetivo primordial condicionar as propriedades do ar dentro dos ambientes para alcançar a zona de conforto térmico. Esta região é estabelecida com base nas necessidades humanas e suas características são determinadas pelas propriedades do ar presente no ambiente. Os métodos utilizados para atingir essa zona de conforto variam de acordo com as condições naturais do ambiente que está sendo climatizado.

2.1.3 Psicrometria e Conforto Térmico

A psicrometria, ramo essencial da Termodinâmica Aplicada, investiga minuciosamente as propriedades do ar úmido e suas interações com as superfícies úmidas. No contexto da climatização, a psicrometria atua para analisar e controlar as condições do ar em ambientes internos, visando proporcionar conforto térmico e qualidade (ASHRAE, 2017). Além disso, o controle adequado das propriedades do ar úmido é fundamental para o gerenciamento de risco de doenças transmitidas pelo ar, como resfriados, gripes e infecções respiratórias, já que a umidade e a temperatura do ar podem afetar diretamente a sobrevivência e a propagação de patógenos (KILGORE; BROSSEAU; GRAVELLE, 2020).

Entre as variáveis que especificam as propriedades do ar úmido, destacam-se diversas medidas fundamentais. Essas medidas são subdivididas entre medidas de temperatura, umidade, energia e volume (CREDER, 2004).

Na categoria temperatura encontramos três propriedades: Temperatura de Bulbo Seco, Temperatura de Bulbo Úmido e Temperatura de Ponto de Orvalho. A temperatura de bulbo seco representa a temperatura real do ar, enquanto a temperatura de bulbo úmido reflete a influência da umidade na sensação térmica. Já a temperatura de ponto de orvalho indica a temperatura na qual o ar se satura de vapor de água, podendo ocorrer a condensação.

A umidade pode ser subdividida em mais duas propriedades: Umidade Relativa e Umidade Absoluta. A umidade relativa expressa a proporção de vapor de água presente no ar em relação à sua capacidade máxima de retenção naquela temperatura, já a umidade absoluta representa a quantidade real de vapor de água presente no ar, medida em gramas por metro cúbico (MILLER; MILLER, 2014).

Por fim, outras propriedades importantes do ar úmido incluem o volume específico e a entalpia. O volume específico refere-se ao volume ocupado por uma unidade de massa de ar úmido, enquanto a entalpia representa a energia total do ar, levando em consideração sua temperatura, umidade e pressão (ASHRAE, 2017).

Essas e outras propriedades, quando combinadas, permitem uma análise abrangente das condições do ar em um ambiente e são essenciais para o projeto e a eficiência operacional de sistemas de climatização. Todas as propriedades são relacionadas através da Carta Psicrométrica presente no ANEXO A deste trabalho (Figura 54).

Com base na carta psicrométrica, é possível determinar a zona de conforto térmico ideal para os ocupantes, considerando fatores como temperatura e umidade relativa. Assim, a carta psicrométrica serve como um guia prático e eficaz para o projeto e a operação de sistemas de climatização, auxiliando na criação de ambientes internos confortáveis e saudáveis.

Como citado anteriormente, a metodologia para climatizar de forma confortável um ambiente depende das características naturais da região a que se deseja condicionar. Por exemplo, se uma região for naturalmente fria e seca, o processo psicrométrico deverá ser de aquecimento e umidificação.

A (ASHRAE, 2017) destaca que cada região possui particularidades climáticas que influenciam diretamente nas estratégias de condicionamento do ar. Fatores como tempera-

tura, umidade relativa e variação sazonal do clima devem ser cuidadosamente considerados durante o planejamento dos sistemas de climatização. Além disso, é importante ter em mente que cada máquina utilizada para climatização modifica as propriedades psicrométricas do ambiente, conforme observado por (KILGORE; BROSSEAU; GRAVELLE, 2020).

Os principais processos psicrométricos podem ser observados na Figura 7. Nesta figura, quando há uma mudança nas propriedades psicrométricas (seja provocado por uma máquina ou naturalmente) as características termodinâmicas do ar de um ambiente sai do ponto inicial e vai para um ponto final termodinamicamente diferente. A direção dessa mudança representa o processo psicrométrico ocorrido.

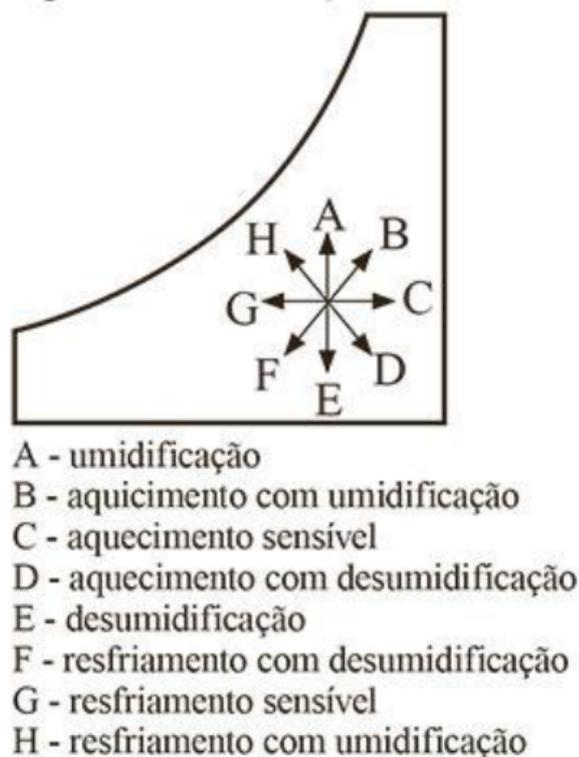


Figura 7: *Processos Psicrométricos*. (STOECKER; JONES, 1985)

Um processo amplamente utilizado, especialmente em regiões de clima quente e úmido, é o resfriamento com desumidificação (processo H). O processo de resfriamento com desumidificação combina a redução da temperatura do ar com a remoção do excesso de vapor d'água, sendo amplamente utilizado em sistemas de climatização. Nesse método, o ar passa por superfícies frias, abaixo do ponto de orvalho, onde a umidade condensa e é eliminada, resultando em um ambiente mais seco e confortável. Equipamentos como condicionadores de ar e umidificadores são comumente empregados para realizar o resfriamento evaporativo, fornecendo um ambiente mais fresco e agradável mesmo em condições climáticas adversas

(COAD, 2019).

Na região nordeste do Brasil, onde as temperaturas podem atingir médias acima de 30 °C durante boa parte do ano e a umidade relativa costuma ser elevada, o uso de resfriamento com desumidificação é particularmente relevante. Dados quantitativos apontam que as temperaturas médias anuais variam entre 25 °C e 28 °C, enquanto a umidade relativa do ar nesta região do país pode alcançar valores superiores a 70% em determinadas épocas do ano, de acordo com informações do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Nessa região, o processo mais utilizado é o resfriamento com desumidificação proporcionado por um sistema de condicionamento de ar convencional.

Como pode ser observado as condições de uma região classificam em qual localização ela se encontra na carta psicrométrica e qual a melhor metodologia para obter o conforto térmico. A carta bioclimática de Givoni é uma ferramenta gráfica utilizada para avaliar as condições de conforto térmico em relação às variáveis climáticas de um ambiente, como temperatura e umidade relativa (GIVONI, 1992). Essa carta é inscrita sobre a carta psicrométrica e divide as condições ambientais em diferentes zonas, cada uma indicando estratégias de projeto ou adaptação para alcançar o conforto térmico. Entre os fatores considerados, destacam-se a ventilação natural, aquecimento, resfriamento evaporativo e desumidificação.

A zona de conforto térmico é o núcleo da carta, onde as condições ambientais permitem o bem-estar sem a necessidade de intervenções externas. Fora dessa área, encontram-se zonas que indicam estratégias específicas: por exemplo, temperaturas altas associadas a alta umidade relativa podem demandar resfriamento evaporativo, enquanto temperaturas baixas sugerem a necessidade de aquecimento. A ventilação natural é recomendada em zonas de calor seco, promovendo trocas térmicas e conforto por convecção.

Por fim, a carta de Givoni também ajuda a identificar combinações climáticas extremas que requerem soluções mais elaboradas, como o uso de sistemas mecânicos para controle climático. Sua aplicação é valiosa na arquitetura bioclimática e no planejamento de edificações sustentáveis, permitindo otimizar o conforto térmico com menor consumo energético. Assim, ela é uma ferramenta essencial para projetos em climas variados, adaptando estratégias às condições locais.

Vale ressaltar que as condições de conforto para cada edificação, também depende do tipo de atividade desenvolvido no ambiente, e são preestabelecidas através de normas técnicas, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) traz diversas recomendações



Figura 8: *Carta Bioclimática de Givoni*. (GIVONI, 1992)

sobre os projetos de condicionamento do ar interior conforme será apresentado a seguir.

2.1.4 Qualidade do Ar Interior: Aspectos Químicos, Biológicos e a Importância da Manutenção dos Equipamentos

A qualidade do ar interior (QAI) é um tema de crescente relevância em estudos relacionados à saúde, conforto e sustentabilidade ambiental, especialmente em ambientes fechados como residências, escritórios e salas de cuidados clínicos. A Organização Mundial da Saúde (WHO, 2018) destaca que ambientes internos podem apresentar concentrações de poluentes significativamente mais altas do que as encontradas ao ar livre, especialmente em locais com baixa renovação de ar. Essa preocupação é respaldada por regulamentações como a norma ISO 16000-1, que define métodos para a avaliação da QAI, e pela resolução da ANVISA nº 9/2003, que estabelece parâmetros de controle em edifícios climatizados ((ISO), 2019; (ANVISA), 2003).

Do ponto de vista químico, diversos compostos são responsáveis por comprometer a QAI, incluindo compostos orgânicos voláteis (VOCs), dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), formaldeído e partículas finas ($\text{PM}_{2.5}$ e PM_{10}). Esses poluentes podem ter origem em materiais de construção, produtos de limpeza, mobiliário, combustão de aparelhos domésticos ou atividades humanas. A exposição prolongada a esses contaminantes está associada a irritações respiratórias, cefaleias e doenças crônicas, como asma e enfermidades cardiovasculares. Normas como a ASHRAE 62.1-2019 e a EN 16798-1:2019 oferecem diretrizes para limites aceitáveis de poluentes químicos em ambientes internos, reforçando a importância do controle dessas substâncias (HEATING; (ASHRAE), 2019; (CEN), 2019).

No âmbito biológico, microrganismos como bactérias, vírus, fungos e alérgenos deriva-

dos de ácaros ou animais domésticos representam uma ameaça significativa à QAI. Ambientes úmidos favorecem o crescimento de fungos e bolores, que podem liberar esporos no ar e agravar alergias, asma e outros problemas respiratórios. Além disso, ambientes de cuidados clínicos demandam atenção especial devido à alta prevalência de patógenos no ar, os quais aumentam o risco de infecções nosocomiais. A norma ISO 14644, amplamente utilizada para salas limpas, e a resolução RDC 50/2002 da ANVISA estabelecem critérios para reduzir a proliferação desses microrganismos em ambientes críticos ((ISO), 2020; (ANVISA), 2020).

Um fator agravante na disseminação de poluentes biológicos é a formação de bioaerossóis, compostos por partículas suspensas que podem conter microrganismos viáveis ou fragmentos alergênicos. Estudos indicam que esses bioaerossóis são facilmente dispersos por sistemas de ventilação mal projetados, aumentando o risco de exposição (MORAWSKA et al., 2020). Além disso, a resistência de microrganismos a desinfetantes, como bactérias multirresistentes, é um problema crescente em ambientes hospitalares. Estratégias como a adoção de filtros HEPA (High Efficiency Particulate Air), sistemas de ventilação bem projetados e a utilização de tecnologias UV-C são recomendadas para mitigar a disseminação desses agentes (LI et al., 2021).

A manutenção adequada dos sistemas de climatização e ventilação é essencial para garantir tanto a qualidade do ar interior quanto a performance térmica dos ambientes. Sistemas de ar-condicionado e ventilação que operam sem manutenção regular podem acumular poeira, fungos e outros contaminantes, que são posteriormente dispersos pelo ar, comprometendo a saúde dos ocupantes. A Resolução nº 9/2003 da ANVISA e o Programa de Manutenção, Operação e Controle (PMOC), instituído pela Lei nº 13.589/2018, tornam obrigatória a realização de manutenções regulares nesses sistemas em edifícios públicos e privados, como forma de garantir a eficiência do controle de contaminantes e a segurança dos ocupantes (BRASIL, 2018).

A implementação do PMOC não se limita ao aspecto técnico da manutenção dos equipamentos. Ele também visa assegurar o cumprimento dos parâmetros de ventilação e renovação do ar estabelecidos pelas normas nacionais e internacionais. Manutenções preventivas e corretivas realizadas periodicamente, como a limpeza e substituição de filtros, a inspeção de dutos e a verificação do funcionamento adequado de componentes como serpentinas e compressores, são indispensáveis para evitar a recirculação de partículas contaminantes e para preservar a eficiência energética do sistema. Além disso, o PMOC promove a

rastreabilidade e documentação das intervenções realizadas, um aspecto fundamental para auditorias e certificações de qualidade ambiental.

Portanto, soluções para melhorar a QAI não se limitam ao uso de tecnologias avançadas, mas incluem também a gestão adequada da manutenção dos sistemas de climatização e ventilação. Além de reduzir os impactos negativos à saúde e melhorar o conforto térmico, o cumprimento das exigências do PMOC contribui para a sustentabilidade operacional e a eficiência energética das edificações. Dessa forma, a manutenção preventiva dos equipamentos se torna uma prática essencial na gestão de edifícios, especialmente em contextos críticos, como ambientes hospitalares e outros locais que exigem elevados padrões de segurança ambiental.

2.1.5 Normatização Brasileira para Condicionamento de Ar em Ambientes Climatizados

A ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas, é o órgão nacional de normatização reconhecido pela sociedade brasileira desde sua fundação em 28 de setembro de 1940, tendo sido ratificado pelo governo federal por meio de diversos instrumentos legais. Sua principal atribuição é a elaboração das Normas Brasileiras (ABNT NBR), as quais são desenvolvidas pelos seus Comitês Brasileiros (ABNT/CB), Órgãos Normativos Setoriais (ABNT/ONS) e Comissões Especiais de Estudos (ABNT/CEE)⁴. O governo brasileiro, por meio de leis, portarias e decretos, estabelece a obrigatoriedade ou a orientação para a aplicação das normas desenvolvidas pela ABNT, com o objetivo de garantir maior segurança aos bens e serviços produzidos e praticados em território nacional.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) age na regulamentação e padronização de diversos setores, incluindo o condicionamento do ar em ambientes climatizados. Suas normas estabelecem diretrizes técnicas e requisitos mínimos que visam garantir a qualidade do ar interior e o conforto dos ocupantes. A padronização proporcionada pela ABNT não apenas promove a segurança e o bem-estar dos usuários, mas também auxilia na uniformização dos processos de projeto, instalação e operação de sistemas de climatização.

As normas utilizadas para garantir os requisitos de qualidade de ar e as condições de conforto térmico em ambientes hospitalares são diretamente relacionada as normas que asseguram esses fatores para ambientes internos de forma geral. Neste sentido, podemos

⁴Fonte: ABNT - institucional. Disponível em <<https://www.abnt.org.br/institucional/sobre>>. Acessado em 28 de dezembro de 2022.

destacar as normas que se aderem à instalação de projetos, parâmetros para conforto térmico e qualidade do ar interior, que são: ABNT NBR 16401-1, 16401-2 e 16401-3 de 2008.

A Norma ABNT NBR 16401-1 (2008) aborda os requisitos de projeto e instalação de sistemas de condicionamento de ar em geral, estabelecendo parâmetros para dimensionamento, distribuição de ar, filtragem e controle de temperatura e umidade. Seu objetivo é garantir que os sistemas de climatização atendam às necessidades térmicas e de qualidade do ar, promovendo condições de conforto adequadas. Para isso, essa norma também contextualiza com dados experimentais as propriedades psicrométricas das diversas localidades do Brasil.

Já a norma ABNT NBR 16401-2 (2008) especifica os parâmetros do ambiente interno que proporcionem conforto térmico aos ocupantes de recintos providos de condicionadores de ar. Esta norma se concentra em quantificar e qualificar a zona de conforto térmico no verão e inverno. É possível encontrar propriedades como temperatura operacional, umidade relativa e velocidade média do ar recomendadas para conforto. Além disso, a norma também apresenta os requisitos para realização da medição destas propriedades (Tabela 1).

Tabela 1: Condições de Conforto Térmico segundo a Norma ABNT NBR 16401-2 (2008).

Condição Climática	Temperatura	Umidade Relativa	Velocidade Média do Ar
Verão	21,5°C à 24,5°C	65%	0,20 m/s a 0,30 m/s
Inverno	20,0°C à 22,5°C	60%	0,20 m/s a 0,30 m/s

Em conjunto com as duas anteriores, atua a Norma ABNT NBR 16401-3, que trata especificamente da qualidade aceitável de ar interior para conforto térmico. A discussão de qualidade do ar está vinculada diretamente à ventilação do ambiente e sua renovação, considerando a vazão aceitável e suas tecnologias de filtragem, pressurização e monitoramento da qualidade do ar.

De acordo com a NBR 16401-3, alguns requisitos precisam ser atendidos em relação a vazão de ar exterior, para encontrar essa vazão mínima aceitável seguem-se as seguintes etapas. Primeiramente encontra-se a vazão eficaz do ambiente, através da equação 2.1 a seguir.

$$V_{ef} = P_z F_p + A_z F_a \quad (2.1)$$

Onde, V_{ef} é a vazão eficaz de ar exterior, expressa em litros por segundo (L/s), F_p é vazão por

Tabela 2: Vazão Eficaz Mínima de ar Exterior para Ventilação NBR 16401-3 (2008).

Local	D Pessoas/100 m ²	Nível 3	
		F _p L/s*Pessoa	F _a L/s*m ²
Escritório com Média Densidade	14	3,8	0,5

pessoa, expressa em litros por segundo $[(L/s) \cdot Pessoa]$, F_a é a vazão por área útil ocupada $[(L/s) \cdot m^2]$, P_z é o número máximo de pessoas na zona de ventilação e A_z é a área útil ocupada pelas pessoas, expressa em metros quadrados (m^2).

Os valores de F_p e F_a são obtidos através de tabela da norma, considerando o nível de vazão de ar exterior necessário. Podendo ser 1 para nível mínimo, 2 para intermediário e 3 para casos em que houverem estudos de manifestação alérgica. Para esta pesquisa a sala climatizada será equiparada a um escritório de média densidade em nível 3. As informações deste caso são apresentadas na Tabela 2.

Após a determinação da Vazão Eficaz (V_{ef}), a norma sugere que o valor seja corrigido considerando a eficiência da distribuição de ar na zona climatizada. Para esta pesquisa considera-se que a configuração de distribuição é por insuflação de ar frio pelo forro, e por isso o fator de correção é igual a 1,0. Para este caso a Vazão eficaz (V_{ef}) é a igual a vazão de ar exterior a ser suprida na zona de ventilação (V_z).

Em situações de zonas múltiplas suprindo mistura de ar exterior e ar recirculado, o método simplificado para cálculo da vazão total de ar exterior V_s deve ser realizado pela equação 2.2 a seguir.

$$V_{ef} = \frac{D \cdot \sum (P_z F_p) + \sum (A_z F_a)}{E_v} \quad (2.2)$$

Em que E_v é o fator de distribuição de ar nas zonas de ventilação e D é o fator de diversidade de ocupação (que corrige somente a fração do ar exterior relacionada a pessoas).

O fator de distribuição de ar nas zonas de ventilação é tabelado (Tabela 3), porém depende da fração entre a vazão de ar exterior requerida na zona de ventilação (V_z) e a vazão total insuflada na zona (V_t), como apresentado na equação 2.3.

Tabela 3: Eficiência da Distribuição de Ar nas zonas de ventilação.

Z_{ae} Máx	E_v
$\leq 0,15$	1,0
$\leq 0,25$	0,9
$\leq 0,35$	0,8
$\leq 0,45$	0,7
$\leq 0,55$	0,6

$$Z_{ae} = \frac{V_z}{V_t} \quad (2.3)$$

O fator de diversidade de ocupação D também é uma fração, correlaciona o total de pessoas simultaneamente presentes nos locais servidos pelo sistema (P_s) e a soma das pessoas previstas em cada zona (P_z), conforme a equação 2.4.

$$D = \frac{P_s}{\sum P_z} \quad (2.4)$$

As normas ABNT NBR 16401 são de extrema importância para orientar a elaboração de projetos de climatização em diferentes tipos de edificações, incluindo hospitais, onde a qualidade do ar é um fator crítico para a prevenção de infecções. Porém, como a normatização tem caráter orientativo, o aspecto compulsório é disciplinado pelo estado. No Brasil, o órgão que regulamenta as condições mínimas dos ambientes climatizados é a Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA), através dos dispositivos da Resolução N° 09/2003.

Esta resolução possui dois objetivos principais: estabelecer critérios que informem a população sobre a qualidade do ar interior em ambientes de uso público e coletivo climatizados artificialmente, cujo desequilíbrio poderá causar agravos à saúde dos seus ocupantes, e instrumentalizar as equipes profissionais envolvidas no controle de qualidade do ar interior, no planejamento, elaboração, análise e execução de projetos físicos e nas ações de inspeção de ambientes de uso público e coletivo climatizados artificialmente.

Esses padrões foram publicados no Diário Oficial da União em 20 de janeiro de 2003, considerando a preocupação latente com a saúde, segurança, bem estar e conforto dos ocupantes dos ambientes climatizados. É considerado um documento fundamental elaborado

por um comitê técnico científico.

Na resolução N° 09 alguns padrões referenciais são adotados e serão considerados nesta pesquisa. São eles: faixa de operação de temperatura de bulbo seco (para verão e inverno), faixa recomendável de operação da umidade relativa (para verão e inverno), valor máximo recomendável de velocidade do ar à altura de 1,5 m do piso e taxa de renovação de ar adequada. Todas essas variáveis podem ser identificadas na Tabela 4 a seguir.

Tabela 4: Padrões Referenciais Resolução ANVISA N° 09/2003.

Clima	Temperatura TBS	Umidade Relativa	Velocidade Máx	Renovação Mínima
Verão	22°C à 25°C	40% à 65%	0,30 m/s	27 m ³ /hora/pessoa
Inverno	19,0°C à 21,0°C	35% à 65%	0,30 m/s	27 m ³ /hora/pessoa

Ao seguir as diretrizes estabelecidas por essas normas, os profissionais responsáveis pela concepção e operação de sistemas de condicionamento de ar podem garantir ambientes saudáveis, confortáveis e seguros para seus usuários. É importante ressaltar que em ambientes hospitalares esse cuidado deve ser redobrado, em virtude da alta concentração de agentes patogênicos transmitidos pelo ar. Por este motivo, são necessários estudos detalhados das características da circulação do ar.

2.2 Circulação de Ar em Ambientes Hospitalares

Trabalhadores passam de 80 a 90% de seu tempo dentro de construções e ambientes fechados. Como a maioria das atividades é realizada nesses espaços, a implementação de sistemas de climatização permite que tanto eles quanto os equipamentos e máquinas que eles operam permaneçam em um ambiente operem confortável. Em comparação com outros tipos de edifícios, as instituições de saúde, especialmente hospitais, apresentam uma complexidade considerável de gerenciamento (GOBBI; SANTOS; ROLA, 2019). Isso se deve à operação ininterrupta, grande circulação de pessoas, controle intensivo de infecções, assepsia rigorosa de instrumentos cirúrgicos e às demandas de protocolos bem planejados para construção, reforma e manutenção. Todos esses requisitos exigem investimentos substanciais e o cumprimento de regras rigorosas para o manuseio de produtos químicos perigosos.

O interesse pelo estudo da qualidade do ar interior foi despertado pela constatação de que a diminuição da taxa de renovação do ar em ambientes fechados é a principal causa do aumento na concentração de poluentes, tanto biológicos quanto não biológicos. Essa

preocupação se justifica, pois as pessoas expostas à circulação interna de poluentes sofrem com a má qualidade do ar (QUADROS, 2008). Nos hospitais, a precária qualidade do ar interior compromete a recuperação dos pacientes e a saúde dos funcionários. Portanto, é essencial que os hospitais tenham sistemas de climatização bem projetados, que proporcionem uma ventilação adequada e garantam o conforto e o bem-estar de seus ocupantes (MOTA et al., 2014). Em uma unidade de assistência médica, a qualidade do ar pode influenciar diretamente o tempo de recuperação dos pacientes e a incidência de infecções hospitalares. Esse aspecto é ainda mais crucial em unidades de atendimento para pacientes com câncer ou doenças imunodepressivas, nos quais o sistema imunológico está gravemente comprometido (QUADROS, 2008).

2.2.1 Setorização em Ambientes Hospitalares Públicos no Brasil

Ambientes hospitalares públicos no Brasil são estruturas complexas, projetadas para atender às necessidades de saúde da população. A setorização desses edifícios é fundamental para garantir o funcionamento eficiente e seguro das operações médicas, considerando as áreas críticas e não críticas (CAMPOS; LOPES; COSTA, 2017). A setorização geral desses edifícios segue uma abordagem que considera a segregação de espaços de acordo com sua função e risco de contaminação. As áreas críticas são aquelas onde o risco de transmissão de doenças é elevado, enquanto as áreas não críticas são destinadas a atividades de menor risco.

Um estudo conduzido por (SILVA et al., 2019) analisou a setorização de um hospital público de grande porte no Brasil e identificou as seguintes áreas críticas:

- **Unidades de Terapia Intensiva (UTIs):** São espaços reservados para pacientes em estado grave que necessitam de cuidados intensivos. Devido à natureza das doenças tratadas nessas unidades e à fragilidade dos pacientes, medidas rigorosas de controle de infecção são implementadas para prevenir a disseminação de patógenos.
- **Centros Cirúrgicos:** São áreas onde procedimentos cirúrgicos são realizados. Esses ambientes apresentam riscos de infecção devido à exposição interna dos pacientes e à manipulação de tecidos e órgãos. A setorização nesses espaços visa garantir a esterilidade e a segurança durante as operações.
- **Salas de Isolamento:** São destinadas ao tratamento de pacientes com doenças altamente contagiosas ou imunocomprometidos. A setorização dessas áreas é crucial para

evitar a propagação de patógenos entre os pacientes e profissionais de saúde.

Por outro lado, as áreas não críticas incluem:

- **Ambulatórios e Consultórios:** São espaços destinados ao atendimento ambulatorial, consultas médicas e procedimentos de menor complexidade. Embora apresentem menor risco de infecção, ainda são submetidos a medidas de higiene e limpeza rigorosas.
- **Áreas Administrativas e de Apoio:** Compreendem escritórios administrativos, áreas de descanso para funcionários, salas de reuniões e outros espaços de suporte ao funcionamento do hospital. Embora essas áreas não estejam diretamente envolvidas no atendimento ao paciente, também são importantes para o funcionamento eficiente da instituição.

A eficácia da setorização em ambientes hospitalares públicos é primordial para garantir a segurança dos pacientes, profissionais de saúde e visitantes. A implementação de medidas de controle de infecção, como a desinfecção regular de superfícies, o uso de Equipamentos de Proteção Individual (EPIs) e a manutenção de padrões adequados de higiene, são fundamentais para minimizar o risco de infecções hospitalares.

Com a pandemia da COVID-19, essas medidas precisaram ser revistas a transmissibilidade em setores específicos dos hospitais públicos brasileiros. O setor de pneumologia é um dos ambientes que passaram a ter uma crescente atenção em se tratando de combate à transmissibilidade.

O setor de pneumologia em hospitais desempenha um papel fulcral no diagnóstico, tratamento e gerenciamento de uma ampla variedade de doenças respiratórias. Pacientes com condições que vão desde doenças crônicas, como a asma e a doença pulmonar obstrutiva crônica (DPOC), até doenças agudas como pneumonia e síndrome do desconforto respiratório agudo (SDRA) são encaminhados a esse setor em busca de cuidados especializados.

As doenças respiratórias representam uma significativa carga global de doenças, com milhões de casos registrados anualmente (GBD, 2017). Depreende-se, assim, que o setor de pneumologia torna-se essencial para a gestão e o tratamento adequado dessas condições, visando melhorar a qualidade de vida dos pacientes e reduzir a morbimortalidade associada.

É importante ressaltar que o setor de pneumologia não apenas trata doenças respiratórias crônicas, mas também possui papel decisivo no enfrentamento de emergências respiratórias agudas, incluindo surtos de doenças infecciosas transmitidas pelo ar, como a COVID-19 e

influenza. Pacientes infectados com essas doenças transmissíveis frequentemente necessitam de cuidados respiratórios intensivos, como suporte ventilatório e monitoramento cuidadoso dos gases sanguíneos (PHAM; BROCHARD; SLUTSKY, 2021).

No setor de pneumologia, uma variedade de procedimentos diagnósticos e terapêuticos são realizados para avaliar e tratar as condições respiratórias dos pacientes. Entre os procedimentos mais comuns estão a espirometria, a gasometria arterial, a broncoscopia e a ventilação mecânica (VESTBO et al., 2013; TORRES et al., 2017). Esses procedimentos são essenciais para fornecer informações precisas sobre a função pulmonar, diagnosticar doenças respiratórias específicas e fornecer suporte respiratório quando necessário.

É importante ressaltar que, devido à natureza altamente contagiosa de certas doenças respiratórias, como COVID-19 e influenza, medidas rigorosas de controle de infecção são implementadas no setor de pneumologia. Isso inclui o uso de EPI adequados, a triagem de pacientes para identificar possíveis casos de doenças transmissíveis e o isolamento apropriado de pacientes (WANG et al., 2020b).

2.2.2 Infecções Hospitalares e Riscos Concomitantes

De acordo com a (ANVISA, 2005), a infecção hospitalar é definida como "a infecção adquirida após a admissão do paciente no hospital, que se manifesta durante a hospitalização ou após a alta e pode estar relacionada à hospitalização ou a procedimentos hospitalares". Essas infecções são fatores complicadores no tratamento de pacientes hospitalizados, pois não apenas causam sofrimento ao paciente, mas também contribuem para o aumento da morbidade, mortalidade, tempo de internação e custos de tratamento pós-infecção.

Da mesma forma, a Organização Pan-Americana da Saúde (OPAS) e a Organização Mundial da Saúde (OMS) definem a infecção hospitalar como uma infecção adquirida durante a hospitalização, geralmente causada pela própria flora bacteriana humana, que se desequilibra em relação aos mecanismos de defesa anti-infecciosos devido à doença, procedimentos invasivos (como soro, cateteres e cirurgias) e contato com a flora hospitalar. Portanto, isso pode ser considerado um sério problema de saúde pública global (SANTOS et al., 2005; CDC et al., 2001).

Os ambientes hospitalares propagam agentes infecciosos resistentes, intensificam os riscos associados a procedimentos invasivos e agrupam pessoas com diferentes vulnerabilidades à infecção, favorecendo o transporte dos agentes infecciosos. As infecções podem

ser espalhadas entre profissionais de enfermagem e gerar o absenteísmo desses profissionais (APPOLINÁRIO, 2008; SANTANA; FORTUNA, 2012). Segundo a OMS, o uso de novos métodos invasivos para auxiliar no diagnóstico e em medidas terapêuticas representa um dos maiores desafios para a engenharia e controle de infecção em hospitais. Outro fator determinante é o tamanho e o propósito do hospital (ou seja, a escala e o tipo de atendimento prestado). Por exemplo, em hospitais de ensino, a taxa de infecções é alta. Na Inglaterra, Escócia, País de Gales e Irlanda, entre 1993 e 1994, pesquisadores revelaram que a taxa de infecção em hospitais foi de 9,0% e 11,2% em hospitais gerais e universitários, respectivamente (TIPPLE et al., 2003).

Estudos conduzidos pelo Centro de Controle e Prevenção de Doenças (CDC) dos EUA mostram que as infecções hospitalares prolongam a permanência dos pacientes no hospital em pelo menos 4 dias, com um custo adicional de USD 1.800,00 (CDC et al., 2001). No Brasil, as conclusões são similares. Um estudo descritivo realizado no Hospital Universitário João de Barros Barreto, em 2000, para avaliar e identificar o perfil epidemiológico das infecções hospitalares nas unidades cirúrgicas, de enfermagem e de terapia intensiva (UTI), reportou até 365 episódios de infecção hospitalar. As principais infecções foram pneumonia (19,5%), infecção do sítio cirúrgico (14,5%), infecção do trato urinário (14%) e infecção primária na corrente sanguínea (13,4%). Concluiu-se que a pneumonia representa a maior incidência de infecção nosocomial (RIBEIRO et al., 2002). A pneumonia também é a principal causa de hospitalizações e dias de internação em outras cidades brasileiras (MARTIN et al., 2006).

No momento da elaboração desta revisão, as preocupações com infecções hospitalares estavam concentradas na contaminação pelo coronavírus. Como mencionado anteriormente, os ocupantes dos hospitais variam desde indivíduos com perfeita saúde até aqueles imunossuprimidos, para os quais uma infecção viral pode representar risco de vida ou comprometer seriamente o tratamento. É importante, pois, entender apropriadamente o mecanismo de infecção de modo a se identificar as melhores estratégias para combatê-los. A Figura 9 mostra as principais formas de exposição viral, com foco na COVID-19.

Na Figura 9 é possível identificar que gotículas de aerossol contendo RNA viral ativo podem ter duas origens cientificamente comprovadas. A primeira delas, relacionada a ambientes públicos de alta rotatividade, e também a principal, está associada espirros e expirações que geram dispersão de partículas em forma de aerossol. Outra está associada a transmissão viral por aerossol gerado em banheiros.

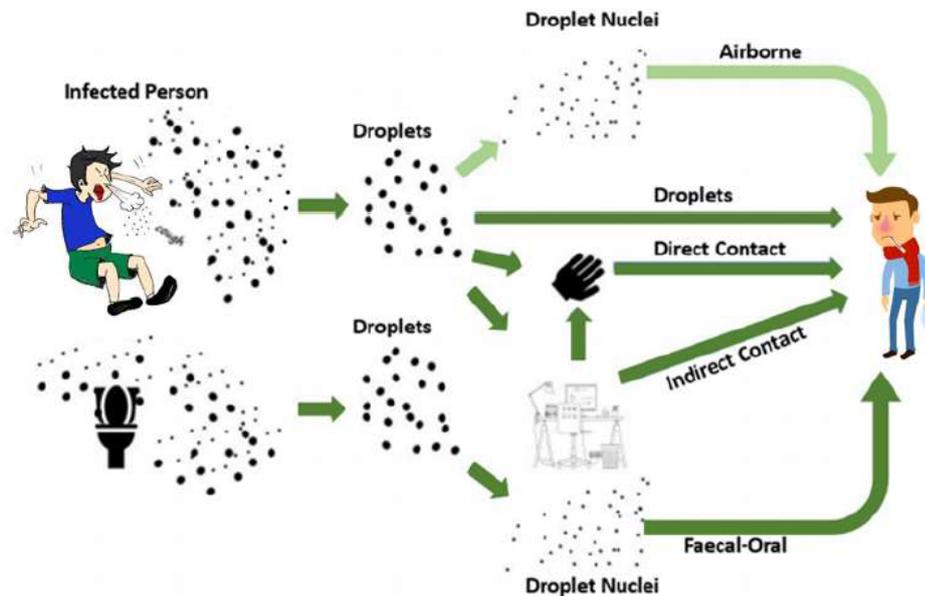


Figura 9: Mecanismos de exposição de gotículas da SARS-CoV-2 (cor verde-escuro). Cor verde claro: conhecido mecanismo de transmissão aérea da SARS-CoV-1 e de outras gripes. Provas específicas para a SARS-CoV-2 são incipientes. (SANTOS et al., 2020)

Ambas partem do princípio da dispersão de aerossol viral no ambiente. Partículas leves ficam dispersas no ar estagnado ou não renovado, ficam livres para o contato com as vias aéreas do hospedeiro até que o infectam. Esse mecanismo de transmissão está intimamente ligado a sistemas de climatização por condicionadores de ar (SANTOS et al., 2020).

As partículas de aerossol mais pesadas, quando em contato direto com as vias respiratórias do hospedeiro também possuem poder de infecção, porém por efeito de sua densidade, elas não ficam em estado de suspensão por muito tempo, o que gera uma baixa probabilidade de infecção. No caso de o hospedeiro estar no mesmo ambiente em que se encontra o infectado, essa situação se reverte e a probabilidade de infecção é ainda maior.

A forma mais conveniente para infecção através de partículas densas está no fenômeno de deposição superficial. Neste processo a partícula, dependendo da superfície, pode ficar ativa durante 2 ou 3 dias (DOREMALEN et al., 2020). Sendo transmitida ao hospedeiro através do contato direto com as mãos, que, por sua vez, são levadas aos olhos, boca ou nariz.

2.2.3 Características das Partículas de Aerossol SARS-CoV-2

Causado pelo patógeno coronavírus conhecido como SARS-CoV-2O o recentemente passado surto global de COVID-19, incitou um estado permanente de ameaça à saúde pública. A transmissão desse agente está associada à inalação de gotículas líquidas carregadas de

vírus por meio do contato próximo com pessoas ou superfícies contaminadas. No entanto, evidências sugerem que a transmissão através de aerossóis, ou seja, partículas transportadas pelo ar, tem se revelado uma via adicional, especialmente em locais de uso coletivo e em espaços confinados (LIU et al., 2020; CHIA et al., 2020).

De acordo com (LIU et al., 2020), foram observadas concentrações elevadas de partículas de aerossol de SARS-CoV-2 em banheiros de quartos de pacientes em quarentena, unidades de terapia intensiva (UTIs) e áreas frequentadas por profissionais de saúde, como vestiários e salas de retirada de equipamentos de proteção. Constatou-se que nos banheiros havia concentrações de partículas em suspensão no ar com diâmetro mínimo de $0,25 \mu\text{m}$, enquanto nas áreas de retirada de equipamentos de proteção, as concentrações mais altas foram de partículas com diâmetro entre $0,5$ e $1 \mu\text{m}$. Nas áreas comuns aos profissionais de saúde, foram observadas concentrações de partículas com diâmetro superior a $2,5 \mu\text{m}$, algumas em movimento dinâmico. Em algumas dessas áreas, mesmo as partículas depositadas foram capazes de entrar novamente em suspensão devido ao seu tamanho e à movimentação do ar no ambiente, destacando a importância do controle da circulação do ar para mitigar o efeito de suspensão das partículas no ambiente ocupado.

Além disso, (CHIA et al., 2020) observa partículas de tamanhos variados, entre 1 e $4 \mu\text{m}$ e acima de $4 \mu\text{m}$, testando positivo para a presença de SARS-CoV-2 em uma sala de isolamento para pacientes com infecções transmitidas pelo ar. As partículas inferiores a $1 \mu\text{m}$ testaram negativo para o RNA do vírus. A concentração total de vírus no ar variou de $1,84 \times 10^3$ a $3,38 \times 10^3$ RNA por m^3 de amostra de ar. Este estudo também destacou que a concentração de partículas depositadas no exaustor era relativamente alta em comparação com outras áreas da sala de isolamento, ressaltando a importância da sanitização para evitar ressuspensão.

Na mesma linha de raciocínio, (STADNYTSKYI et al., 2020) aponta que a transmissão pode ocorrer por meio de gotículas de fala de portadores assintomáticos do vírus. Em ambientes fechados com ar estagnado, as partículas podem permanecer visíveis por um período de 8 a 14 minutos, correspondendo a partículas com diâmetro de $4 \mu\text{m}$ ou mais, ou 12 a $21 \mu\text{m}$ antes de se desidratarem.

Quanto à estabilidade das partículas no ambiente, (CHIA et al., 2020) observa que o vírus apresenta alta estabilidade a 4°C , mas é sensível ao calor. Eles relatam que a uma temperatura de 70°C , o tempo necessário para inativar o vírus é reduzido para apenas 5 minutos.

No estudo realizado por (WANG et al., 2020a), foi observada uma relação entre o fator R e o aumento da temperatura e umidade. O fator R, também conhecido como número de reprodução efetivo, determina o potencial de propagação de um vírus em determinadas condições. Quando o fator R é superior a 1, cada indivíduo infectado transmite a doença para pelo menos uma outra pessoa; quando é inferior a 1, o número de infecções começa a diminuir, indicando uma desaceleração na propagação do vírus.

Segundo as descobertas de (WANG et al., 2020a), um aumento de 1°C na temperatura reduz o fator R aproximadamente entre 0,020 e 0,023, enquanto um aumento de 1% na umidade diminui essa variável de 0,0078 a 0,0080. Em uma mudança sazonal do inverno para o verão no hemisfério norte, considerando uma temperatura de 30°C e umidade de 25%, espera-se que o fator R diminua em 0,89.

O estudo também destaca que, sem medidas de proteção e prevenção para o vírus SARS-CoV-2, os valores do fator R variam entre 2,5 e 3, indicando um alto potencial de transmissão da doença. Essas descobertas ressaltam a importância de considerar fatores climáticos na formulação de estratégias de controle e prevenção da COVID-19.

De acordo com (ALLEN; MARR, 2020), é vital compreender que o vírus pode propagar-se através do aerossol criado pela fala, espirros, tosse, ou qualquer outra interação. A suspensão das partículas acontece em muitos tamanhos diferentes, o que torna impossível a utilização de alguns tipos de equipamento de proteção individual com filtros, tornando-se uma medida protetiva ineficiente. Este mesmo autor apresenta como medida principal o investimento em sistemas que aumentam a taxa de ventilação do ar exterior, modificando assim as características de temperatura e umidade relativa.

Nos ambientes hospitalares, todos os mecanismos de transmissão estão presentes. Geralmente esses ambientes apresentam alta concentração de partículas virais transmissíveis pelo ar, não apenas SARS-CoV-2 e outras famílias dos coronavírus, mas também outros agentes patogênicos, como o *myxovirus influenzae* (influenza) e o *streptococcus pneumoniae* (pneumonia). Por este motivo, sistemas de condicionamento de ar para climatização desses ambientes seguem normas mais específicas que consideram os hospitais como ambientes heterogêneos com diversas particularidades.

2.2.4 Normatização Brasileira para a Segurança de Estabelecimentos de Assistência a Saúde

Como já discutido, os estabelecimentos de assistência à saúde apresentam grande desafio aos projetistas e profissionais responsáveis por sua construção. Principalmente pela quantidade de requisitos que devem ser cumpridos para sua adequada construção e uso.

No Brasil, estes requisitos são definidos através de normas técnicas, resoluções, leis federais, portarias e outros documentos emitidos por autarquias do estado. Aqui serão destacadas duas normativas, a RDC 50 de 2002 da ANVISA e a ABNT NBR 7256 de 2022.

A Resolução da Diretoria Colegiada (RDC) nº 50/2002 da Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) é uma norma que estabelece diretrizes e requisitos técnicos para a planejamento, programação, elaboração de projetos físicos e implantação de estabelecimentos assistenciais de saúde no Brasil. Ela é fundamental na garantia da qualidade, segurança e eficácia dos serviços prestados nesses locais, visto que abrange aspectos relacionados à estrutura física, equipamentos, instalações e operações dos estabelecimentos de saúde.

Uma das áreas cruciais abordadas pela RDC 50 é a climatização e o controle de infecções por doenças transmissíveis pelo ar. A norma estabelece diretrizes específicas para garantir a adequada ventilação, filtragem do ar, controle de umidade e temperatura, visando proporcionar um ambiente seguro e saudável para pacientes, profissionais de saúde e demais usuários das instalações.

De acordo com a RDC 50, é fundamental que os sistemas de climatização sejam projetados e operados de forma a garantir a renovação adequada do ar, a remoção eficaz de contaminantes e a prevenção da disseminação de agentes infecciosos pelo ar. Além disso, a norma estabelece requisitos para a manutenção regular e higienização dos sistemas de HVAC, bem como para a seleção e uso adequado de filtros de ar, visando minimizar o risco de contaminação e garantir a qualidade do ar interior.

A (ABNT, 2022) é uma norma especializada nos requisitos mínimos para o projeto e execução de instalações de tratamento de ar em estabelecimentos assistenciais de saúde. Uma das principais características desta norma é fornecer instruções detalhadas considerando os requisitos de cada setor das unidades de saúde.

De acordo com esta norma, um dos objetivos essenciais das instalações é garantir a qualidade do ar adequada e, em particular, reduzir os riscos biológicos e químicos existentes no ar do ambiente a níveis compatíveis com a atividade desenvolvida nas diversas áreas. As instalações de tratamento de ar podem se tornar causa e fonte de contaminação, se não

forem corretamente projetadas, construídas, operadas e monitoradas, ou se não receberem os cuidados necessários de limpeza, higienização e manutenção.

Segundo a norma (ABNT, 2022) existem quatro níveis de classificação para ambientes de cuidados de saúde:

- **Nível 0.** Área onde o risco não excede aquele encontrado em ambientes de uso público e coletivo;
- **Nível 1.** Área onde foi constatado baixo risco de ocorrência de agravos à saúde relacionados à qualidade do ar, porém órgãos reguladores, organizações ou investigadores sugerem que o risco seja considerado;
- **Nível 2.** Área onde existem evidências de risco de ocorrência de agravos à saúde relacionados à qualidade do ar, de seus ocupantes ou de pacientes que utilizem produtos manipulados nestas áreas, baseadas em estudos experimentais, clínicos ou epidemiológicos;
- **Nível 3.** Área onde existem evidências de alto risco de ocorrência de agravos sérios à saúde relacionados à qualidade do ar, de seus ocupantes ou pacientes que utilizem insumos manipulados nestas áreas, baseadas em estudos experimentais, clínicos ou epidemiológicos..

Os ambientes podem ser caracterizados por uso e função. Essas informações definem as escolhas sobre o sistema de tratamento de ar e os parâmetros do ambiente a ser condicionado.

Os consultórios de pneumologia são classificados como nível de risco 1, ou seja, não oficialmente verificado, mas considerado. Assim, devem ser tratados como Ambiente Operacional (AO). Em termos gerais, os ambientes operacionais são ambientes de processos usados pelos profissionais de saúde que apresentam algum tipo de risco ou contaminação do operador ou dos insumos médicos, além de requererem condições especiais para funcionamento (EQ). As condições e os requisitos deste ambiente encontram-se na Tabela 5.

Tabela 5: Parâmetros de Projeto da ABNT NBR 7256(2022).

Ambiente	Tipo	Risco	Situação a Controlar	Pressão	Temperatura	Umidade
Sala de Exames	AO	1	EQ	Neutra	20,0°C a 24,0°C	Máx 60%

Para manter as condições definidas pela norma é sugerido que o ambiente siga modelos predefinidos conforme orientações para o sistema de condicionamento do ar. A norma apresenta alguns destes possíveis modelos, principalmente quando se trata de locais classificados como Ambiente Protetor (PE). Nesses casos, existe a necessidade de proteção dos ocupantes internos, o que caracteriza uma sala de pressão positiva (+5Pa), para que contaminantes não entrem no ambiente e infectem os seus ocupantes. Na Figura 10 é apresentado o modelo sugerido para ambiente protetor (PE), sem antecâmara e sem recirculação de ar, desenvolvido para tratamento de pacientes com cuidados específicos. Também existem situações onde a recirculação pode ser utilizada. Esses casos favorecem o uso de tecnologias de mitigação viral implementadas nos dutos de insuflamento, pois dessa forma haverá a desinfecção do ar insuflado Figura 11.

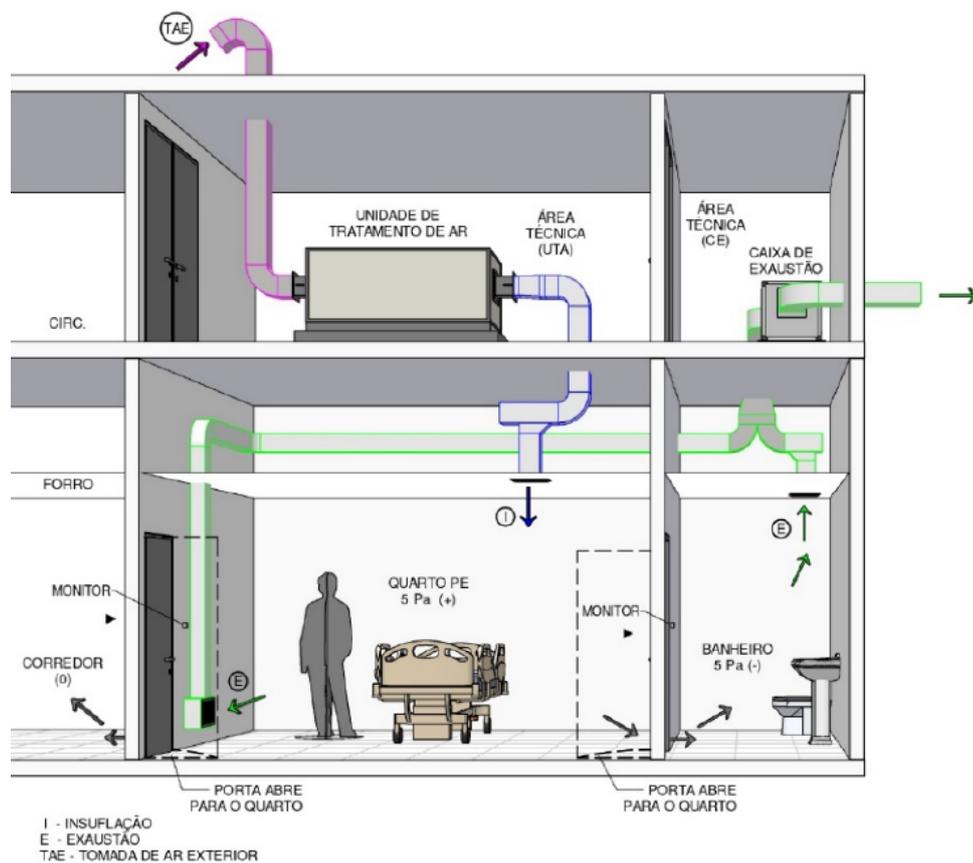


Figura 10: Ambiente Protetor, sem Antecâmara e sem Recirculação. (ABNT, 2022)

O sistema de condicionamento do ar na sala de pneumologia segue o modelo semelhante ao desenvolvido para ambiente protetor (PE), sem antecâmara, porém com recirculação de ar, ressaltando que a sala terá pressão positiva (atmosférica) e não haverá banheiro associado ao ambiente condicionado. Além disso, o duto de retorno é, propositivamente,

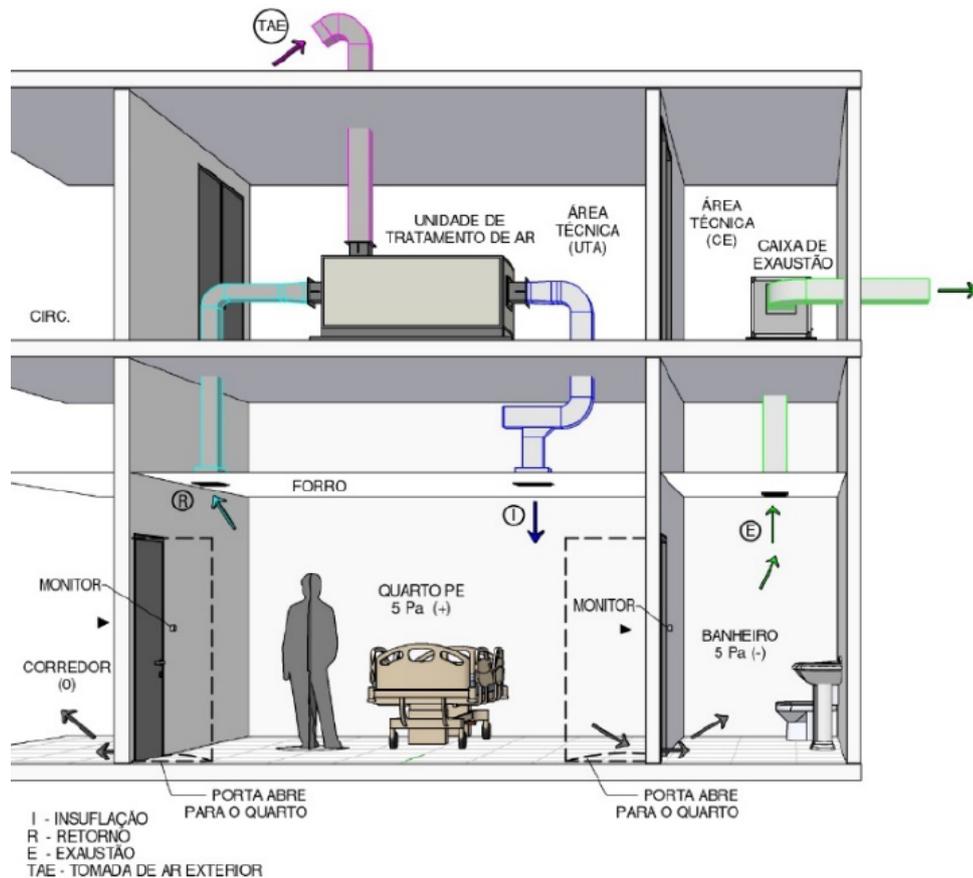


Figura 11: Ambiente Protetor, sem Antecâmara e com Recirculação. (ABNT, 2022)

posicionado na região inferior da sala. Uma abordagem fundamental da NBR 7256 (2022) está em considerar que o tratamento de ar deve ser considerado um complemento às demais medidas de controle de infecção hospitalar, que constem no âmbito da rotina operacional do Estabelecimento Assistencial de Saúde (EAS).

Uma das medidas de controle de infecção hospitalar apresentadas pela norma é a utilização dos sistemas de irradiação germicida ultravioleta. Este método é amplamente utilizado, em sistema de climatização para redução de patógenos. A escolha pelo uso deste tipo de sistema está associada à viabilidade de sua implementação, tempo de processo de desinfecção, investimento e restrições.

A norma ressalta que deve ser dada atenção na escolha de um método que preserve a saúde dos ocupantes nos ambientes, bem como a integridade e as propriedades dos materiais aplicados nas instalações. A decisão deve ser acompanhada de documentações científicas que comprovem o desempenho em relação à inativação potencial de microrganismos, o qual se constitui como um dos objetivos desta pesquisa.

2.3 Mitigação Viral com Sistema de Irradiação Germicida Ultravioleta

A radiação ultravioleta (UV) é uma forma energia eletromagnética com comprimentos de onda mais curtos do que a luz visível, variando aproximadamente de 10 nm a 400 nm. Essa faixa de comprimento de onda é dividida em três regiões: UV-A (400-315 nm), UV-B (315-280 nm) e UV-C (280-100 nm).

Tabela 6: Comprimento de onda dos tipos de raios UV (PHOSEON, 2021).

Tipo UV	Comprimento de onda Mínimo	Comprimento de onda Máximo
UV-A	315 nm	400 nm
UV-B	280 nm	315 nm
UV-C	100 nm	280 nm

A região UV-C é de particular interesse devido à sua capacidade de inativar microrganismos patogênicos. Com comprimento de onda entre 280 e 100 nm, os raios UV-C, são altamente energéticos e têm a capacidade de danificar o material genético dos microrganismos, como vírus, bactérias e fungos, impedindo sua replicação e causando sua inativação (MEMARZADEH; OLMSTED; BARTLEY, 2010). O ponto de máxima eficiência desta inativação ocorre com comprimentos de onda de aproximadamente 265 nm (DOSE, 2019). Acima disso, o efeito germicida decresce rapidamente, como pode ser visto na Figura 12.

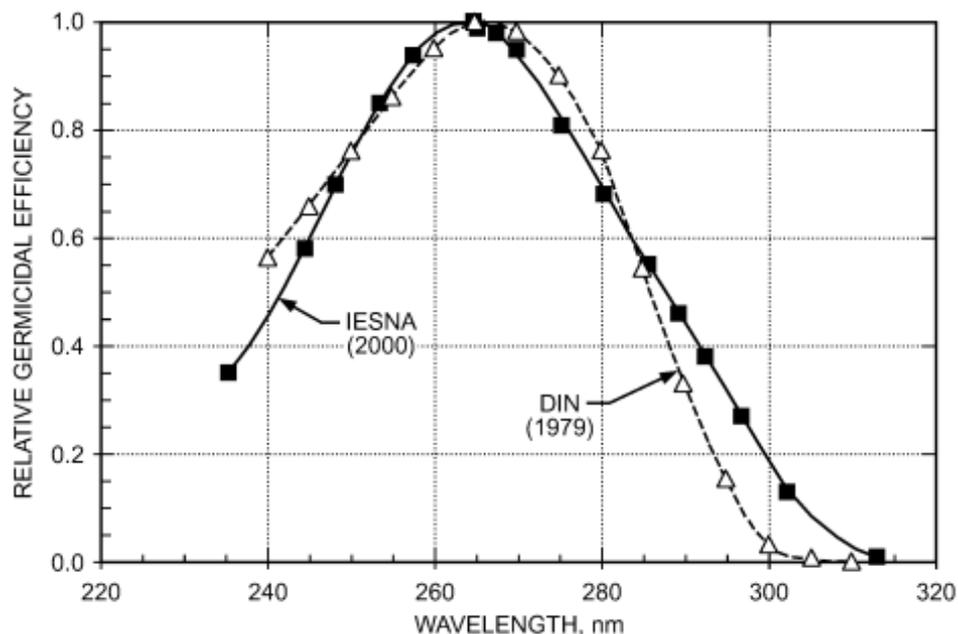


Figura 12: Função de Resposta Germicida Padrão em Relação ao Comprimento de Onda (DOSE, 2019).

Quando em exposição, a luz UV-C é absorvida pelos ácidos ribonucleico (RNA) e desoxirribonucleico (DNA) nas células e micróbios, induzindo alterações nas estruturas de DNA/RNA que incapacitam sua replicação. Fundamentalmente, a alteração ocorre nas bases nucleotídicas (derivados de pirimidina, timina e citosina, e derivados de purina, guanina e adenina) que absorvem a maior parte da energia UV responsável pela inativação celular (DIFFEY, 1991; SETLOW, 1966). Os fótons UV absorvidos podem danificar o DNA de várias formas, mas o dano mais significativo é a criação de dímeros de pirimidina, em que duas bases adjacentes de timina ou citosina ligam se entre si, em vez de se ligarem através da dupla hélice, como é habitual (DIFFEY, 1991). Em geral, a molécula de DNA com dímeros de pirimidina é incapaz de funcionar corretamente, resultando na incapacidade de replicação do organismo ou mesmo na sua morte (DIFFEY, 1991; MILLER et al., 1999; SETLOW, 1997; SETLOW; SETLOW, 1962). Um organismo que não se pode reproduzir já não é capaz de causar doenças.

A eficácia dos UVGI depende principalmente da dose de UV (D_{UV} , mJ/cm²) administrada aos microrganismos, conforme Equação 2.5.

$$D_{UV} = It \quad (2.5)$$

Em que I é a irradiância média em m.W/cm² e t é o tempo de exposição em segundos. Embora a Equação 2.5 pareça bastante simples, a sua aplicação pode ser complexa (por exemplo, ao calcular a dose recebida por um microrganismo que segue um caminho tortuoso através de um dispositivo com variabilidade espacial na irradiância). A dose é geralmente interpretada como a que ocorre numa única passagem através do dispositivo ou sistema. Embora o efeito da exposição repetida aos raios UV nos microrganismos arrastados no ar recirculado possa ser cumulativo, nesta equação, este efeito não foi quantificado.

A fração de sobrevivência S de uma população microbiana exposta à energia UV-C é uma função exponencial da dose como pode ser visto na Equação 2.6:

$$S = e^{-kD_{UV}} \quad (2.6)$$

Onde k é uma constante de velocidade de inativação dependente da espécie, em cm²/mJ. A

taxa de inativação de passagem única resultante η é o complemento de S , o que resulta na fração de inativação encontrada pela Equação 2.7:

$$\eta = 1 - S \quad (2.7)$$

Os valores da constante de velocidade de inativação (k) dependem da espécie e relacionam a suscetibilidade de uma determinada população de microrganismos à radiação UV. Estas suscetibilidades podem ser atribuídas para diferentes espécimes. Na Figura 13 identificam-se os grupos de espécimes mais suscetíveis a inativação por UV-C.

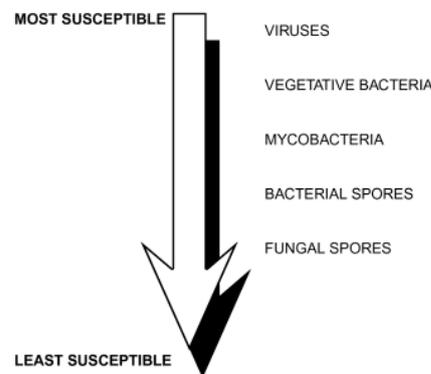


Figura 13: Ranking de Suscetibilidade por Grupo de Microrganismo a Inativação por UV-C .(DOSE, 2019)

Percebe-se que os vírus e as bactérias vegetativas são geralmente os mais suscetíveis à inativação por UV, seguidos das micobactérias, dos esporos bacterianos e, por último, dos esporos de fungos. Dentro de cada grupo, uma espécie individual pode ser significativamente mais resistente ou suscetível. Pelo que esta classificação deve ser utilizada apenas como orientação geral. As bactérias e os fungos formadores de esporos também têm formas vegetativas, que são marcadamente mais suscetíveis à inativação do que as formas de esporos. Os vírus são um caso à parte. Como grupo, a sua suscetibilidade à inativação é ainda mais ampla do que a das bactérias ou dos fungos. Para SARS-CoV-2, por exemplo, estima-se que a constante de velocidade de inativação seja de $0,16 \text{ cm}^2/\text{m.J}$ (KOWALSKI, 2010; STORM et al., 2020).

Esses dados foram úteis no contexto da pandemia de COVID-19, provocando aumento na demanda por tecnologias de desinfecção UV. De acordo com (KIM; WANG; ZHANG, 2021), "a irradiação UV tem sido reconhecida como uma ferramenta eficaz na redução da carga viral em ambientes fechados, ajudando a mitigar o risco de transmissão do coronavírus".

Essa crescente conscientização sobre a importância da desinfecção UV tem impulsionado a pesquisa e o desenvolvimento de sistemas UV mais eficientes e acessíveis (PESSOA et al., 2021; SANTOS et al., 2020).

2.3.1 Tecnologias UVGI para Controle do Ar

A utilização de dispositivos de irradiação germicida ultravioleta (UVGI) tem sido amplamente reconhecida como uma estratégia eficaz na desinfecção de ambientes contra uma variedade de microrganismos patogênicos. Estes dispositivos são capazes de inativar bactérias, vírus, fungos e outros agentes infecciosos, contribuindo significativamente para a redução do risco de transmissão de doenças infecciosas (SMITH; WANG; JOHNSON, 2019).

Um dos tipos mais comuns de dispositivos UVGI e altamente eficazes na inativação de microrganismo são as lâmpadas de baixa pressão de mercúrio, que emitem radiação UV-C de onda curta. Além disso, essas lâmpadas são frequentemente empregadas em ambientes hospitalares para desinfecção de superfícies e equipamentos médicos (JONES; BROWN, 2020).

Estes dispositivos, por padrão comercial, geralmente emitem UV-C em comprimento de 253,7 nm. Quando utilizada para desinfecção do ar, esta tecnologia pode ser instalada dentro do duto em unidade de tratamento de ar com o objetivo de controlar bioaerossóis no ar recirculado (Figura 14).

Outra forma de uso desses dispositivos é em equipamentos móveis, ou seja, que podem ser deslocados dentro do ambiente onde a desinfecção é prevista. Em alguns casos esses dispositivos podem ser instalados em sistemas robóticos que executam percursos programados de forma automática dentro do ambiente (Figura 15).

Nesses equipamentos UVGI também é possível utilizar outro tipo de dispositivo de desinfecção, que são os LEDs UV. Estes dispositivos oferecem vantagens significativas em termos de eficiência energética e controle preciso da emissão de UV. Os LEDs UV têm sido cada vez mais adotados em sistemas de desinfecção de ar e água devido à sua longa vida útil e baixo consumo de energia (KIM; WANG; ZHANG, 2021). Esses dispositivos são capazes de fornecer desinfecção contínua em ambientes comerciais, residenciais e industriais, com menor impacto ambiental.

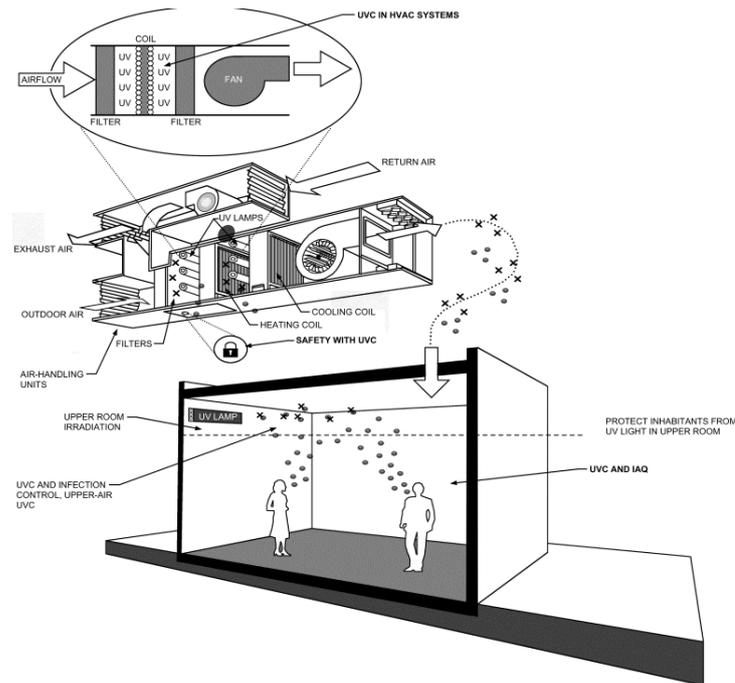


Figura 14: Aplicação Potencial do UV-C para Controle de Microorganismos no Ar. (DOSE, 2019)



Figura 15: Dispositivo Robô Biolux 360 Plus - Tecnologia UVGI.

2.3.2 Estudos Sobre Utilização de Equipamentos UVGI em Sistemas HVAC

A aplicação de sistemas UVGI em equipamentos de HVAC tem a finalidade de diminuir o potencial de transmissão de patógenos através dos ambientes com condicionamento de ar. (KHANKARI; BAHNFLETH, 2023) demonstra que a dinâmica dos fluidos computacional é uma importante ferramenta para avaliar o uso dos sistemas UVGI com essa finalidade.

A utilização da Dinâmica dos Fluidos Computacional (DFC) é vital para prever de forma adequada o comportamento do projeto de climatização em relação à propagação viral, porém ela demanda modelos matemáticos de previsão da intensidade da radiação espacial. Estudos como o de (WU et al., 2011) apresentam esse fundamento, e propõem melhorias para os modelos.

Um caso prático do DFC para análise da propagação viral encontra-se em (PARK; MISTRICK; RIM, 2022). Este estudo foi aplicado em ambiente de sala de aulas, que possuem alta rotatividade de ocupantes. Observou-se que o funcionamento de um sistema UVGI pode desinfetar acentuadamente os vírus transportados pelo ar em até 96%, que equivale, em eficácia, a aumentar a taxa de ventilação mais de cinco vezes.

Outros importantes artigos podem ser destacados, porém, de acordo com (CATTAI; D'ORAZIO; SBARDELLA, 2023), o cenário ainda é pouco quantitativo. Ou seja, poucos artigos investigam quantitativamente os efeitos do UVGI sobre o ambiente.

2.3.3 Sistematização da revisão bibliográfica sobre UVGI/HVAC

Nesta tese, o autor realizou pesquisas na base de dados Scopus sobre o uso de sistemas UVGI em sistemas HVAC considerando alguns critérios de inclusão e exclusão, como apresentados a seguir.

- **Critérios de Inclusão:** Os documentos devem incluir fontes de UVC e/ou um sistema HVAC, deve ser avaliada a eficácia germicida do dispositivo e/ou a configuração da instalação, a investigação deve examinar os efeitos da radiação ultravioleta como parte do processo de melhoria da qualidade do ar ou do tratamento e manutenção do sistema HVAC.
- **Critérios de Exclusão:** Os artigos tratam da desinfecção da água e da superfície, o objetivo é avaliar os efeitos nos seres humanos, os estudos envolvem agentes patogênicos que foram previamente cultivados em laboratório e expostos diretamente à irradiação de lâmpadas e a língua não é o inglês.

Sob esse protocolo, foram identificados 800 artigos. Depois de aplicados os critérios de inclusão e exclusão listados anteriormente, apenas 65 estudos foram considerados relevantes. Destes, 19 trabalhos empregam DFC, porém apenas 1 em ambiente hospitalar,

especificamente (KRISHNAMOORTHY; TANDE, 2016). Nesse estudo foram realizadas avaliações experimentais baseadas em modelagem do emprego de revestimentos de parede refletivos para melhorar a eficácia da irradiação germicida ultravioleta em quartos hospitalares desocupados. O estudo empregou o método de volumes finitos para simular o fluxo radiativo dentro do ambiente, e provou que a radiação incidente média em volume aumentou 60% na presença de paredes refletivas de UV. Produzindo um ambiente mais seguro contra a infecção pelos agentes patogênicos (KRISHNAMOORTHY; TANDE, 2016).

Quando considerada a esfera geográfica, dentro dos critérios específicos do autor (CATTAI; D'ORAZIO; SBARDELLA, 2023), apenas 1 pesquisa foi realizada no Brasil, a saber (SOUZA et al., 2022). Este trabalho não utilizou ferramentas DFC, foi uma pesquisa experimental, que analisou o potencial de desinfecção do uso de 6 lâmpadas UV-C dispostas transversalmente ao fluxo de ar, instaladas em duto de insuflamento.

Essa pesquisa foi realizada na Unidade de Terapia Intensiva (UTI) do Hospital Universitário de Lagarto, Universidade Federal de Sergipe, e realizados testes microbiológicos para verificar o efeito germicida, analisando a viabilidade dos microrganismos circulantes no ambiente. Segundo o autor os resultados indicaram elevada eficácia antibacteriana. Porém, não foi realizada nenhuma análise viral para realização dos testes reais por restrição de segurança, ou seja, o estudo não fornece informações relacionadas a eficácia microbicida viral, demonstrando como o uso de simulações computacionais pode ser uma solução para obter este tipo de resultado (SOUZA et al., 2022).

De maneira geral, os artigos ratificam a eficácia de desinfecção a partir do uso da tecnologia UVGI aplicada a sistemas HVAC, porém alguns autores como (MEMARZADEH; OLMSTED; BARTLEY, 2010), sugerem a aplicação adicional de outras medidas germicidas (Figura 16).

Contudo, embora se perceba a importância da desinfecção para a saúde e bem estar dos ocupantes, nos trabalhos apresentados não se identifica uma avaliação hidrodinâmica do ambiente, considerando os critérios de conforto térmico. Também não se aborda aspectos normativos, que são aplicados em carácter compulsório. Quando se faz uma análise em escala nacional, verifica-se a carência de informações relevantes que tornem robusta a tomada de decisão sobre a viabilidade da implantação de sistemas de desinfecção UVGI em hospitais públicos. Uma das principais ferramentas que podem auxiliar neste nível de análise é a Dinâmica dos Fluidos Computacional.

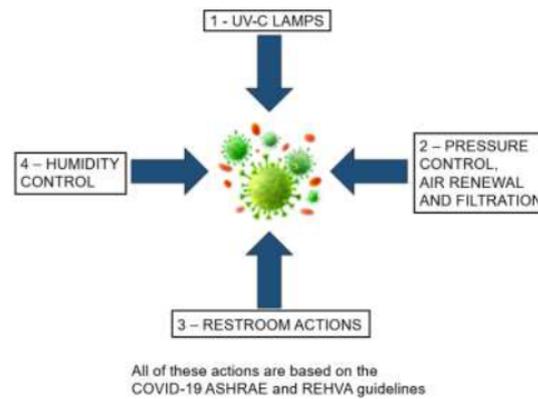


Figura 16: Diretrizes aplicadas às lâmpadas UV-C, filtragem de controle de pressão, ações de quartos de descanso e controle da umidade para reduzir a doença coronavírus (COVID-19) em ambientes de UTI e hospitalares, de acordo com a ASHRAE (SANTOS et al., 2020)

2.4 Fundamentos da Mecânica dos Fluidos

A mecânica dos fluidos, é um campo crucial da física aplicada, esta ciência dedica-se ao estudo do comportamento dos fluidos. Essas substâncias são simplificadaamente caracterizadas pela sua capacidade de fluir, porém são definidas cientificamente como substâncias que se deformam continuamente na aplicação de forças externas cisalhantes (MUNSON et al., 2009).

2.4.1 Formulações das Leis Básicas da Mecânica dos Fluidos

A mecânica dos fluidos se baseia em um conjunto de equações fundamentais que descrevem o comportamento dos fluidos em movimento. Uma das equações mais importantes é a equação de conservação da massa, também conhecida como equação da continuidade. Essa equação estabelece que a taxa de variação da massa de fluido em um volume de controle é igual à taxa líquida de entrada de massa menos a taxa líquida de saída de massa, refletindo assim o princípio da conservação da massa (CENGEL; CIMBALA, 2010).

Além da equação de conservação da massa, temos as equações do momento linear, que são expressas pelas três componentes do teorema do momento linear de Newton na forma integral ou diferencial. Estas equações descrevem como as forças aplicadas em um fluido resultam em acelerações e mudanças na velocidade do fluido ao longo do tempo e do espaço (CENGEL; CIMBALA, 2010).

Outra equação fundamental é a equação de conservação da energia, que é uma expressão da primeira lei da termodinâmica. Ela descreve como a energia térmica e mecânica

é transferida e transformada dentro de um sistema fluido, levando em conta o trabalho realizado pelo fluido, o calor transferido para ou do fluido e a variação da energia interna do fluido (WHITE, 2011).

Segundo (FOX; MCDONALD; PRITCHARD, 2018), essas leis básicas podem ser formuladas em termos de volume de controle finitos ou infinitesimais. Em volumes de controle finitos, as equações terão formulações integrais, neste caso os métodos analíticos se tornam mais práticos, pois não há necessidade de detalhe na informação referente ao escoamento. Nos casos de volumes de controle infinitesimais as formulações serão em equações diferenciais. Neste caso haverá uma determinação detalhada do comportamento do escoamento ponto a ponto apresentando taxas e gradientes associados as diversas propriedades do escoamento.

Ainda de acordo com o autor, as equações de Navier-Stokes são uma das principais equações utilizadas na formulação diferencial, oferecendo uma descrição detalhada do comportamento dos fluidos em movimento. Ela é expressa por um conjunto de equações diferenciais parciais que descrevem a conservação da massa e do momento linear em um fluido em movimento. Como pode ser visto das equação 2.8 e a equação 2.10 a seguir (GONZALEZ; STUART, 2017).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} [\rho u_j] = 0, \quad j = 1, 2, 3 \quad (2.8)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} [\rho u_i u_j + p \delta_{ij} - \tau_{ji}] = 0, \quad i = 1, 2, 3 \quad (2.9)$$

Estas equações encontram-se em notação de Einstein, que consiste em omitir o símbolo de somatório e interpretar índices que se repetem uma vez em um mesmo termo como indicador desse somatório (SCHUTZ, 1985).

A equação 2.8 é a equação da conservação da massa, o primeiro termo refere-se a derivada parcial da massa específica em função do tempo ($\frac{\partial \rho}{\partial t}$), onde ρ é a massa específica do fluido. o segundo termo descreve a convergência ou divergência do fluxo de massa através das fronteiras do volume de controle, onde x_j representa as direções cartesianas em que $j = 1$ representa a direção x , $j = 2$ a direção y e $j = 3$ a direção z . De forma semelhante u_j representa a componente da velocidade nas direções cartesianas (GONZALEZ; STUART,

2017).

A equação 2.9 representa a equação da conservação da quantidade de movimento linear, o primeiro termo ($\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i)$) representa a variação temporal da quantidade de movimento, sendo u_i as componentes da velocidade nas direções cartesianas. O segundo termo tem três conotações, $\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j)$ descreve a convolução das componentes da velocidade ($u_i u_j$) com a massa específica (ρ), $(\frac{\partial}{\partial x_j}(p \delta_{ij}))$ representa as forças de pressão (p), em que δ_{ij} é o delta de Kronecker, por fim $(\frac{\partial}{\partial x_j}(-\tau_{ji}))$ descreve a influencia das tensões cisalhantes gerados pelos efeitos viscosos (GONZALEZ; STUART, 2017).

Como já apresentado, outra equação é a da conservação da energia, como pode ser visto em 2.10.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho e_0) + \frac{\partial}{\partial x_j}[\rho u_j e_0 + u_j p + q_j - u_i \tau_{ij}] = 0 \quad (2.10)$$

Nesta equação têm-se os efeitos além das variáveis predefinidas, da energia específica e_0 e do fluxo de calor q_j que interage com o volume de controle através de suas fronteiras (GONZALEZ; STUART, 2017).

Quando resolvidas em conjunto as equações da conservação é possível obter uma compreensão abrangente do comportamento do fluido em um determinado volume de controle, incluindo seu padrão de fluxo, distribuição de velocidade e como as forças e transferências de energia influenciam seu comportamento.

A resolução analítica das equações de conservação em problemas de mecânica dos fluidos é frequentemente inviável, devido à complexidade intrínseca dessas equações e às condições variáveis encontradas em situações reais. Como destacado por (PANTON, 2013), as equações de Navier-Stokes, fundamentais na descrição do movimento dos fluidos, são não lineares, o que torna sua solução analítica extremamente desafiadora em muitos casos. A natureza não linear dessas equações implica em interações complexas entre as variáveis envolvidas, como velocidade e pressão (acoplamentos).

Além disso, problemas práticos de mecânica dos fluidos frequentemente apresentam condições de contorno complexas que complicam ainda mais a resolução analítica. Geometrias irregulares, superfícies móveis e interações fluido-estrutura são exemplos de condições de contorno que podem tornar a solução analítica impraticável. Como destacado por (KUNDU; COHEN, 2004), a inclusão dessas condições de contorno nas soluções analíticas

pode ser extremamente desafiadora.

Outro fator que contribui para a impraticabilidade da resolução analítica é que em muitas situações, os fluidos estão sujeitos a fluxos turbulentos, nos quais o comportamento do fluido é altamente caótico e imprevisível. A modelagem analítica de fluxos turbulentos é extremamente desafiadora devido à complexidade dos fenômenos envolvidos. De acordo com (POPE, 2000), a turbulência representa um dos maiores desafios na resolução analítica das equações de conservação.

Por fim, em certos casos, as propriedades dos fluidos, como densidade e viscosidade, podem variar significativamente com a temperatura, pressão ou composição química. A inclusão dessas variações nas soluções analíticas pode aumentar ainda mais a complexidade dos problemas. Como mencionado por (CENGEL; CIMBALA, 2010), a variação das propriedades dos fluidos pode representar um desafio adicional na resolução analítica das equações de conservação.

Diante dessas complexidades, é comum recorrer a métodos numéricos, como a simulação computacional de fluidos (DFC), para resolver as equações de conservação em problemas reais de mecânica dos fluidos. Esses métodos permitem obter soluções aproximadas para uma ampla variedade de problemas, proporcionando *insights* valiosos para o projeto e a análise de sistemas fluidodinâmicos.

2.4.2 Princípios da Mecânica dos Fluidos Computacional

A Mecânica dos Fluidos Computacional (DFC) é uma ciência interdisciplinar que combina princípios da física, matemática e ciência da computação para estudar o comportamento dos fluidos utilizando métodos numéricos e algoritmos computacionais. Segundo (JR., 2016), ela envolve a análise e a resolução de equações diferenciais que descrevem o movimento dos fluidos, como as equações de Navier-Stokes. Essa abordagem permite simular e visualizar fenômenos complexos, como o escoamento de ar em ambientes internos e externos.

No estudo da circulação de ar nos ambientes, a Mecânica dos Fluidos Computacional pode ser considerada uma poderosa ferramenta. Conforme destacado por Tannehill, (TANNEHILL; JR.; PLETCHER, 1997), o entendimento dos padrões de fluxo de ar dentro de edifícios é crucial para otimizar o conforto térmico, a qualidade do ar interno e a eficiência energética dos sistemas de climatização. Além disso, a DFC possibilita a análise de diferentes cenários e condições operacionais, auxiliando na concepção e no projeto de sistemas de ventilação e

condicionamento de ar mais eficazes e sustentáveis.

Para compreender a aplicação da computação numérica na Mecânica dos Fluidos, é necessário primeiro dominar as definições básicas dessa disciplina. Isso inclui conceitos fundamentais associados ao campo de escoamento, bem como as equações governantes que descrevem seu comportamento. Conforme salientado por (FERZIGER; PERIC, 2002), uma compreensão sólida desses princípios é essencial para formular modelos matemáticos apropriados e implementar algoritmos eficazes de simulação computacional. Portanto, a integração entre teoria e prática é crucial para o sucesso da análise DFC em aplicações práticas.

2.4.3 Dinâmica dos Fluidos Computacional na Engenharia Hospitalar

Segundo (MALISKA, 2017) o uso de técnicas numéricas para a solução de problemas complexos da engenharia e da física é hoje uma realidade, graças ao vertiginoso desenvolvimento de computadores de alto desempenho e de grande capacidade de armazenamento. Ainda de acordo com o autor, o engenheiro projetista tem à disposição três ferramentas para desenvolver o seu projeto e analisar o problema. São eles: os métodos analíticos, os métodos numéricos (experimentação numérica) e a experimentação em laboratório.

Os métodos analíticos e os métodos numéricos formam a classe dos métodos teóricos, pois ambos objetivam resolver as equações diferenciais que formam o modelo matemático. A diferença prática entre eles está apenas na complexidade das equações que cada método pode atacar. Tendo como base o universo dos problemas complexos de engenharia, os métodos analíticos são aplicáveis apenas a problemas cujas hipóteses simplificativas desviam-nos demasiadamente do fenômeno físico real. Além disso, são aplicados, normalmente, a geometrias simples e a condições de contorno também simples. Obviamente, as soluções analíticas não devem ser descartadas, e uma de suas importantes aplicações é validar casos limites de modelos numéricos e auxiliar no desenvolvimento de métodos numéricos mais robustos. Uma vantagem significativa é a obtenção da solução em forma fechada, requerendo baixíssimos tempos de computação. (MALISKA, 2017)

Com relação à experimentação em laboratório, sua grande vantagem é o fato de lidar com a configuração real. Ela é, entretanto, de altíssimo custo, e muitas vezes não pode ser realizada por questões de segurança. Na ausência de modelos matemáticos estabelecidos e em geometrias extremamente complexas, ela é, muitas vezes, a única alternativa disponível

ao projetista.

A experimentação numérica (simulação numérica), por sua vez, praticamente não apresenta restrições, podendo resolver problemas complexos com condições de contorno genéricas, definidos em geometrias também complexas e apresentando resultados com uma rapidez muito grande. O tempo e o custo do projeto de um novo equipamento podem ser sensivelmente reduzidos com o uso da simulação numérica. Atualmente, as ferramentas de DFC começam a ser integradas com outras ferramentas numéricas, criando um ambiente de trabalho interativo, em que se chega praticamente ao projeto final do equipamento através de computadores, deixando para o laboratório as experiências finais de ajuste e teste do equipamento (MALISKA, 2017). Por exemplo, quando o modelo matemático representativo do fenômeno já é conhecido e validado, a experimentação de laboratório torna-se menos frequente e dispendiosa uma vez que os computadores e os métodos numéricos podem resolver tal modelo matemático em tempo e custo muito mais baixos.

O método de experimentação numérica através da dinâmica dos fluidos computacional se tornou uma poderosa ferramenta para compreensão dos elementos subjacentes à propagação da COVID-19. Várias pesquisas eclodiram entre 2020 e 2022, em meio às incertezas relacionadas à saúde e segurança dos profissionais pesquisadores sobre a infecção viral por meio de propagação do SARS-COV-2, e a grande necessidade de conhecimento sobre o poder de infecção em ambiente climatizados públicos, principalmente hospitais.

(BOUROUIBA, 2020) destacou em sua pesquisa que embora as medidas de isolamento social fossem críticas na época da pandemia, era surpreendente que o entendimento das rotas de transmissão hospedeiro-para-hospedeiro em doenças respiratórias tivesse sido baseado em um modelo de transmissão desenvolvido na década de 1930. Em seu artigo, o autor, afirmava que a implementação de recomendações em matéria de saúde pública com base em modelos antigos poderia limitar a eficácia das intervenções. Além disso, o autor ressaltou que as exalações advindas de espirros, tosses e até mesmo da fala não consistem apenas de gotículas mucosalivares que seguem trajetórias de emissão semibalísticas de curto alcance, mas de nuvens de gás turbulento multifásico que entra no ar ambiente e transporta gotas de diferentes tamanhos em forma de aerossol. Com base na fisiologia e condições do ambiente (temperatura, umidade e fluxo de ar) as gotículas patogênicas de todos os tamanhos podem viajar de 7 a 8 metros, o que tornam obsoletas as medidas de prevenção até então estipuladas e estipuladas de distanciamento social de 1 a 2 metros recomendada pela Organização Mundial

da Saúde. Desta forma, recomenda-se fortemente a utilização de modelagem matemática de simulação e escoamento para a propagação do SARS-CoV-2 para uma melhor escolha do método preventivo. A Figura 23 apresenta um modelo de escoamento multifásico e turbulento de um espirro de um ser humano.

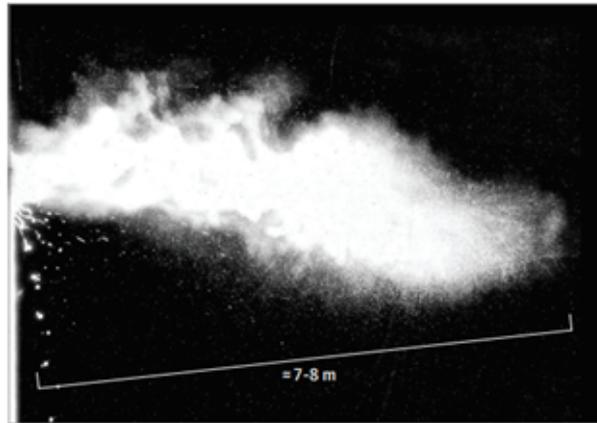


Figura 17: Nuvem de gás turbulenta multifásica produzida por um espirro humano (BOUROUBA, 2020)

Para (VUORINEN et al., 2020) a utilização de modelagem computacional através de Dinâmica dos Fluidos Computacional é fundamental para compreender a dinâmica de propagação da partícula de SARS-CoV-2 em forma de aerossol em ambientes genéricos. Em sua simulação com propagação de partículas com diâmetro inferior a $20 \mu\text{m}$, utilizando o método de Monte Carlo, o autor afirma que, dependendo da situação, uma pessoa pode ficar exposta ao vírus pelo tempo de até 1 hora, inalando o aerossol que contém o RNA viral ativo. Na Figura 18 está a tendência de propagação do aerossol considerando fluxo turbulento de ar.

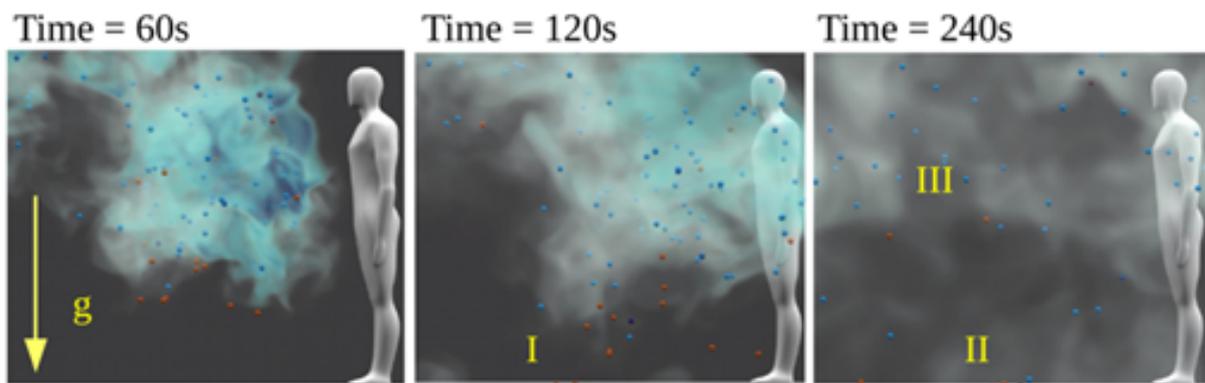


Figura 18: Ilustração da sedimentação de partículas e fluxo turbulento com uma velocidade de $0,02 \text{ m/s}$ (VUORINEN et al., 2020)

(AL-BAGHDADI, 2021) apresenta, através de modelagem com DFC, que o transporte de partículas de aerossol viral, em forma de pequenas gotículas suspensas no ar, com condi-

onamento de ar pode aumentar a chance de espalhamento do SARS-COV-2. Assim, frequentar ambientes climatizados aumenta a probabilidade de infecção por COVID-19. Além disso, o estudo revela uma preocupação pelo fato de estes sistemas proporcionarem a recirculação do agente patológico dentro do ambiente, uniformizando a concentração viral e tornando o ambiente extremamente nocivo.

Em (ALREBI et al., 2022) é possível identificar a preocupação com a forma do design do departamento de emergência de um hospital universitário. Neste trabalho, o sistema de climatização central, utilizando dutos, mostrou através de avaliação utilizando DFC, que várias áreas poderiam ser consideradas susceptíveis ao espalhamento do vírus, deixando evidente a necessidade real de um sistema de renovação e filtração do ar insuflado.

Nesta mesma ideia, (ALVES et al., 2021) mostrou através de simulação DFC que a utilização de um sistema de climatização tipo *split hi-wall* em uma sala de pneumologia de um hospital universitário, também proporciona um ambiente susceptível a infecções por COVID-19, uma vez que existem regiões dentro da sala em que a circulação do ar não é totalmente desenvolvida, ou seja, a velocidade do ar é baixa e, portanto, desfavorece a renovação. Por consequência o vírus pode passar mais tempo dentro do ambiente aguardando para infectar um hospedeiro. A Figura 19 mostra regiões na coloração azul que apresentam esse gradiente de velocidade na ordem de 0,006 m/s.

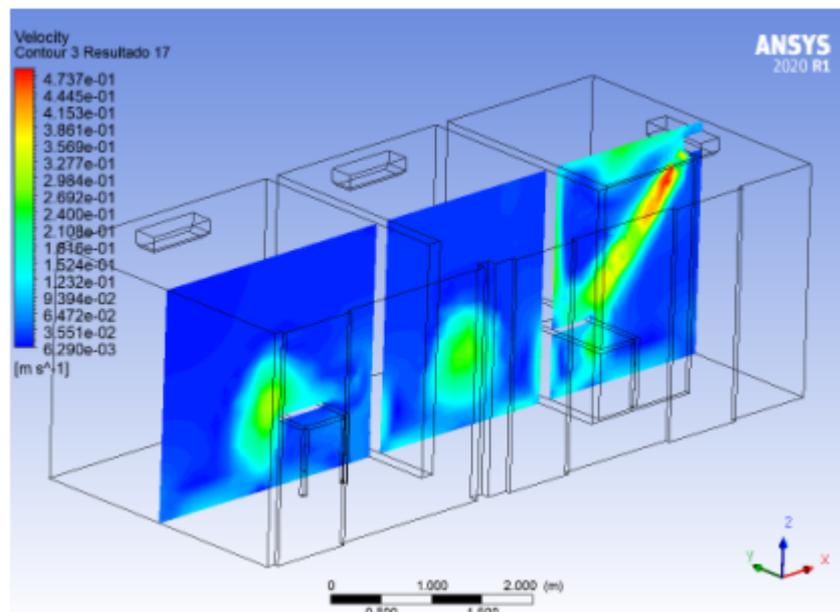


Figura 19: Perfis de velocidade com velocidade de entrada de 0,75 m/s (ALVES et al., 2021)

Em outro contexto também existem pesquisas que avaliam, através de DFC, a mu-

dança no sistema de climatização como forma de combate à infecção por COVID-19, como a de (BARBOSA; BRUM, 2021) e (REN; ZHU; CAO, 2022). Em ambas as pesquisas, a comparação está associada à técnica de ventilação de ambientes climatizados. (BARBOSA; BRUM, 2021) mostra que a técnica de ventilação por deslocamento (DV) é mais segura com relação àquela de ventilação mista convencional (MV), porém a ventilação por deslocamento não é usualmente praticada, tornando-se uma solução possível, mas não usual. Já (REN; ZHU; CAO, 2022), realizaram uma comparação abrangente entre as técnicas de ventilação mista (MV), ventilação por zona (ZV), ventilação do estrato (SV) e ventilação por deslocamento (DV). Para este, a técnica que proporcionou menor risco de infecção foi a ventilação do estrato (SV). Porém, esta mesma técnica ainda é pouco utilizada no Brasil e, portanto, se enquadra no mesmo problema de praticidade observado no trabalho anterior. A Figura 20 apresenta esquematicamente como são os modelos de ventilação. Nos ambientes hospitalares brasileiros, destaca-se o modelo de ventilação por zona (ZV).

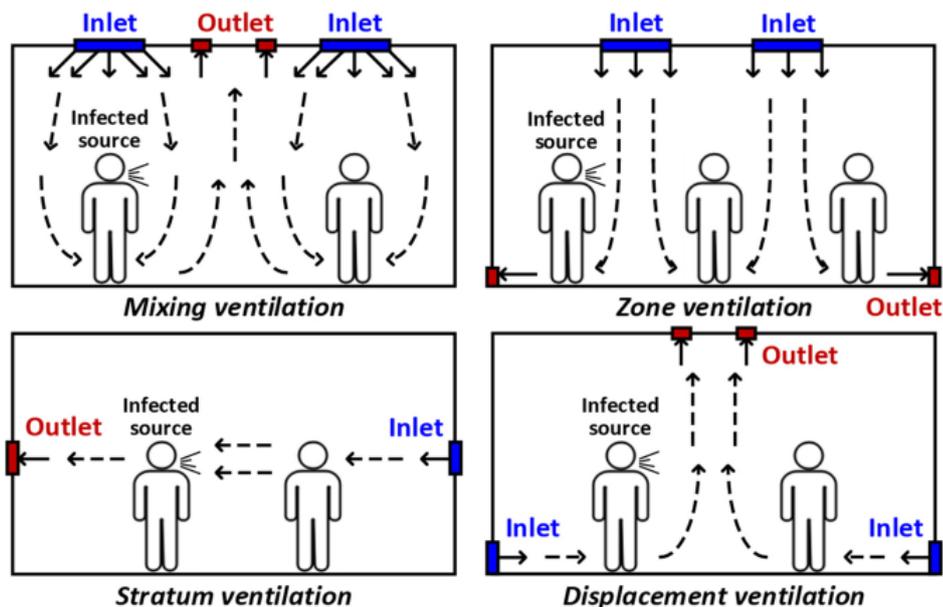


Figura 20: Mapa de esboços de diferentes modos de ventilação (REN; ZHU; CAO, 2022)

Para (MARIAM et al., 2021), a preocupação não foi relativa à área de infecção ou a técnica de ventilação, mas aos ocupantes e suas interações, focando apenas na infecção por via respiratória através de dispersão no ar de partículas expelidas de diferentes formas como: tosse, espirros, fala normal e fala em alto tom. Neste trabalho, com o auxílio de DFC, observou-se que apenas a regra de distanciamento seguro em ambientes internos torna-se ineficaz para a propagação viral.

Nesta mesma temática, de acordo com (LÓPEZ-REBOLLAR et al., 2021), a utilização

das máscaras de proteção respiratória pode ser efetiva para reduzir o risco de contágio pelo espalhamento viral em lugares públicos, porém a falta de selo hermético com o rosto torna a proteção deficiente sem uma medida adicional de segurança, principalmente em ambientes com baixa ventilação. Esse mesmo estudo propõe, através de simulação DFC, uma nova tecnologia de máscara que promove maior eficiência de filtração nessas situações (Figura 21).

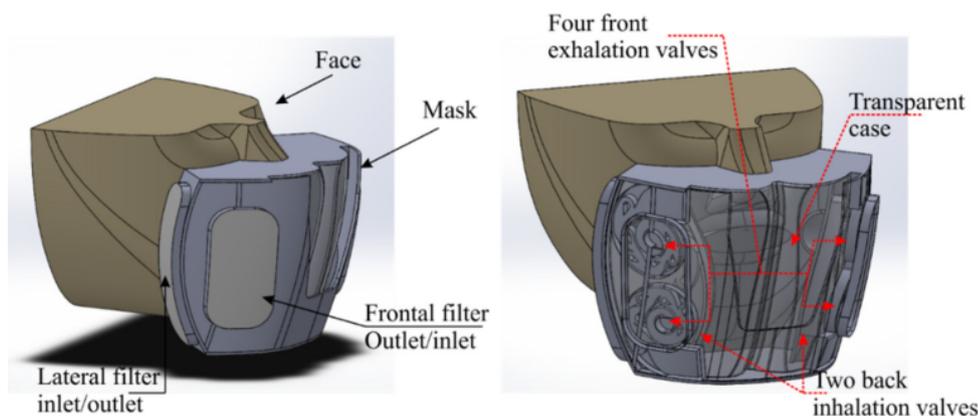


Figura 21: Modelo geométrico de máscara de proteção e dos seus principais componentes (LÓPEZ-REBOLLAR et al., 2021)

Ainda com a proposta de outras formas de combate à propagação viral, (MIRZAIE et al., 2021) apresenta a importância de escudos de proteção transparentes aplicados especificamente a salas de aula. Através de aplicação de DFC, o estudo mostra que é possível prevenir a infecção com esta forma de proteção, porém até uma certa extensão, o que mostra a necessidade do usuário do equipamento de proteção permanecer em uma estação estática realizando suas atividades. Em hospitais essa tecnologia é viável em se tratando de ambientes de atendimento direto ao público, como áreas de recepção e informações gerais. Porém, a partir do ponto de triagem, o profissional de saúde precisa entrar em contato com o paciente e escudos fixos de proteção não podem ser mais utilizados.

Em todos os trabalhos citados anteriormente existe a necessidade latente da aplicação de medidas somativas para proporcionar um ambiente mais seguro à infecção de COVID-19. Mostra-se também que a utilização da ferramenta DFC é vital para uma análise segura dos ambientes, principalmente o hospitalar.

2.4.4 Erros e Validações de Soluções Numéricas

Existem dois níveis de erros, bem distintos, que podem estar presentes na solução numérica quando os resultados são comparados com a realidade de um problema físico. O

primeiro nível está relacionado aos erros propriamente ditos, resultados da solução incorreta das equações diferenciais. Para detectá-los, os resultados devem ser comparados com outras soluções, analíticas ou numéricas. Esse processo, denominado aqui de validação numérica, atesta a qualidade do método numérico. No segundo nível estão os erros resultantes do uso de equações diferenciais que não representam adequadamente o fenômeno. A validação física, portanto, preocupa-se com a fidelidade do modelo matemático para com o problema físico (MALISKA, 2017).

A Figura 22 detalha os dois níveis de validação. A comparação dos resultados numéricos com os resultados analíticos, se existirem, ou com outros resultados numéricos, caracteriza a validação numérica. Por outro lado, a comparação dos resultados numéricos com os resultados experimentais identifica a validação física. Os procedimentos que podem levar a distanciar a realidade física dos resultados obtidos encontram-se listados na Figura 22. Portanto, sempre que erros forem detectados, deve-se conferir esses procedimentos.

Dos processos de análise do erro da solução numérica obtida, destaca-se aqui a validação realizada pelo teste de convergência de malha. A realização dessa validação é aconselhada quando não existem nenhum resultado real para comparação, ou seja, não há possibilidade de validação física. Nesse procedimento a solução numérica obtida pela simulação deve demonstrar uma aproximação cada vez mais convergente do melhor resultado obtido, que é definido pelas características do problema e pelo poder computacional disponível. Considerando a melhor solução como o marco de referência, é realizado diversos outros ciclos iterativos, de maneira que as soluções obtidas por estes ciclos desmonstrem uma tendência de aproximação à referência, fenômeno este denominado de convergência (PLETCHER; TANNERHILL; ANDERSON, 2012). Para identificar a convergência diversos modelos matemáticos para cálculo de erro podem ser utilizados. Aqui será destacado o erro quadrático que pode ser obtido através da equação a seguir.

$$\mathcal{L}_2 = \sqrt{\sum_{j=1}^n \frac{(u_r - u_n)^2}{u_r^2}} \quad (2.11)$$

Nesta equação, \mathcal{L}_2 é o erro quadrático que fornece a medida comparativa entre a referência e o observado, u_r é o valor da variável de referência para o teste (condição mais refinada da simulação) e u_n é o valor da variável de teste na condição a ser comparada.



Figura 22: Ferramentas de validação do método (MALISKA, 2017)

2.4.5 Métodos Numéricos

Existem três métodos principais e considerados tradicionais para a solução numérica das equações diferenciais: Método das Diferenças Finitas (MDF), Método dos Volumes Finitos (MVF) e o Método dos Elementos Finitos (MEF). Com o grande desenvolvimento destes métodos e a consequente penetração destas ferramentas na engenharia, não raramente se travaram discussões polêmicas a respeito da eficiência e da generalidade do uso destes métodos. Muitas afirmações são oriundas do desconhecimento da natureza dos mesmos, e uma breve revisão é importante para o seu entendimento (MALISKA, 2017).

Historicamente, o MDF foi sempre empregado na área de mecânica dos fluidos, enquanto o MEF o foi para a área estrutural na solução de problemas de elasticidade. Esses

problemas, do ponto de vista físico, são completamente diferentes, pois os de escoamentos são altamente não lineares, por envolverem as equações de Navier-Stokes, enquanto os da elasticidade, por não possuírem os termos advectivos, assemelham-se a problemas puramente difusivos de transferência de calor, de característica linear. Foi natural, portanto, o fato de os pesquisadores do MDF terem se concentrado na tentativa de dominar as não linearidades dos termos advectivos e no problema do difícil acoplamento entre as equações, dificuldades não encontradas em problemas de elasticidade resolvidos pelo método MEF.

Por isso, no desenvolvimento do MDF, a questão do tratamento de geometrias complexas foi relegada a um segundo plano, concentrando-se principalmente em sistemas de coordenadas ortogonais, como o cartesiano, cilíndrico e esférico. Este foco levou muitos a erroneamente associarem o MDF apenas com sistemas de coordenadas ortogonais, quando, na realidade, ele é aplicável a qualquer tipo de malha, mesmo que não estruturada. A complexidade surge principalmente nos procedimentos de cálculo das derivadas numéricas ao longo de eixos coordenados quando os pontos da malha não coincidem com esses eixos. (MALISKA, 2017).

Por outro lado, o MEF teve seus desenvolvimentos fundamentais na área de elasticidade, empregando malhas não estruturadas do tipo triangular, o que permite que problemas em geometrias complexas possam ser resolvidos. Até o início da década de 1970, tinha-se, portanto, o MDF com grande experiência na área de fluidos, mas sem habilidades para tratar geometrias complexas, e o MEF hábil no tratamento da geometria, mas sem ferramentas para tratar os termos advectivos presentes nas equações do movimento. As primeiras tentativas de uso do método de Galerkin para problemas com advecção forte não tiveram sucesso, uma vez que o método de Galerkin é adequado apenas para problemas puramente difusivos. O uso do método de Galerkin em elementos finitos é equivalente ao uso de diferenças centrais em diferenças finitas, ambos produzindo instabilidades em problemas de advecção dominante (PLETCHER; TANNEHILL; ANDERSON, 2012).

Esses e outros problemas similares, que possuem a adequada interpretação física pelo não funcionamento, motivaram pesquisas para o aprimoramento do método dos volumes finitos (MVF), no qual as equações aproximadas são obtidas através de balanços de conservação no volume elementar. A observação do caráter físico de cada termo da equação diferencial permitiu que métodos mais robustos fossem desenvolvidos. A possibilidade de associar a interpretação física à matemática influenciou de modo considerável para que praticamente todos

os analistas envolvidos com o MDF passassem a usar o MVF. Esses dois métodos, por serem semelhantes para algumas situações, são muitas vezes confundidos. Deve ficar claro que o MDF é simplesmente a substituição do operador diferencial pelo seu correspondente numérico, enquanto o MVF realiza um balanço de conservação da propriedade para cada volume elementar para obter a correspondente equação aproximada. Portanto, tanto o MDF como o MEF não trabalham com volumes de controle e sim apenas com os pontos da malha, e, como consequência, não são conservativos em nível discreto.

Uma grande transformação na área numérica em fluidos processou-se em meados da década de 1970, quando os sistemas coordenados ortogonais convencionais começaram a ceder espaço para os sistemas coordenados generalizados coincidentes com a fronteira do domínio, e o MVF passou a resolver problemas em geometrias irregulares. Até os últimos 5 anos, era a discretização dominante nos importantes pacotes comerciais disponíveis no mercado para a solução de problemas de escoamento de fluidos com transferência de calor. Atualmente, junto com a opção do uso de coordenadas generalizadas, esses softwares oferecem a alternativa do uso de malhas não estruturadas (MALISKA, 2017).

2.4.6 Processo para Resolução de Simulações de Dinâmica dos Fluidos Computacional

Como já abordado, a resolução analítica de problemas hidrodinâmicos reais é impraticável, principalmente quando consideradas geometrias complexas ou problemas com condições não simplificadas. Nestes casos, se faz necessário a aplicação da ferramenta computacional para a resolução confiável do comportamento dos sistemas.

As simulações computacionais são ferramentas além de úteis, eficazes quando se deseja encontrar resultados para o comportamento de um escoamento de qualquer natureza, fornecendo soluções muito próximas do comportamento real. Porém, para que isso seja possível é necessário o cumprimento de algumas etapas antes de se obter o resultado das equações que governam o escoamento.

A primeira etapa do processo é denominada de identificação do problema, nesta fase são definidos os objetivos da simulação, identificados os possíveis domínios do problema (como será isolado o domínio de estudo do modelo completo) e seus limites, qual o grau de acurácia necessário para a simulação, se o modelo pode ser simulado em 2 ou 3 dimensões, entre outras definições iniciais.

Posteriormente, têm-se o pré-processamento, onde as condições iniciais e de con-

torno são definidas. Esta fase é crucial para garantir a qualidade dos resultados da simulação (FERZIGER; PERIC, 2002). Aqui, a geometria do domínio de simulação é delineada, as propriedades dos fluidos são especificadas e as condições de contorno nas fronteiras do domínio são estabelecidas. Ainda nesta fase são selecionadas as físicas e modelos que serão usados para resolver as equações governantes.

Ainda no pré-processamento têm-se a etapa de discretização. Nesta fase, o domínio é subdividido em elementos menores, chamado em alguns casos de elementos finitos. Este processo é essencial para a aplicação de métodos numéricos (ANDERSON, 1995). A discretização permite a representação matemática do escoamento e facilita a resolução das equações governantes.

Na próxima etapa têm-se o processamento, nesta etapa é realizada a resolução numérica das equações de conservação de massa, momento e energia, considerando as pré-definições estabelecidas anteriormente. Neste processo não há nenhuma manipulação humana e constitui-se como o cerne da simulação de DFC. Esta etapa demanda considerável poder computacional e é fundamental para a obtenção de resultados confiáveis (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007). Os algoritmos computacionais são empregados para resolver as equações governantes e obter soluções numéricas precisas.

Após a obtenção das soluções numéricas, segue-se o pós-processamento, onde os resultados são analisados e visualizados conforme o objetivo da simulação. Esta fase é crucial para interpretar os resultados da simulação e extrair informações relevantes do processo simulado (ROACHE, 1998). Gráficos, animações e outras representações visuais são gerados para compreender o comportamento do escoamento.

Por fim, é importante ressaltar a necessidade de validação e verificação adequadas para garantir a confiabilidade dos resultados da simulação de DFC. Estas etapas são essenciais para garantir a credibilidade dos resultados obtidos (WILCOX, 1998). A validação envolve comparar os resultados da simulação com dados experimentais ou soluções de referência, enquanto a verificação visa avaliar a sensibilidade dos resultados a diferentes parâmetros.

Cada etapa do processo de simulação pode ser executada por softwares diferentes, após isso é possível integrar as informações, desde que a exportação do arquivo produto seja possível de ser compilado na plataforma adotada. Existem diversos pacotes de softwares disponíveis no mercado, tanto *open source* quanto *closed source*. O pacote ANSYS é uma das ferramentas disponíveis comercialmente para a realização das simulações computacionais.

O software *ANSYS-Workbench* se destaca como uma das ferramentas mais robustas para simulações de dinâmica dos fluidos computacional, sendo amplamente utilizado para analisar escoamentos de fluidos e transferência de calor em uma variedade de aplicações industriais e de pesquisa acadêmica. A plataforma utiliza o método dos volumes finitos, que permite a discretização das equações diferenciais que governam a mecânica dos fluidos, transformando-as em um sistema de equações algébricas que é resolvido numericamente em uma malha computacional (FERZIGER; PERIC, 2002). Essa metodologia facilita a modelagem de fluxos complexos em geometrias complicadas, tornando o *ANSYS-Workbench* uma escolha preferida para análises que exigem precisão e robustez computacional (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

O *ANSYS-Workbench* implementa técnicas avançadas de interpolação para melhorar a precisão das simulações. Utiliza a interpolação linear para calcular grandezas nas interfaces de células de controle, um aspecto fundamental no método de volumes finitos para assegurar a continuidade e precisão dos fluxos (PATANKAR, 1980). Além disso, a ferramenta incorpora métodos de discretização de alta ordem, como esquemas upwind de segunda ordem, que permitem capturar com maior exatidão as variáveis de transporte e melhorar a representação dos gradientes em zonas de alta variação de velocidade ou temperatura (MOUKALLED F, 2016).

A versatilidade do *ANSYS-Workbench* também se evidencia nas ferramentas para geração de malha, que permite ao usuário configurar malhas não estruturadas e refinadas em regiões de interesse, como áreas de entrada e saída de ar. O software oferece opções para malhas adaptativas, que se ajustam durante a simulação para capturar melhor as variáveis em zonas de alto gradiente, aprimorando a resolução de fenômenos críticos na simulação, como camadas de contorno e interfaces fluido-estrutura (BLAZEK, 2015). Essa adaptabilidade da malha permite que o *ANSYS-Workbench* trate com eficiência as especificidades de cada geometria analisada, mantendo o equilíbrio entre precisão e tempo computacional.

Outro aspecto técnico importante do *ANSYS-Workbench* é a capacidade de resolver problemas transientes e de escoamento turbulento, elementos cruciais em estudos de ambientes hospitalares, por exemplo. O software oferece uma ampla gama de modelos para resolução de diferentes problemas em Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD). Para simulações de escoamentos turbulentos em média temporal, o modelo Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) é amplamente utilizado devido à sua eficiência computacional. Já para

problemas envolvendo escoamentos multifásicos, como a interação entre líquidos e gases, são disponibilizados modelos específicos, como o Volume of Fluid (VOF) ou Euleriano-Euleriano. Por outro lado, para capturar com maior precisão as características de vórtices e flutuações em escoamentos altamente turbulentos, o modelo Large Eddy Simulation (LES) é uma opção avançada, oferecendo detalhamento superior ao lidar com as grandes escalas de turbulência (WILCOX, 2006). Esses modelos são essenciais em simulações de escoamentos onde a interação entre o ar e superfícies influencia diretamente na distribuição de contaminantes, a seguir será apresentado a modelagem matemática de alguns desses modelos (ANSYS, 2021).

2.4.6.1 Modelo de Escoamento Multifásico

Para a modelagem matemática de escoamentos multifásicos, considera-se a divisão do fluxo em diferentes fases, representadas pelas letras gregas α , β , γ , etc., com o total de fases denotado por N_p . A fração volumétrica de uma fase α , denotada por f_α , é usada para determinar o volume V_α ocupado pela fase em um volume V ao redor de um ponto específico, conforme a Equação (2.12):

$$V_\alpha = f_\alpha V, \quad \text{para } 1 \leq \alpha \leq N_p. \quad (2.12)$$

A densidade da fase α , denotada por ρ_α , refere-se à massa por unidade de volume presente exclusivamente nesta fase. A densidade efetiva, que leva em conta a fração volumétrica, é expressa pela Equação (2.13):

$$\bar{\rho}_\alpha = f_\alpha \rho_\alpha. \quad (2.13)$$

Para o caso de misturas multifásicas, a densidade da mistura é definida pela Equação (2.31):

$$\rho_m = \sum_{\alpha=1}^{N_p} f_\alpha \rho_\alpha. \quad (2.14)$$

Nos escoamentos multifásicos em dutos onde os efeitos gravitacionais podem ser

desconsiderados, a pressão total é calculada pela Equação (2.15), válida para fluidos compressíveis e incompressíveis:

$$P_{\text{tot}} = P_{\text{stat}} + \sum_{\alpha=1}^{N_p} \frac{1}{2} f_{\alpha} \rho_{\alpha} \vec{v}_{\alpha}^2, \quad (2.15)$$

onde P_{stat} é a pressão estática, e \vec{v}_{α} representa a velocidade da fase α .

No contexto de escoamentos multifásicos, a equação da conservação da massa para uma fase genérica α é apresentada da seguinte forma:

$$\frac{\partial}{\partial t} (f_{\alpha} \rho_{\alpha}) + \nabla \cdot (f_{\alpha} \rho_{\alpha} \vec{v}_{\alpha}) = S_{MS\alpha} + \sum_{\beta=1}^{N_p} \Gamma_{\alpha\beta}, \quad (2.16)$$

onde: f_{α} representa a fração volumétrica, ρ_{α} é a densidade do fluido, \vec{v}_{α} é o vetor velocidade, $S_{MS\alpha}$ descreve a fonte de massa específica utilizada e $\sum_{\beta=1}^{N_p} \Gamma_{\alpha\beta}$ é a taxa de volume da fase α para a fase β .

A equação de conservação do momentum linear em escoamentos multifásicos considera todas as forças que atuam em cada fase e as interações entre elas. Para uma fase genérica α , a equação é dada por:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (f_{\alpha} \rho_{\alpha} \vec{v}_{\alpha}) + \nabla \cdot [f_{\alpha} (\rho_{\alpha} \vec{v}_{\alpha} \otimes \vec{v}_{\alpha})] = & -f_{\alpha} \nabla \rho_{\alpha} \\ & + \nabla \cdot \{f_{\alpha} \mu_{\alpha} [\nabla \vec{v}_{\alpha} + (\nabla \vec{v}_{\alpha})^T]\} \\ & + \sum_{\beta=1}^{N_p} (\Gamma_{\alpha\beta} \vec{v}_{\beta} - \Gamma_{\beta\alpha} \vec{v}_{\alpha}) + \vec{s}_{M\alpha} + \vec{M}_{\alpha}, \end{aligned} \quad (2.17)$$

onde f_{α} é a fração volumétrica da fase α , ρ_{α} representa sua densidade, e \vec{v}_{α} é o vetor velocidade. O termo μ_{α} corresponde à viscosidade da fase α . As taxas de transferência de momentum entre as fases α e β são denotadas por $(\Gamma_{\alpha\beta} \vec{v}_{\beta} - \Gamma_{\beta\alpha} \vec{v}_{\alpha})$. O termo $\vec{s}_{M\alpha}$ indica as forças de momentum causadas por forças externas, e \vec{M}_{α} representa as forças interfaciais que incluem arrasto, sustentação e outros efeitos interfaciais.

As forças de transferência interfacial, denotadas por $M_{\alpha\beta}$, surgem devido às interações entre diferentes fases em um escoamento multifásico. A força total que age sobre uma fase α

como resultado da interação com as outras fases pode ser expressa como:

$$\vec{M}_\alpha = \sum_{\beta=1, \beta \neq \alpha}^{N_p} \vec{M}_{\alpha\beta}, \quad (2.18)$$

onde $\vec{M}_{\alpha\beta}$ representa a força interfacial entre as fases α e β .

A força interfacial total entre duas fases pode ser composta por diversos efeitos físicos independentes, sendo descrita como:

$$\vec{M}_{\alpha\beta} = \vec{M}_{\alpha\beta}^D + \vec{M}_{\alpha\beta}^L + \vec{M}_{\alpha\beta}^{LUB} + \vec{M}_{\alpha\beta}^{VM} + \vec{M}_{\alpha\beta}^{TD} + \vec{M}_{\alpha\beta}^S, \dots \quad (2.19)$$

onde os termos representam, respectivamente: a força de arraste ($\vec{M}_{\alpha\beta}^D$), força de elevação ($\vec{M}_{\alpha\beta}^L$), força de lubrificação de parede ($\vec{M}_{\alpha\beta}^{LUB}$), força de massa virtual ($\vec{M}_{\alpha\beta}^{VM}$), força de dispersão turbulenta ($\vec{M}_{\alpha\beta}^{TD}$) e força de pressão de sólidos ($\vec{M}_{\alpha\beta}^S$).

A conservação de energia em escoamentos multifásicos é essencial para descrever a troca de calor entre as fases e o sistema. Para uma fase genérica α , a equação de conservação da energia é expressa como:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (f_\alpha \rho_\alpha h_\alpha) + \nabla \cdot [f_\alpha (\rho_\alpha \vec{v}_\alpha h_\alpha + \lambda_\alpha \nabla T_\alpha)] \\ = \sum_{\beta=1}^{N_p} (\Gamma_{\alpha\beta}^+ h_\beta - \Gamma_{\beta\alpha}^+ h_\alpha) + Q_\alpha + S_\alpha, \end{aligned} \quad (2.20)$$

onde h_α é a entalpia específica da fase α , λ_α é a condutividade térmica, e T_α a temperatura. Os termos adicionais Q_α representam a transferência de calor para a fase α devido à interação com outras fases, enquanto S_α é a fonte de calor externa. A transferência de calor induzida pela transferência de massa é representada pela soma $\sum_{\beta=1}^{N_p} (\Gamma_{\alpha\beta}^+ h_\beta - \Gamma_{\beta\alpha}^+ h_\alpha)$.

A transferência de calor entre as fases em escoamentos multifásicos ocorre devido ao desequilíbrio térmico nas interfaces. A quantidade de calor total transferida para a fase (α), por unidade de volume devido à interação com outras fases, é dada por:

$$Q_{\alpha} = \sum_{\beta \neq \alpha} Q_{\alpha\beta}, \quad (2.21)$$

onde $Q_{\alpha\beta}$ é a taxa de transferência de calor entre as fases α e β , definida como:

$$Q_{\alpha\beta} = \bar{h}_{\alpha\beta} A_{\alpha\beta} (T_{\beta} - T_{\alpha}), \quad (2.22)$$

sendo $\bar{h}_{\alpha\beta}$ o coeficiente médio de transferência de calor, $A_{\alpha\beta}$ a área interfacial por unidade de volume, e $T_{\beta} - T_{\alpha}$ a diferença de temperatura entre as fases.

A Equação (2.22) pode ser simplificada utilizando o coeficiente volumétrico de transferência de calor, $C_{\alpha\beta}^{(h)}$, definido como:

$$C_{\alpha\beta}^{(h)} = \bar{h}_{\alpha\beta} A_{\alpha\beta}. \quad (2.23)$$

Substituindo na Equação (2.22), a taxa de transferência de calor $Q_{\alpha\beta}$ assume a forma:

$$Q_{\alpha\beta} = C_{\alpha\beta}^{(h)} (T_{\beta} - T_{\alpha}). \quad (2.24)$$

Essa formulação permite calcular a troca de calor entre fases considerando a área interfacial e o coeficiente de transferência de calor, sendo essencial para descrever fenômenos térmicos em escoamentos multifásicos. Porém, todos os modelos de transferência (momentum, calor e massa) são diretamente dependentes da área de superfície de contato entre as duas fases. Estes são caracterizados pela área interfacial por unidade de volume entre as fases contínua α e dispersa β , $A_{\alpha\beta}$

Para a fase dispersa β existem três modelos: o Modelo Partículas, Modelo Mistura e o Modelo de Superfície Livre.

No modelo de partícula, considera-se a fase dispersa β composta por partículas esféricas com diâmetro médio d_{β} . Nesse contexto, a área interfacial por unidade de volume entre as fases contínua α e dispersa β , $A_{\alpha\beta}$, é calculada por meio da seguinte relação:

$$A_{\alpha\beta} = \frac{6f_{\beta}}{d_{\beta}}, \quad (2.25)$$

onde f_{β} é a fração volumétrica da fase dispersa β e d_{β} é o diâmetro médio das partículas.

O coeficiente de transferência interfacial não dimensional está relacionado ao número de Reynolds das partículas e ao número de Prandtl para o fluido. O número de Reynolds ($Re_{\alpha\beta}$) e o número de Prandtl ($Pr_{\alpha\beta}$) são definidos como:

$$Re_{\alpha\beta} = \frac{\rho_{\alpha} |\vec{v}_{\beta} - \vec{v}_{\alpha}| d_{\beta}}{\mu_{\alpha}}, \quad (2.26)$$

$$Pr_{\alpha\beta} = \frac{\mu_{\alpha} C_{p\alpha}}{\lambda_{\alpha}}, \quad (2.27)$$

onde ρ_{α} é a densidade da fase contínua α , \vec{v}_{α} e \vec{v}_{β} são as velocidades das fases contínua e dispersa, respectivamente, μ_{α} é a viscosidade dinâmica da fase α , $C_{p\alpha}$ é o calor específico da fase α , e λ_{α} é a condutividade térmica.

O modelo de mistura é amplamente utilizado em escoamentos multifásicos devido à sua simplicidade. Ele trata as fases de maneira simétrica, permitindo o cálculo da área superficial por unidade de volume $A_{\alpha\beta}$ por meio da seguinte equação:

$$A_{\alpha\beta} = \frac{f_{\alpha} f_{\beta}}{d_{\alpha\beta}}, \quad (2.28)$$

onde f_{α} e f_{β} são as frações volumétricas das fases α e β , respectivamente, e $d_{\alpha\beta}$ é a escala de comprimento interfacial.

Assim como no modelo de partículas, os coeficientes de transferência interfacial podem ser expressos em função dos números de Reynolds ($Re_{\alpha\beta}$) e Prandtl ($Pr_{\alpha\beta}$) da mistura. Esses números são definidos como:

$$Re_{\alpha\beta} = \frac{\rho_{\alpha\beta} |\vec{v}_{\beta} - \vec{v}_{\alpha}| d_{\alpha\beta}}{\mu_{\alpha\beta}}, \quad (2.29)$$

$$Pr_{\alpha\beta} = \frac{\mu_{\alpha\beta} c_{p\alpha\beta}}{\lambda_{\alpha\beta}}, \quad (2.30)$$

onde $\rho_{\alpha\beta}$, $\mu_{\alpha\beta}$, $c_{p\alpha\beta}$ e $\lambda_{\alpha\beta}$ são, respectivamente, a densidade, viscosidade dinâmica, capacidade calorífica específica e condutividade térmica da mistura.

As propriedades da mistura são calculadas como médias ponderadas das propriedades das fases, seguindo as equações:

$$\rho_{\alpha\beta} = f_{\alpha}\rho_{\alpha} + f_{\beta}\rho_{\beta}, \quad (2.31)$$

$$\mu_{\alpha\beta} = f_{\alpha}\mu_{\alpha} + f_{\beta}\mu_{\beta}. \quad (2.32)$$

Este modelo fornece uma abordagem eficiente e prática para simulações de escoamentos multifásicos, permitindo a análise de transferência de calor e momentum entre fases.

O modelo de superfície livre é utilizado para descrever a interface entre dois fluidos distintos, como líquidos e gases. Nesse contexto, a densidade de área interfacial entre as fases contínua α e dispersa β , denotada por $A_{\alpha\beta}$, é determinada pela seguinte relação:

$$A_{\alpha\beta} = \frac{2|\nabla f_{\alpha}||\nabla f_{\beta}|}{|\nabla f_{\alpha}| + |\nabla f_{\beta}|}, \quad (2.33)$$

onde ∇f_{α} e ∇f_{β} são os gradientes das frações volumétricas das fases α e β , respectivamente.

Quando o escoamento é composto por apenas duas fases, a equação pode ser simplificada, resultando em:

$$A_{\alpha\beta} = |\nabla f_{\alpha}|, \quad (2.34)$$

2.4.6.2 Modelo de Turbulência *k-epsilon*

A modelagem da turbulência é fundamental para descrever os escoamentos turbulentos e fechar as equações de Reynolds. As equações de transporte para a energia cinética turbulenta K_α e a taxa de dissipação turbulenta ε_α para a fase α são definidas como segue.

A equação de transporte para K_α é:

$$\frac{\partial(\rho_\alpha f_\alpha K_\alpha)}{\partial t} + \nabla \cdot \left[f_\alpha \left(\rho_\alpha \vec{v}_\alpha K_\alpha - \left(\mu + \frac{\mu_{t\alpha}}{\sigma_k} \right) \nabla K_\alpha \right) \right] = f_\alpha (G_\alpha - \rho_\alpha \varepsilon_\alpha), \quad (2.35)$$

e a equação de transporte para ε_α é:

$$\frac{\partial(\rho_\alpha f_\alpha \varepsilon_\alpha)}{\partial t} + \nabla \cdot \left[f_\alpha \left(\rho_\alpha \vec{v}_\alpha \varepsilon_\alpha - \left(\mu + \frac{\mu_{t\alpha}}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon_\alpha \right) \right] = f_\alpha \left(C_1 \frac{\varepsilon_\alpha}{K_\alpha} G_\alpha - C_2 \rho_\alpha \frac{\varepsilon_\alpha^2}{K_\alpha} \right), \quad (2.36)$$

onde G_α é a geração de energia cinética turbulenta na fase α , $C_1 = 1.44$ e $C_2 = 1.92$ são constantes empíricas, e $\sigma_k = 1.0$ e $\sigma_\varepsilon = 1.3$ são constantes relacionadas à difusão.

A energia cinética turbulenta e a taxa de dissipação são definidas por:

$$K_\alpha = \frac{q_\alpha^2}{2}, \quad \varepsilon_\alpha = C_\mu \frac{q_\alpha^3}{l_\alpha}, \quad (2.37)$$

onde q_α é a escala de velocidade, l_α é o comprimento de escala espacial, e C_μ é uma constante empírica dada por:

$$C_\mu = \frac{4C_\alpha^2}{3}. \quad (2.38)$$

Finalmente, a viscosidade turbulenta é expressa como:

$$\mu_{t\alpha} = C_\mu \rho_\alpha \frac{K_\alpha^2}{\varepsilon_\alpha}. \quad (2.39)$$

Este modelo é denominado de *k-ε*, este modelo é particularmente adequado para

simular escoamentos em ambientes internos devido à sua capacidade de representar adequadamente o comportamento de escoamentos totalmente desenvolvidos (LAUNDER; SPALDING, 1974). Além disso, o modelo é confiável em simulações de engenharia, especialmente em problemas envolvendo recirculação de ar e troca de calor em dutos ou salas (PATANKAR, 1980). Por fim, estudos recentes, reforçam que o $k-\varepsilon$ oferece um bom equilíbrio entre precisão e custo computacional, sendo amplamente aceito para simular fluxos que não envolvem gradientes de pressão muito acentuados ou grandes separações de fluxo (VERSTEEG; MALASEKERA, 2007). Portanto, a escolha desse modelo se justifica pela sua capacidade de capturar características fundamentais de escoamentos turbulentos em condições de fluxo interno, como as encontradas em simulações de ventilação e qualidade do ar interior.

2.4.6.3 Métricas de Qualidade da Malha

Na modelagem computacional de dinâmica dos fluidos, a qualidade da malha é um aspecto crítico que influencia diretamente a precisão e a estabilidade das soluções numéricas. Entre as métricas mais utilizadas para avaliar a qualidade de uma malha no software ANSYS-Fluent, destacam-se as métricas *Element Quality* e *Orthogonal Quality*, que auxiliam na identificação de potenciais limitações ou inconsistências que possam comprometer os resultados da simulação.

A métrica *Element Quality* avalia a geometria dos elementos que compõem a malha, considerando sua conformidade com formas ideais, como quadrados ou cubos no caso de elementos bidimensionais e tridimensionais, respectivamente. Essa métrica utiliza uma razão baseada no volume do elemento em relação à soma dos quadrados dos comprimentos de suas arestas. Para elementos bidimensionais, como triângulos ou quadriláteros, a métrica pode ser expressa pela equação (2.40).

$$\text{Element Quality} = \frac{\text{Área}}{\sum(\text{Comprimento das Arestas})^2}, \quad (2.40)$$

Enquanto isso, para elementos tridimensionais, como tetraedros ou hexaedros, a definição é expandida para incluir o volume conforme a equação (2.41).

$$\text{Element Quality} = \frac{\text{Volume}}{\sqrt{(\sum(\text{Comprimento das Arestas})^2)^3}}, \quad (2.41)$$

Valores da métrica próximos de 1 indicam elementos com qualidade geométrica ideal, enquanto valores próximos de 0 refletem elementos deformados, possivelmente com volume negativo, o que inviabiliza a simulação numérica. Estudos sugerem que elementos com qualidade inferior a 0,1 devem ser refinados ou ajustados, dado que podem levar a erros significativos nos cálculos ou instabilidade na solução (ANSYS, 2021).

Outra métrica amplamente empregada é a *Orthogonal Quality*, que mede a ortogonalidade dos elementos da malha com base nos vetores normais das faces e nos vetores que conectam os centróides das células adjacentes. Para cada face do elemento, calcula-se o cosseno do ângulo entre o vetor normal da face e o vetor que liga os centróides das células vizinhas. A menor dessas medidas é utilizada como o valor da métrica de qualidade ortogonal do elemento. Essa métrica é definida pela equação (2.42)

$$\text{Orthogonal Quality} = \min(\cos(\theta)), \quad (2.42)$$

onde θ é o ângulo formado entre o vetor normal à face e o vetor conectando os centróides adjacentes. Assim como a métrica anterior, valores próximos de 1 indicam alta qualidade, enquanto valores inferiores a 0,1 são considerados inadequados para simulações de alta fidelidade, podendo comprometer tanto a convergência quanto a precisão dos resultados (ANSYS, 2021).

O controle rigoroso dessas métricas durante a geração da malha permite identificar regiões críticas que exigem refinamento ou ajuste geométrico. A *Element Quality*, por exemplo, é especialmente importante para evitar distorções em regiões onde há gradientes acentuados de variáveis, como velocidade ou temperatura. Já a *Orthogonal Quality* é essencial para capturar com precisão os fluxos em geometrias complexas, prevenindo gradientes espúrios que podem surgir devido à má orientação dos elementos. Valores recomendados para essas métricas incluem um mínimo de 0,1 para *Orthogonal Quality* e valores superiores a 0,5 para *Element Quality*, sendo ideal manter ambos o mais próximo possível de 1.

Essas métricas desempenham um papel fundamental na avaliação e no refinamento

da malha computacional, garantindo que os resultados das simulações representem adequadamente os fenômenos físicos simulados. A conformidade com esses critérios de qualidade, conforme descrito na documentação oficial do ANSYS-Fluent (ANSYS, 2021), é indispensável para a obtenção de soluções numéricas confiáveis e robustas, especialmente em estudos envolvendo dinâmica dos fluidos computacional em ambientes clínicos e sistemas de desinfecção UVGI.

3 METODOLOGIA

Esta pesquisa classifica-se como exploratória-descritiva baseada na análise numérica (simulação computacional), especificamente utilizando a Dinâmica dos Fluidos Computacional (DFC) para analisar o desempenho de sistemas de Irradiação Germicida Ultravioleta (UVGI) em ambientes de cuidados clínicos. Essa análise é feita quantitativa e qualitativamente observando duas vertentes: Efeitos Térmicos (hidrodinâmicos) e Potencial de Desinfecção. A realização desta pesquisa foi baseada no fluxo da figura Figura 23, constituída nas seguintes etapas: delimitação do escopo da pesquisa, coleta de dados necessários, pré-processamento e Processamento, pós-processamento e relatório manuscrito, que serão descritas a seguir.

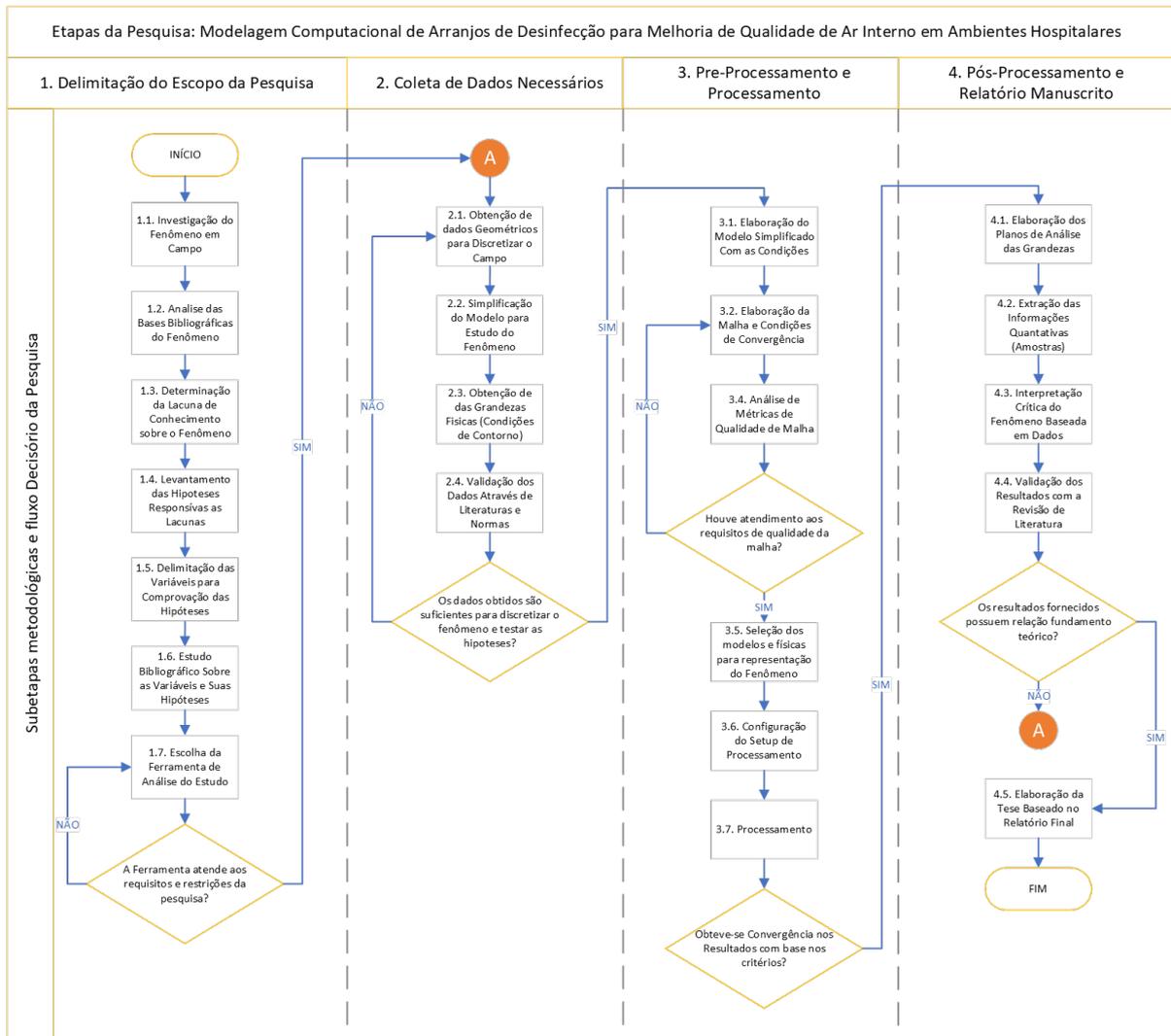


Figura 23: Esquema de Etapas da Metodologia da Análise Computacional. Fonte: Elaboração Própria

Para análise de efeitos térmicos e hidrodinâmicos utilizaram-se equipamentos UVGI

móveis posicionados dentro do ambiente de cuidados clínicos (salas do setor de pneumologia), enquanto que para a análise de desinfecção utilizaram-se duas configurações de uso de lâmpadas UVGI instaladas no duto de insuflamento do sistema de condicionamento de ar.

3.1 Delimitação do Escopo da Pesquisa

Para definição do escopo de pesquisa foi observada a problemática associada ao campo da infectologia viral através das vias aéreas, aplicado a ambientes comunitários com condicionamento de ar. Com o advento da pandemia de COVID-19, esta temática passou a ser explorada pela comunidade científica com mais afinco, proporcionando material bibliográfico vasto sobre o fenômeno e as tecnologias para mitigá-lo, os quais foram explorados na revisão bibliográfica desta pesquisa.

Dentro dos estudos realizados foi observado lacuna de conhecimento associado ao uso de sistemas UVGI para mitigação de infecção viral em ambientes hospitalares. Especificamente nas vertentes anteriormente expostas (térmica, hidrodinâmica e potencial de infecção) com base em diferentes arranjos de instalação praticados comercialmente. Neste sentido, o campo de estudo definido para análise dessa pesquisa foi o Hospital Universitário Lauro Wanderley, especificamente a sala de pneumologia, escolhida devido ao fluxo de pacientes e profissionais de saúde com considerável exposição ao risco de infecção por agentes patogênicos transmissíveis pelo ar, como SARS-CoV-2 e outros.

Para essa análise, determinou-se através de literaturas que o estudo do fenômeno de infectologia viral através de vias aéreas deve ser baseado nas variáveis de controle do ar interior do ambiente, são elas: Velocidade, Temperatura e Umidade. Os quais observou-se as duas primeiras como sendo fundamentais ao estudo da sobrevivência viral através de aerossol.

Nesta mesma vertente, identificou-se que as variáveis do ar interior não podem ser alteradas sem parâmetros de validação, no Brasil existem normas específicas que determinam os critérios dessas variáveis, são elas: ABNT NBR 7246 (2022), ABNT NBR 16401 (2008) e Re. N° 09/2003 da ANVISA. As quais serão utilizadas na discussão dos resultados desta pesquisa.

Considerou-se como hipóteses nesta pesquisa que a utilização de sistema UVGI inseridos nos ambientes climatizado com condicionadores de ar, trazem mitigação do potencial de infecção viral através de vias aéreas, porém por se tratar de uma fonte de calor adicionada ao ambiente, o equipamento trará variações consideráveis parâmetros de conforto térmico

estabelecidos pelas normas brasileiras, podendo inviabilizar o seu uso.

Para confirmar as hipóteses estabelecidas mantendo os critérios de segurança dos pesquisadores a exposição viral, optou-se pelo uso da ferramenta de simulação computacional análise do fenômeno. Para avaliação hidrodinâmica e térmica adotou-se estudo associado ao arranjo UVGI móvel, em base comparativa entre um modelo com e sem equipamento. Esta configuração tem considerável interação com a recirculado de ar dentro do ambiente permitindo uma melhor avaliação da área de influência das lâmpadas do equipamento. Neste caso, optou-se por um escoamento monofásico de ar úmido (incompressível), não viscoso, em regime transiente, para solução das equações de Navier-Stokes considerando a parte hidrodinâmica e a equação de energia. Assim como, modelo de turbulência ativo para o escoamento. Considerando estas prerrogativas como sendo a situação mais adequada a simulação dos efeitos reais do escoamento.

Na avaliação de potência de desinfecção, optou-se pela utilização dos arranjos transversais e perimetrais do sistema UVGI instalados no duto. Nestas situações a interação com o ambiente após o duto se torna irrelevante, uma vez que a desinfecção ocorre com a exposição do ar nas regiões próximas a lâmpada no duto. Neste caso, determinou-se a necessidade de um modelo multifásico para análise, com escoamento de mistura ar úmido e água, sendo a fase aquosa atribuída ao aerossol com partículas virais ativas. Para este caso, manteve-se as características anteriormente descritas do escoamento adicionando-se o modelo de partícula com transferência interfacial entre as fases, forças de arraste para a fase dispersa e ativação do modelo evaporativo.

Diante destes requisitos e restrições os softwares selecionados para realizar a análise nas etapas subsequentes foram o *Autodesk Inventor* e o *ANSYS-Workbench*. Este último citado, é caracterizado pela integração de diferentes módulos que realizam as etapas de simulação conforme será descrito ao longo desta metodologia.

Avaliou-se que os modelos e bibliotecas disponíveis no pacote de análise hidrodinâmica da versão 2021 R2 do *ANSYS-Workbench* e *2021 Educacional Version* do *Autodesk Inventor* estão aptos para fornecer a modelagem e os resultados esperados considerando as vertentes de análise do fenômeno.

3.2 Coleta dos dados Necessários

Para a realização da simulação computacional foi necessário modelar o ambiente computacionalmente, para isso foi obtido o modelo de planta baixa do setor de pneumologia cedido pela equipe técnica do Hospital Universitário Lauro Wanderley (HULW), cidade de João Pessoa, Brasil. O setor é classificado como sendo não crítico de Ambulatórios e Consultórios (SILVA et al., 2019), possuindo dimensões 7,6 x 3,5 x 2,5 [m] (volume total de 66,5 m³), é subdividida em 3 salas (Figura 24), sendo a sala 1 a maior, sala 2 a central, e a sala 3 a menor em área.

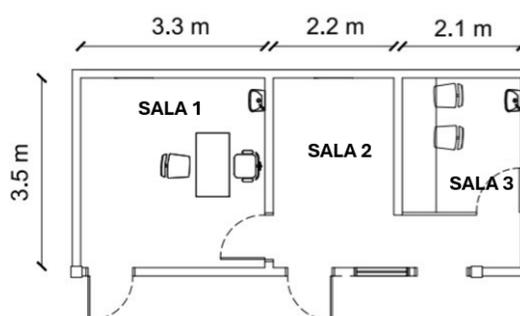


Figura 24: Planta da sala de cuidados clínicos em estudo localizada no Hospital Universitário Lauro Wanderley da Universidade Federal da Paraíba (HULW/UFPB). Fonte: Elaboração Própria.

Para simplificação da análise não foi considerada a especificação de funcionalidade das salas neste setor, e portanto foi desconsiderada esta informação para determinação do modelo, assim como foi desconsiderada a mobília para efeitos sobre o escoamento, sendo os únicos anteparos de barreira ou direcionamento ao escoamento as próprias paredes e as aletas dos difusores de entrada (que ficam entre o duto e o sala) e saída (nas paredes que possuem portas de saída dos ambientes). As interações externas associadas a transferência de calor pelas paredes, devido a cômodos adjacentes ao modelo, também foram desconsideradas, o modelo encontra-se isolado dos ambientes externos. O sistema utilizado para condicionamento de ar também não será considerado no modelo, pois o estudo está restrito apenas a analisar as características de circulação do ar úmido no ambiente.

Como anteriormente apresentado o software utilizado para a modelagem geométrica da simulação foi o *Autodesk Inventor* com adaptações realizadas no *ANSYS-Mechanical*, que é o módulo de geometria do *ANSYS-Workbench*.

Para cada sala, definiu-se que o sistema de insuflamento do ar condicionado é constituído por dutos com secção transversal quadrada, de 0,4 [m], o comprimento do duto

considerado foi de 1,0 [m] para completo desenvolvimento do escoamento. A entrada de alimentação do duto para a sala é feita pelo teto possuindo um difusor entre o duto e a sala com aletas a 45°, além de saídas com grelhas de escape na parte inferior da sala com seção retangular de 0,28 x 0,4 [m] (Figura 25).

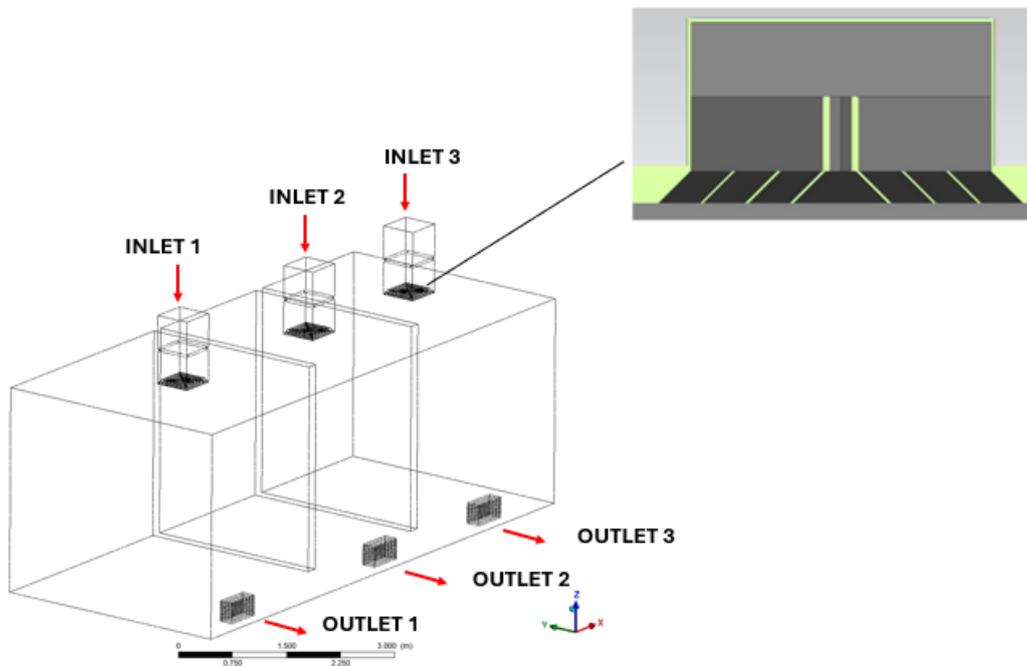


Figura 25: Modelo tridimensional da sala de cuidados clínicos em estudo localizada no Hospital Universitário Lauro Wanderley da Universidade Federal da Paraíba (HULW/UFPB). Fonte: Elaboração Própria.

Este ambiente possui classificação de risco nível 1, com recirculação configurada na região inferior da sala (ABNT, 2022). As condições definidas para esta sala são orientadas pelas especificações das norma ABNT NBR 7246 (2022), ABNT NBR 16401 (2008) e Re. N° 09/2003 da ANVISA. Condições de contorno de Dirichlet (primeira ordem) para pressão e velocidade são impostas nas superfícies das paredes, nas aletas de entrada e nas aletas de saída. Assumiu-se que o perfil de velocidade na entrada é uniforme, ou seja, com valor constante. As portas das salas são consideradas fechadas, com aletas fixas que permitem a passagem do fluxo para fora do ambiente e possível recirculação em circuito externo. Para o campo de temperatura, definiu-se condições de contorno de Dirichlet nas grelhas de entrada e condições de contorno homogêneas de Neumann (segunda espécie) nas paredes. A temperatura interna foi inicialmente definida em 25°C em todas as salas, as condições de contorno podem ser identificadas na tabela Tabela 7.

Tabela 7: Condições de contorno impostas nos modelos de simulação numérica.

Fronteira	Propriedade	Condição	Valor
Inlets	Velocidade	Dirichlet	1.0 m s^{-1}
Inlets	Temperatura	Dirichlet	$19.0 \text{ }^\circ\text{C}$
Outlets	Pressão	Dirichlet	0.0 kPa
Paredes	Velocidade (não escorregamento)	Dirichlet	0.0 m s^{-1}
Paredes	Temperatura (Sem fluxo)	Neumann	0.0 W m^{-2}

A tecnologia para climatização do consultório de pneumologia foi a *Self-Contained*. O insuflamento do ar condicionado é realizado pelo duto localizado no teto. A metodologia de climatização aplicada para o ambiente de estudo foi o resfriamento com desumidificação, observando que a edificação encontra-se na região nordeste do Brasil. A vazão eficaz recomendada pela NBR 16401-3 (2008) para este ambiente, levando em conta as definições anteriormente apresentadas encontra-se na Tabela 8.

Tabela 8: Análise de Vazão Eficaz.

Variável	Sala 1	Sala 2	Sala 3
F_p [L/s.Pessoa]	3,8	3,8	3,8
F_a [L/s.m ²]	0,4	0,4	0,4
P_z [Pessoas]	4	6	3
A_z [m ²]	11,55	7,7	7,3
E_z [L/s]	19,82	25,8	14,3

Considerando a fração entre a vazão de exterior requerida na zona de ventilação e a vazão total insuflada na zona (Z_{ae}) menor que 0,55, o fator de distribuição (E_v) será de 0,6 e o fator de diversidade de ocupação D igual a 1. Para esta situação, a vazão efetiva recomendada da norma NBR 16401-3 (2008) é de 0,11 [m³/s]. Enquanto que a Re. N^o 09/2003 da ANVISA a vazão mínima depende da quantidade simultânea de ocupantes, adotando-se 13 pessoas, a vazão recomendada por esta norma é de 0,0975 [m³/h]. Como a vazão executada no ambiente é de 0,16 [m³/s], foi observado o atendimento das duas normas nas características estabelecidas.

Como apresentado, o modelo foi simulado a fim de obter respostas em relação à interferência térmica e ao potencial de desinfecção. Para a primeira situação, o sistema de Irradiação Germicida Ultravioleta (UVGI) utilizado foi o modelo de purificação de ar por

irradiação UV móvel. O termo fonte utilizado foi caracterizado pela carga térmica adicionada ao sistema por 4 lâmpadas de baixa pressão de mercúrio de 36 [W] com irradiação UV-C de onda curta. A irradiância média de cada lâmpada foi estabelecida em $1,97 \text{ [m.W/cm}^2\text{]}$, considerando o comprimento de 1200 [mm] e 25,5 [mm] de diâmetro, convencionalmente comercializado no mercado pela Philips[®] e posicionados conforme Figura 26.

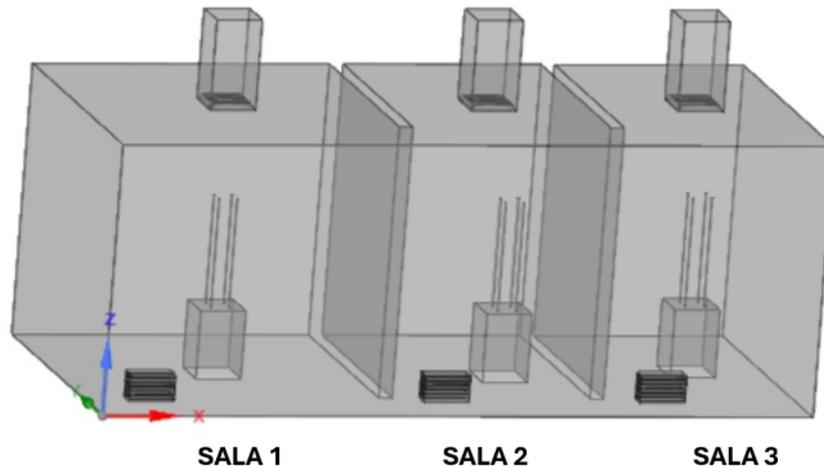


Figura 26: Modelo tridimensional sem escala da sala de cuidados clínicos em estudo com a utilização dos equipamentos móveis de desinfecção. Fonte: Elaboração Própria.

Na análise de potencial de desinfecção, foram consideradas as mesmas lâmpadas UV-C do primeiro estudo, porém instaladas de duas formas distintas, perimetralmente e transversalmente em cada duto de insuflamento (*inlets*). Em ambos os casos foram instaladas 4 lâmpadas. O posicionamento do modelo perimetral foi no perímetro do duto enquanto que o modelo transversal foi instalado em posição transversalmente o duto e conseqüentemente ao escoamento, como pode ser observado na Figura 27.

Para esta parte do estudo foi considerado um escoamento multifásico com modelo de partícula para transferência interfacial, considerando modelo de arraste para fase dispersa. As composições foram de 10% de água modelando aerossol viral (fase dispersa) e 90% de ar úmido (fase contínua) conforme características da Tabela 7.

3.3 Pré-Processamento e Processamento do Modelo

O módulo utilizado para discretizar o modelo geométrico desenvolvido, ainda no pré-processamento, foi o *ANSYS-Meshing*, este módulo é integrado ao *ANSYS-Workbench*, é uma ferramenta essencial para a geração de malhas voltadas à análise numérica por volumes finitos. Ele permite a discretização eficiente de geometrias complexas em elementos ade-

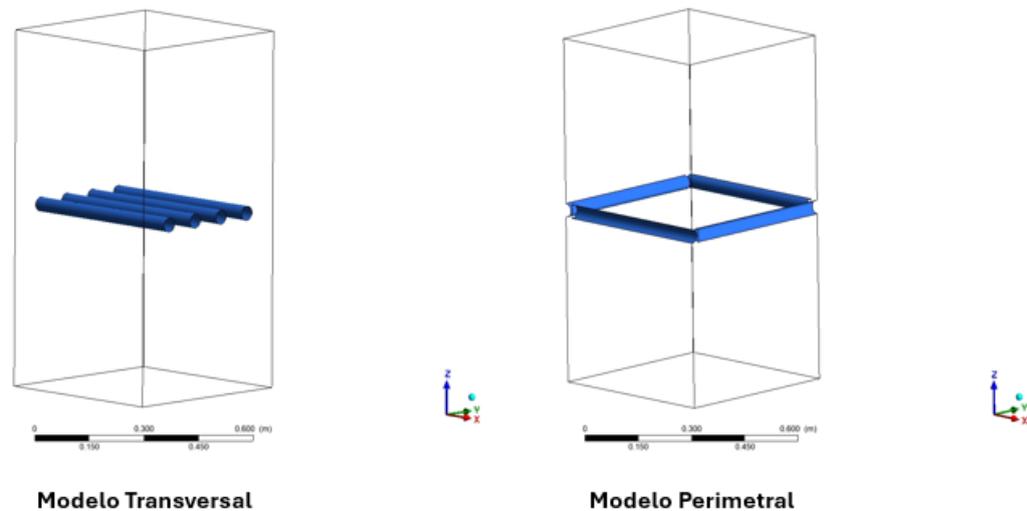


Figura 27: Modelos de Instalação de lâmpadas UV-C para estudo de potência de desinfecção. Fonte: Elaboração Própria.

quados, garantindo a precisão na simulação de fenômenos físicos. Com suporte a diferentes tipos de malhas e controle refinado de elementos, a ferramenta otimiza a qualidade da malha e a eficiência computacional, sendo amplamente utilizada em diversas áreas da engenharia.

Já a etapa de processamento foi realizada através do *solver* do *ANSYS-Fluent*. Este módulo é uma ferramenta avançada de dinâmica dos fluidos computacional (CFD) integrada ao *ANSYS-Workbench*, amplamente utilizada para simulações de escoamentos fluidos, transferência de calor, reações químicas e outros fenômenos relacionados. Ele oferece recursos robustos para resolver equações governantes baseadas no método dos volumes finitos, com suporte a diferentes modelos físicos e condições complexas. Reconhecido por sua precisão e eficiência, o *Fluent* permite análises detalhadas em diversas indústrias, como aeroespacial, automotiva, energia e saúde, sendo uma escolha confiável para o estudo de fenômenos fluido-dinâmicos e a otimização de projetos.

A abordagem utilizada na resolução do estudo térmico nestes modelos foi baseada no algoritmo de acoplamento "Coupled" ou "Acoplamento Total" (MALALASEKERA; VERSTEEG, 2007) e modelo de turbulência $k-\epsilon$ realizável, que é o modelo mais convencional para turbulência. Sua escolha foi considerando a capacidade computacional e acurácia dos resultados.

A simulação numérica para análise dos efeitos térmicos foi realizada assumindo um escoamento incompressível, viscoso e em regime transiente, com duração de 5 minutos e *time step* de 1 segundo. A malha analisada nos resultados possui tamanho de elemento de

0,04 m, formato tetraédrico, contendo 520.173 nós e 2.766.056 elementos conforme Figura 28.

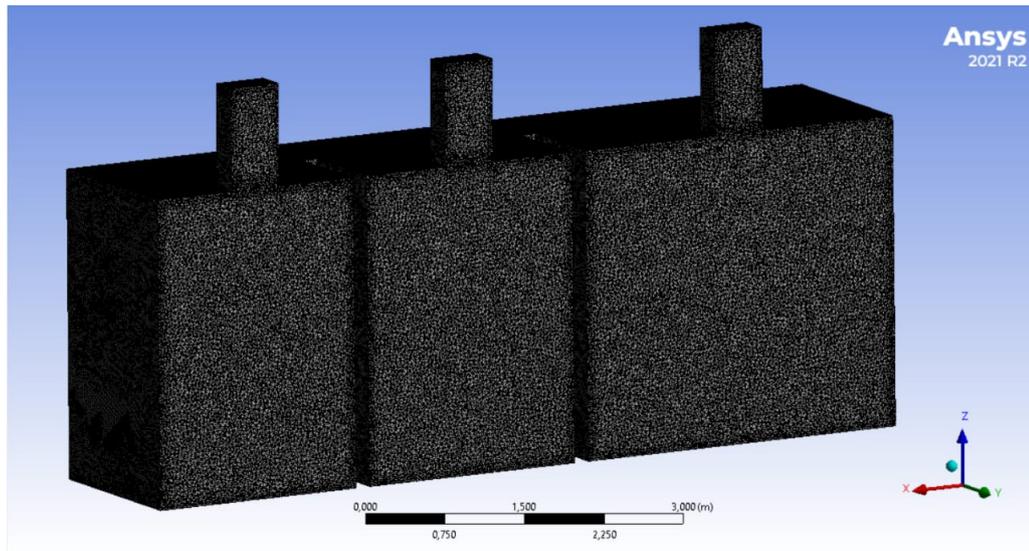


Figura 28: Modelo tridimensional sem escala da sala de cuidados clínicos em estudo discretizada em volumes finitos tetraédricos. Fonte: Elaboração Própria.

Para garantir a precisão e a confiabilidade da malha, foram aplicadas métricas de qualidade, com destaque para *Element Quality* e *Orthogonal Quality*. A métrica *Element Quality* avalia a qualidade dos elementos da malha com base na distorção geométrica em relação a uma forma ideal. Valores próximos de 1 indicam uma boa qualidade de elemento, enquanto valores baixos sinalizam distorções significativas, que podem comprometer a precisão das soluções. Dessa forma, elementos com baixa qualidade são ajustados ou refinados para assegurar a homogeneidade e a eficiência computacional da malha, minimizando erros numéricos e garantindo que os resultados representem adequadamente as características do escoamento e da troca térmica no ambiente estudado. Na Figura 29 encontra-se esta métrica para a malha apresentada.

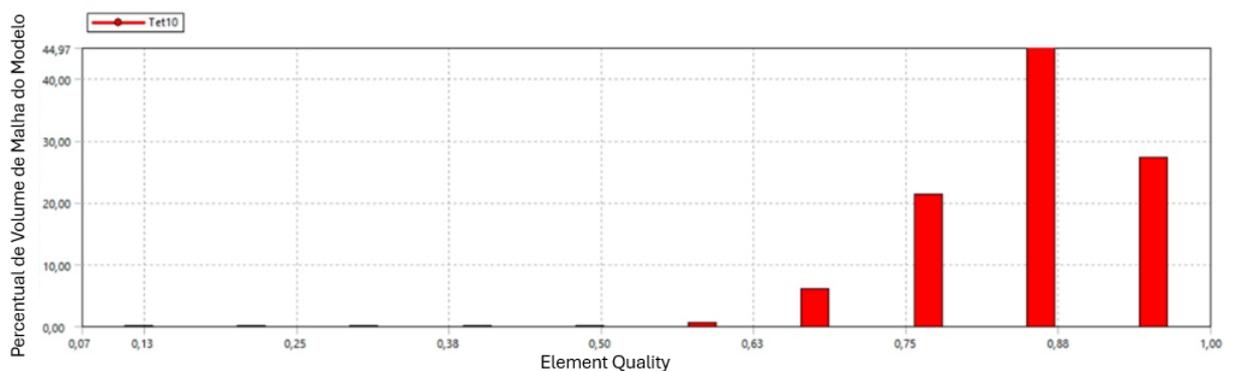


Figura 29: Métrica da malha de estudo Element Quality. Fonte: Elaboração Própria

A métrica *Orthogonal Quality* é igualmente importante para a avaliação da malha, pois mede o ângulo de ortogonalidade entre as faces dos elementos e as normais às superfícies adjacentes, sendo ideal para assegurar o alinhamento das células de controle em relação ao escoamento. A ortogonalidade é crucial para evitar gradientes espúrios nas regiões de alta variação de fluxo, especialmente em simulações de DFC. Valores ideais para a *Orthogonal Quality* estão entre 0,85 e 1, enquanto valores abaixo de 0,15 indicam baixa qualidade e necessitam ajustes. Em áreas críticas, como entradas e saídas de ar, a malha foi adaptada com refinamento progressivo para atender a esses critérios, visando garantir a estabilidade e a precisão dos cálculos em regiões de alto gradiente e promover a confiabilidade dos resultados na simulação do sistema UVGI em salas clínicas, na Figura 30 encontra-se esta métrica para a malha apresentada.

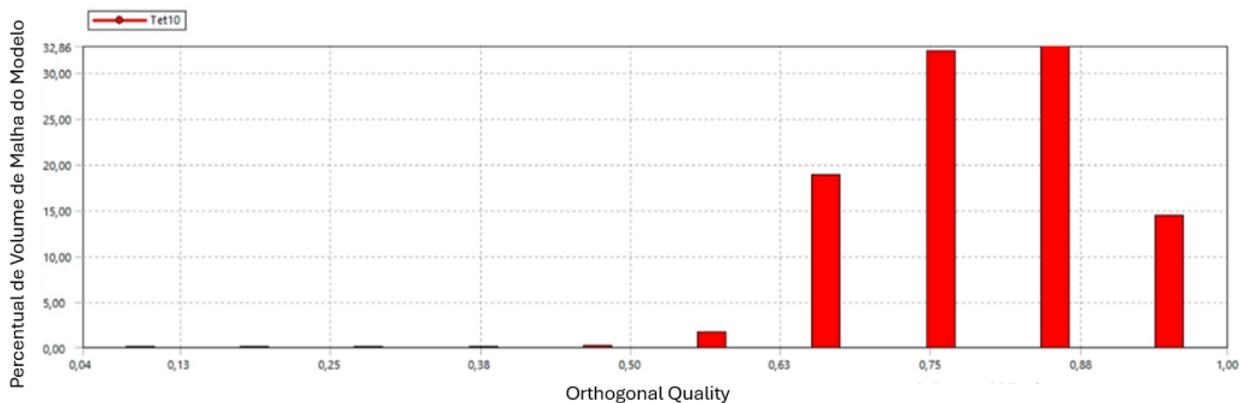


Figura 30: Métrica da malha de estudo *Orthogonal Quality*. Fonte: Elaboração Própria

O modelo de estudo do potencial de desinfecção foi feito apenas na região do duto, com configurações semelhantes à do estudo térmico, ou seja, algoritmo de acoplamento Coupled, modelo de turbulência $k-\epsilon$ realizável e discretização segunda ordem upwind que introduz precisão na resolução das equações diferenciais parciais do fluxo sem perder a estabilidade no cálculo. A simulação numérica foi realizada assumindo um escoamento incompressível, viscoso e em regime transiente, com tempo de 10 segundos e time step de 0,01 segundo, com limite máximo de 30 iterações por time step. A malha obtida possui um tamanho de elemento de 0,006 m, formato tetraédrico, contendo 2.783.791 nós e 1.962.436 elementos.

Como não existe uma solução analítica prévia para as variáveis do campo de fluxo nem um modelo específico disponível, foi desenvolvida uma solução numérica usando a malha mais refinada como referência para malhas menos detalhadas. Essa abordagem é

necessária devido à susceptibilidade das simulações de DFC a imprecisões decorrentes das etapas de discretização.

O processamento foi realizado considerando convergência do solver para os resíduos de simulação do escoamento em 10^{-4} . Também foram realizadas simulações com malhas em diferentes métricas para atestar a convergência do modelo.

Como apresentado anteriormente, para o teste de convergência de malha, foram feitas simulações com malhas com tamanho de elementos de 0,03 m, 0,05 m e 0,06 m, visando identificar o comportamento da solução e confirmar sua convergência. As análises foram baseadas na velocidade de entrada do ar do duto e sua dispersão ao longo de uma linha vertical no eixo z, localizada na região central de cada sala. Em todos os testes, foi calculado o erro quadrático ao longo desta linha.

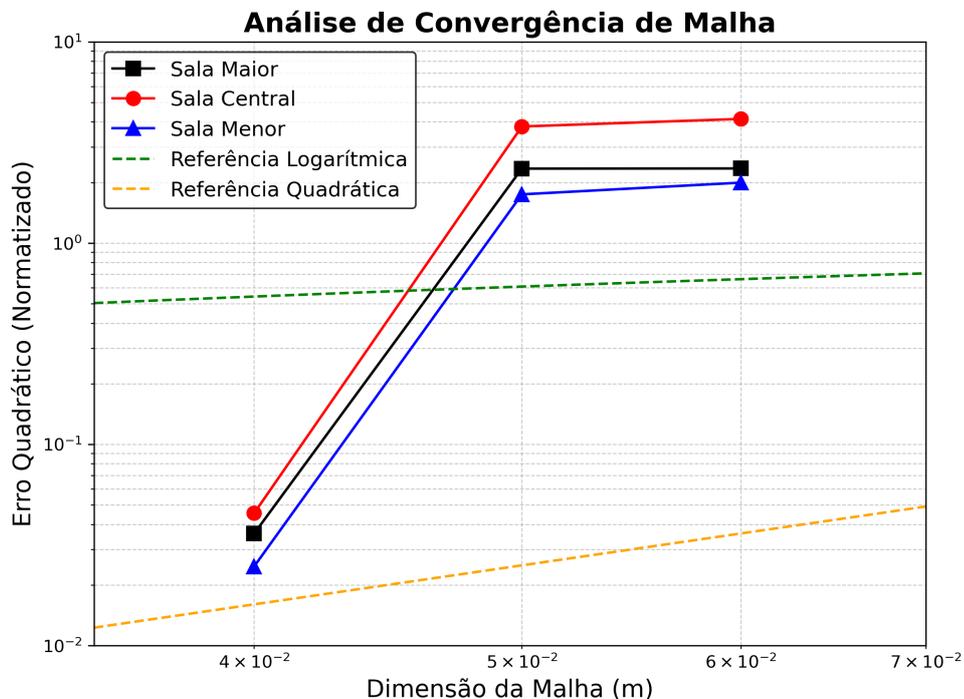


Figura 31: Erro Quadrático normalizado para cada malha de elemento analisada. Fonte: Elaboração Própria.

Foi observado que quanto maior a discrepância entre o tamanho da malha e a malha de referência, maior é o erro relativo, indicando que malhas mais grosseiras apresentam resultados menos precisos em comparação com a realidade. Por outro lado, quanto mais refinadas forem as células da malha, menor será esse erro. As comparações da sala com e sem equipamento, para o estudo térmico, foram baseadas em uma malha de 0,04 m. A escolha de uma malha de referência de 0,03 m foi feita para avaliar a confiabilidade da malha

de comparação, e os resultados demonstraram valores bastante próximos, indicando sua confiabilidade para toda a solução, ou seja, o teste de malha se mostrou adequado fornecendo resultados que demonstram a convergência da malha.

No estudo de potencial de desinfecção a malha foi mais refinada em virtude da precisão dos dados a serem obtidos, o que resultou em maior quantidade de elementos e nós, uma malha tetraédrica com modelo adaptativo em regiões de detalhes. Cada simulação deste modelo levou de 5 a 7 horas de processamento com limite máximo de 30.000 iterações. As simulações foram realizadas em servidor com processador I9-11900k e 64 gb de memória RAM.

3.4 Pós-Processamento e Relatório Manuscrito

O módulo utilizado no pós-processamento foi o *ANSYS Post-Processing*, integrado ao *ANSYS Workbench*, é uma ferramenta dedicada à visualização e análise dos resultados de simulações numéricas. Ele oferece recursos avançados para interpretar dados complexos, como distribuições de pressão, temperatura, tensões e fluxos, permitindo uma compreensão detalhada do comportamento físico dos sistemas simulados. Com uma interface intuitiva e opções personalizáveis, é possível gerar gráficos, animações e relatórios de alta qualidade para comunicar os resultados com precisão. Amplamente utilizado em diversas áreas da engenharia, o *ANSYS Post-Processing* é essencial para validar projetos e auxiliar na tomada de decisões com base nos resultados das análises computacionais.

Para obtenção das amostras de análise qualitativa e quantitativas a avaliação foi feita nos dois modelos de estudo de forma distinta. Para o modelo de análise hidrodinâmica e térmica realizou-se análise horizontal considerando o plano a 1,5 [m] de altura no modelo, e vertical no plano de corte das lâmpadas. A altura de 1,5 [m] foi definida devido ser a altura padronizada para viés conformidade, de acordo com a Re. N° 09/2003 da ANVISA. Para este caso, as propriedades investigadas foram velocidade e temperatura da sala, adotando-se os padrões aceitos nas normas já citadas como referência. A comparação foi feita entre o modelo com os equipamentos inseridos e o modelo sem equipamentos.

A análise quantitativa deste modelo foi realizada no perfil vertical. Foram traçados linhas verticais dentro do raio de influência do equipamento UVGI, de 0,85 [m]. Para este caso foram coletados 10 pontos igualmente espaçados dentro dessas linhas da altura 0,8 [m] a 2,8 [m], nas quadros direções norte, oeste, sul e leste para cada sala, totalizando 40 pontos

de análise para cada sala. A representação direcional pode ser identificada na Figura 32. A análise foi realizada em um retrato instantâneo em 5 minutos de simulação, tempo arbitrado por ser suficiente para a uniformização do comportamento do escoamento dentro do volume do modelo.

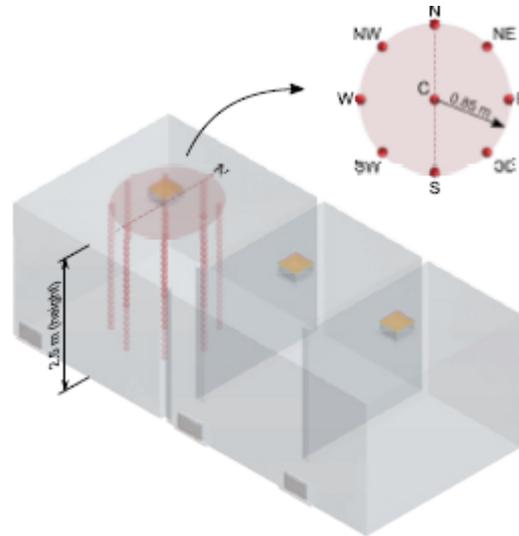


Figura 32: Linhas e Pontos de Amostragem para Análise Térmica. Fonte: Elaboração Própria.

A análise do potencial de desinfecção foi feita avaliando-se a fração volumétrica de água em função da influência térmica das lâmpadas UV-C no escoamento. Foram 40 amostras retiradas do plano localizado a 0,05 [m] depois das lâmpadas. Esses pontos foram obtidos em linhas igualmente espaçadas traçadas sobre o plano que se encontra após a influência da lâmpada. Essas linhas foram traçadas imediatamente abaixo das lâmpadas, uma linha para cada lâmpada, em cada linha foi retiradas 10 amostras igualmente espaçadas conforme a Figura 33.

A temperatura de operação do termo fonte deste estudo, lâmpada instalada no duto, foi de 100 °C. A análise numérica do potencial de desinfecção foi feita comparando os resultados numéricos com a formulação teórica apresentada na revisão, para tanto o tempo de exposição teórico considerado baseou-se na velocidade de entrada do escoamento e sua trajetória na área de influência da lâmpada, enquanto que na numérica foi considerado o instante mais significativo da simulação computacional. O tempo considerado para extração dessas informações na simulação foi no instante de 10 segundos, determinado como suficiente para cobrir a ação da lâmpada UVGI sobre o escoamento multifásico.

Ao todo a análise foi baseada em 4 modelos, sendo eles: simulação da sala sem e com o equipamento UVGI móvel para o estudo hidrodinâmico e térmico, e simulação do arranjo

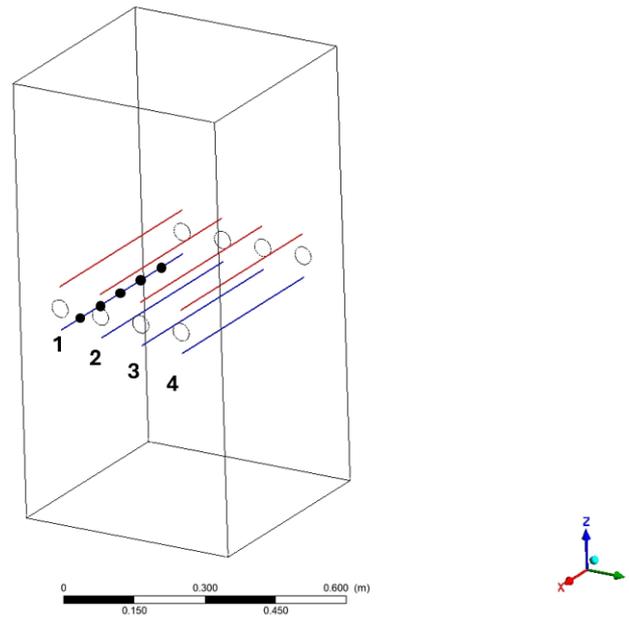


Figura 33: Linhas e Pontos de Amostragem para Análise de Desinfecção. Fonte: Elaboração Própria.

com lâmpadas perimetrais e transversais no duto para estudo do potencial de desinfecção. Com dados obtidos foram realizadas análises quantitativas e qualitativas para criticar as hipóteses levantadas baseando-se nas literaturas referenciadas nesta pesquisa. O resultado foi compilado em um relatório científico foi incorporado a esta tese.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise de Influência Hidrodinâmica e Térmica na Sala

Como apresentado anteriormente, o estudo de interferência hidrodinâmica e térmica foi realizado com cortes nos planos horizontais e verticais do modelo. Os resultados foram analisados observando as determinações das normas especificamente sobre as características de velocidade de circulação e temperatura da sala.

4.1.1 Plano Horizontal de Temperatura

O procedimento de verificação inicial foi realizado analisando os planos de corte horizontal a uma altura fixa de 1,5 metro em relação ao piso das três salas, figura Figura 34. Este plano foi utilizado para identificar as áreas com temperatura mais elevada, conhecidas como *hotspots*.

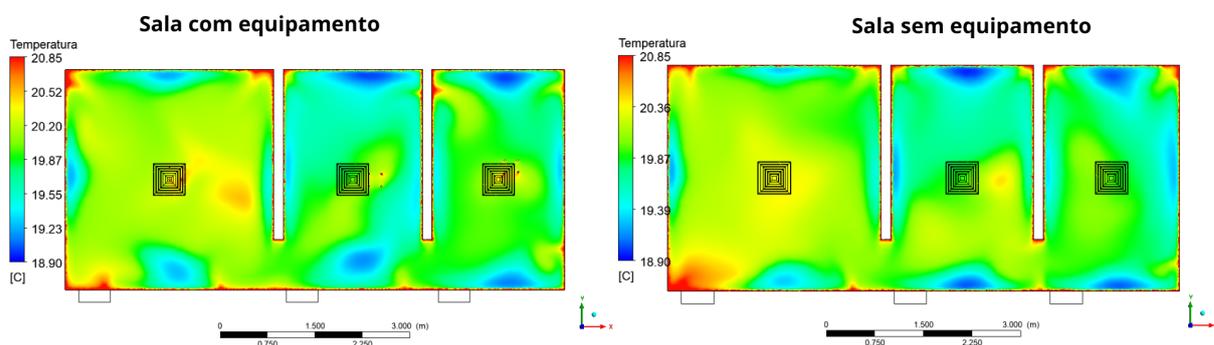


Figura 34: Plano horizontal de temperatura. Fonte: Elaboração Própria

Na sala 1, após a instalação do equipamento móvel, observou-se uma mudança na distribuição da temperatura. Antes da instalação, a área de temperatura mais elevada estava centralizada, mas com a presença do equipamento, houve uma dispersão mais eficiente do, deslocando essa área para uma região lateral da sala. No entanto, isso resultou na formação de um novo ponto quente próximo a outra sala.

Na sala 2, foi observada a formação de um *hotspot* na região próxima à sala 3. Isso ocorreu devido ao padrão de circulação do ar, onde idealmente o ar mais quente deveria ser expelido pelo *outlet*, mantendo o ambiente uniformemente climatizado. Porém, um vórtice foi criado, direcionando o ar quente de volta para o ambiente, gerando o *hotspot*. Com a introdução do equipamento móvel, notou-se uma dissipação da concentração de

calor. A geometria do equipamento, localizado na região mais quente, promoveu melhores arejamento e recirculação do fluxo de ar, eliminando assim a área de temperatura elevada e mantendo a concentração de calor apenas na área influenciada pelo equipamento.

Em uma análise, a luz das normatizações para as condições encontradas, observa-se que as temperaturas flutuam entre 19,5°C e 20,5°C em grande parte do modelo, o que proporciona atendimento parcial (condições de inverno) às condições de conforto definidas tanto pela NBR 16401-2 (2008) e pela resolução 09 da ANVISA (2003). Na NBR 7256 (2022) o ambiente encontra-se próxima ao limite inferior do recomendado, sendo assim, sugerido para este caso o aumento da temperatura de insuflamento.

4.1.2 Plano Horizontal de Velocidade

O plano de velocidade teve como objetivo identificar como o fluxo do ar se distribuiu ao longo sala, o resultado está ilustrado na Figura 35.

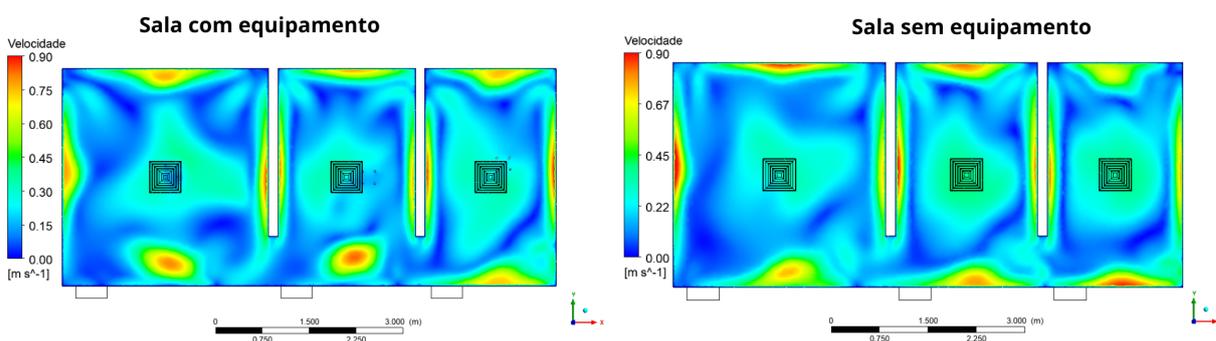


Figura 35: Plano horizontal de velocidade. Fonte: Elaboração Própria

Foram examinados os planos de velocidade com e sem a presença do equipamento no plano horizontal a 1,5 metro do piso. É evidente que a introdução de uma nova geometria influencia as mudanças no fluxo de velocidade do ar. Em todas as três salas, é observável a formação de um vórtice na região mediana do primeiro e segundo compartimentos. A presença do equipamento permite uma distribuição uniforme do ar por toda a sala, especialmente notável na sala 1. Essa redistribuição não apenas resulta em menor concentração de calor, como demonstrado na Figura 34, mas também tende a reduzir a quantidade de pontos de estagnação. Esses pontos são propícios para a formação de ambientes favoráveis ao desenvolvimento de germes e vírus. Portanto, a presença do equipamento não só melhora a circulação do ar, mas também contribui para a criação de um ambiente mais saudável e

seguro.

Embora alguns picos de velocidade tenham sido identificados, chegando a valores de 0,9 [m/s], o intervalo de velocidade identificado ficou entre 0,15 [m/s] e 0,3 [m/s], este comportamento atende os requisitos normativos estabelecidos na NBR 16401-2 (2008) e da resolução 09 da ANVISA (2003).

4.1.3 Plano Vertical de Temperatura

Na análise da Figura 36, foi feito um corte no plano vertical a 1,73 metro da entrada, posicionando-se mais próximo ao centro de cada um dos equipamentos UVGI. Essa análise visava compreender se a instalação do equipamento móvel proporcionaria um melhor espalhamento do perfil de temperatura.

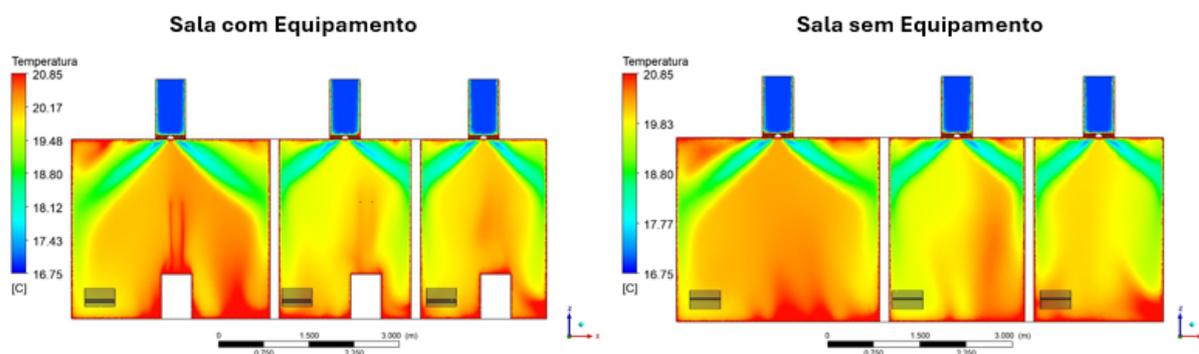


Figura 36: Plano vertical de temperatura. Fonte: Elaboração Própria

Observa-se que os três equipamentos geram calor próximo às quatro lâmpadas UV-C como esperado. No entanto, ao relacionar a Figura 36 com a Figura 35, é possível identificar que, mesmo com a introdução de equipamentos que geram carga térmica no ambiente, a dissipação de energia foi mais eficaz. Isso se deve aos vórtices formados pelo fluxo de ar ao colidir com a geometria inserida. Como resultado, as regiões de concentração de calor permaneceram estagnadas apenas na área de influência das lâmpadas e em suas proximidades. Além disso, devido ao equipamento, a climatização da região se tornou mais uniforme.

O mesmo comportamento do plano horizontal é observado neste caso, porém a distribuição de temperatura neste plano encontra-se em uma faixa superior ao plano horizontal, ficando entre 20°C e 20,5°C, ainda assim o atendimento as normas NBR 16401-2 (2008) e da Resolução 09 da ANVISA (2003) continua sendo parcial (condições de inverno), enquanto que a NBR 7256 encontra-se atendida em seu limite mínimo recomendado. As temperaturas

mais frias se encontram na região superior da sala, onde ocorre a transição entre o duto e o ambiente da sala, enquanto que as mais quentes nas regiões imediatamente opostas.

4.1.4 Plano Vertical de Velocidade

Na análise da Figura 37, outro plano foi examinado sob as mesmas condições do plano 3, porém para a circulação do ar através das faixas de velocidades. Foi observado no plano vertical uma taxa de variação de 0 a 0,6 [m/s], sendo essa a taxa de velocidade do ar que está circulando dentro do ambiente, sendo possível entender melhor como a distribuição do ar ocorreria ao longo do contorno vertical da sala e como o equipamento influenciaria nessa distribuição.

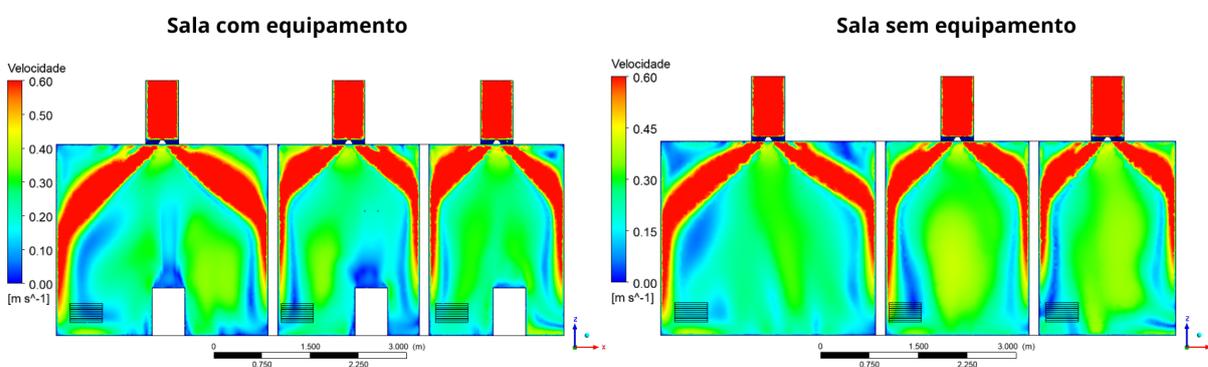


Figura 37: Plano vertical de velocidade. Fonte: Elaboração Própria

Dentro do plano de ação, é evidente que o equipamento móvel tem um impacto direto na circulação do ar no ambiente. Como observado na Figura 35, o fluxo de ar tende a se dispersar melhor para as regiões laterais. Ao examinar a Figura 37, também é possível observar essa realocação do fluxo para as regiões laterais, conforme esperado. A presença da geometria resultou em uma distribuição uniforme do ar em todo o ambiente.

Observa-se que o comportamento da velocidade no plano vertical acompanha o comportamento do espectro da temperatura no mesmo plano, de forma que as velocidades mais altas são observadas na transição entre o duto e a região interna da sala. Nestas regiões velocidades de 0,6 [m/s] podem ser alcançadas. Porém, o modelo possui seu comportamento médio de velocidade ainda entre 0,20 [m/s] e 0,30 [m/s], seguindo perfil semelhante ao corte horizontal, também atendendo as normas específicas.

4.1.5 Análise de Distribuição Vertical

A análise foi conduzida através de gráficos de dispersão de temperatura em função da altura, divididos em quatro direções: norte, oeste, sul e leste, para cada uma das salas, totalizando doze gráficos. Foram selecionados 10 pontos ao longo da altura, variando de 0,8 [m] (próximo ao início da lâmpada) até 2,8 [m] (próximo ao teto das salas), visando entender a área de interferência que as lâmpadas causariam em cada sala.

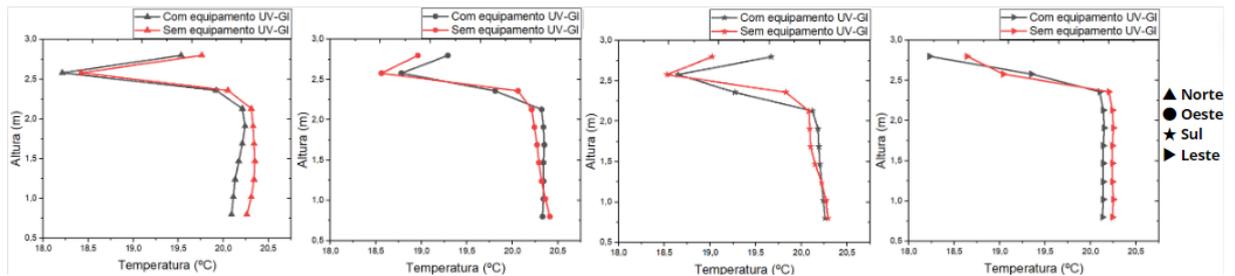


Figura 38: Gráfico de dispersão - Sala 1. Fonte: Elaboração Própria

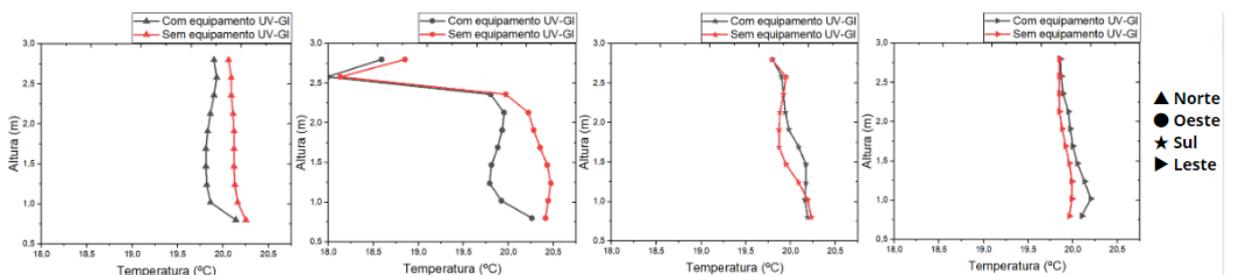


Figura 39: Gráfico de dispersão - Sala 2. Fonte: Elaboração Própria

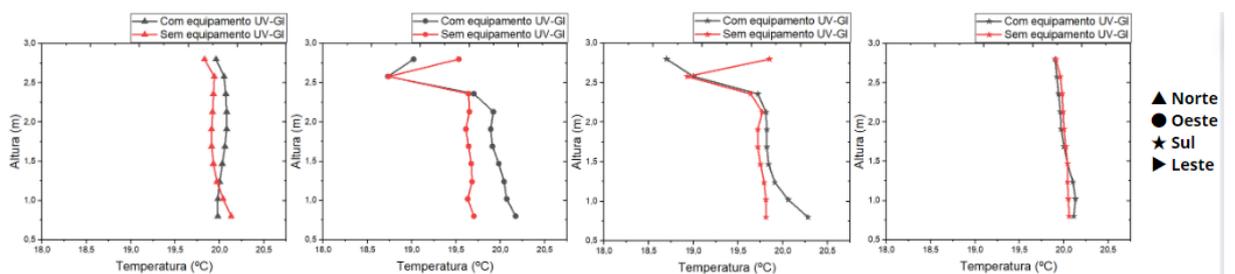


Figura 40: Gráfico de dispersão - Sala 3. Fonte: Elaboração Própria

Após várias revisões, determinou-se que o raio de interferência na sala 1 seria de até 0,6 [m], na sala 2 seria de 0,3 [m] e na sala 3 de 0,4 [m]. As lâmpadas possuem um comprimento de 1,2 [m], o que significa que a área de atuação das lâmpadas seria mais evidente até a altura de 2 [m]+(raio de influência). Ao observar graficamente, notou-se que os pontos a partir de 2,5 metros se destacam em algumas direções devido à influência do regime turbulento causado

pela parede, resultando em *outliers*. Portanto, para identificar a influência da lâmpada, os pontos acima foram descartados. Idealmente, esperava-se que as áreas próximas às lâmpadas apresentassem valores de temperatura mais altos em comparação com a situação sem o equipamento, no entanto, isso não foi observado em todas as direções.

Para a sala 1, representada no gráfico, as diferenças de temperatura foram identificados como resultado da Tabela 9.

Tabela 9: Diferença na temperatura média da sala, com e sem o equipamento, foi calculada considerando os pontos cardeais extraídos ao longo do eixo Z, excluindo aqueles localizados a partir de 2,5 metros.

Direção	Sala 1	Sala 2	Sala 3
Norte	-0,115°C	-0,258°C	0,068°C
Oeste	0,303°C	-0,403°C	0,308°C
Sul	0,030°C	0,078°C	0,015°C
Leste	-0,108°C	0,115°C	0,009°C

Na sala 2, observou-se um *hotspot* causado pelo vórtice gerado a partir de parte do fluxo direcionado ao *outlet*. Esse fenômeno resultou em uma maior concentração de calor nas regiões norte e oeste para o modelo sem equipamento. Em contrapartida, na simulação com o equipamento, esse efeito foi dissipado. Assim, mesmo considerando a utilização do equipamento com um raio de interferência reduzido, é esperado que as direções norte e oeste apresentem valores menores de temperatura do que na ausência do equipamento. Essa hipótese foi confirmada a partir dos dados extraídos e apresentados na Tabela Tabela 9.

Como não houve *hotspots* evidentes e mudanças significativas no direcionamento do fluxo no ambiente, o resultado da sala 3 demonstrou a influência da lâmpada com maior evidência, sendo possível notar o efeito do equipamento UVGI na potência indicada. Os resultados obtidos também foram demonstrados na Tabela 9:

4.1.5.1 Análise de Distribuição de Pontos Cardeais

Os gráficos de radar foram gerados a partir das diferenças de temperatura de cada sala, com e sem equipamento, tornando mais evidente quais apresentaram temperaturas médias mais altas. As discrepâncias esperadas para cada sala podem ser explicadas através da Figura 41 e pelas análises anteriores.

Na sala 1, por exemplo, a concentração de calor com o equipamento ficou retida principalmente na direção oeste. Além disso, observou-se que o fluxo de ar se desenvolveu

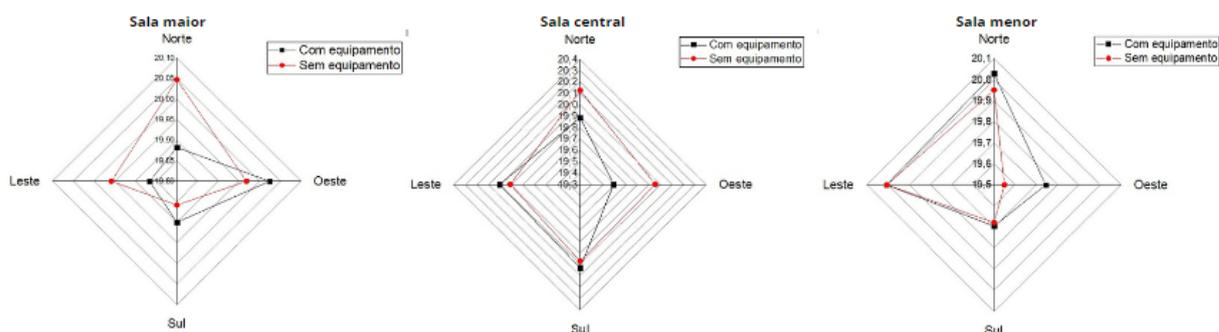


Figura 41: Gráfico de radar da distribuição de temperatura nas salas com e sem equipamento. Fonte: Elaboração Própria

de forma mais eficiente na região norte, resultando em um melhor espalhamento e consequente resfriamento nessa área, gerando variações mais significativas. Esse espalhamento foi facilitado pela alocação do equipamento móvel, demonstrando que além de não exercer uma influência significativa na temperatura do ambiente, ele ainda desempenha o papel de eliminar agentes patogênicos presentes.

Na sala 2, como já identificado, o equipamento, quando posicionado na região do *hotspot*, promoveu uma melhor aeração do ambiente, resultando em reduções de temperatura nas regiões norte e oeste, enquanto praticamente não houve aumento térmico nas regiões sul e leste.

Na sala 3, o equipamento conseguiu dissipar um pouco da temperatura nas direções leste e sul do ambiente. Porém, ainda se observou um leve aumento de temperatura nessa área em comparação com o restante do ambiente, mantendo apenas o aumento de temperatura na sua área de interferência.

A partir das diferenças de temperatura obtidos para cada sala, ficou demonstrado que o equipamento UVGI instalado não provocou mudanças significativas na temperatura, sendo o maior registro de aumento de temperatura de apenas 0,308 °C. Isso sugere que a potência utilizada foi insuficiente para causar variações notáveis na temperatura do ambiente. Logo, é possível considerar o aumento do número de lâmpadas para ampliar a área de desinfecção ou aumentar a potência visando a eliminação mais rápida dos agentes patogênicos. Um fator importante que também contribuiu para a baixa variação de temperatura no ambiente é a presença de anteparos e objetos, que modificam o fluxo de distribuição de ar, promovendo a recirculação do ar no ambiente.

Sendo assim, a hipótese de uso do UVGI inserido dentro da sala de cuidados clínicos alterar significativamente as características de conforto térmico, devido ser uma fonte de calor

no ambiente, não é verdadeira, esta investigação pressupõem com os dados apresentados que a utilização destes equipamentos não interfere diretamente na sensação térmica dos ocupantes de maneira significativa, não sendo este um limitante para o seu uso.

4.2 Análise de Potencial de Desinfecção Através de Escoamento Multifásico

Como abordado anteriormente o estudo do potencial de desinfecção será realizado através da comparação entre as taxas de desinfecção do modelo teórico e do modelo numérico para as diferentes configurações de instalação das lâmpada UV-C no duto (perimetral e transversal). A análise será realizada através da obtenção de amostras contidas no plano anterior e após a zona de influência das lâmpadas UV-C.

4.2.1 Análise de Sobrevivência e Potencial Desinfecção Teóricos em Função do Tempo

Considerando que a irradiância média de cada lâmpada foi estabelecida em 1,97 [m.W/cm²], e que a velocidade de inativação conceituada para o SARS-CoV-2 (e outros corona vírus) é de 0,16 [cm²/m.J] é possível traçar uma função de sobrevivência viral (S) dada pela equação 4.1.

$$S = e^{-0,3152 \cdot t} \quad (4.1)$$

Em que S é a fração de sobrevivência e t é o tempo de exposição. Com este dado é possível obter também a taxa de desinfecção em função do tempo de exposição, que é encontrada através da equação 2.7. A Figura 42 apresenta a relação entre fração de sobrevivência e a taxa de desinfecção em função do tempo de exposição.

O tempo de exposição a lâmpada UV-C no estudo de desinfecção foi calculado através do percurso que o escoamento faz próximo a área de influência da lâmpada. Esse percurso é de 0,05 m e foi feito à velocidade de 1 m/s, o que apresenta um tempo de exposição dentro da área de influência adotada de 0,05 segundos.

Considerando a exposição à lâmpada no tempo calculado, obtém-se uma estimativa de sobrevivência de aproximadamente 98,44% do vírus SARS-CoV-2, por consequência uma taxa de inativação de 1,56%.

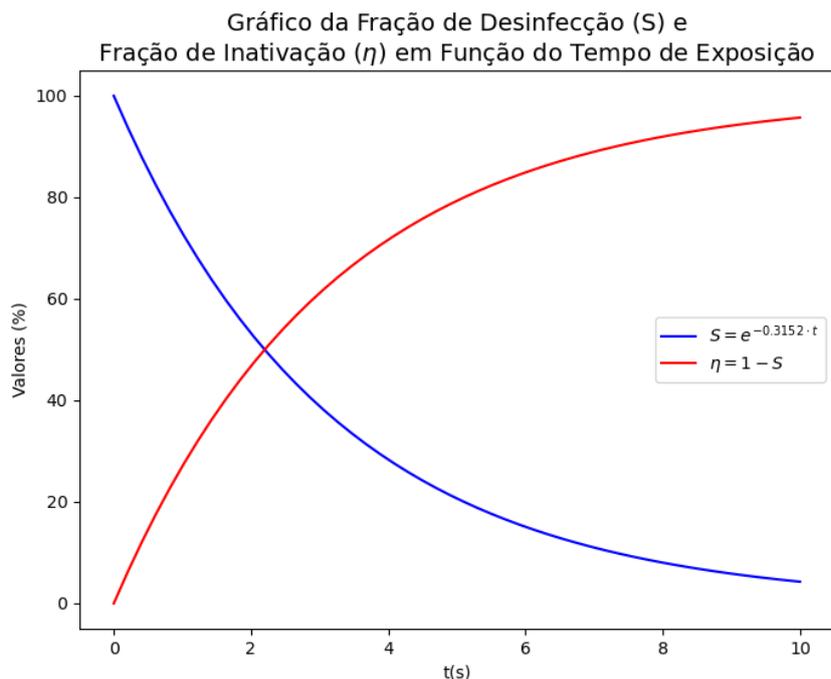


Figura 42: Fração de Sobrevivência e Taxa de Desinfecção em Função do Tempo de Exposição. Fonte: Elaboração Própria

Essa situação se mostra desfavorável à desinfecção, pois a taxa está abaixo do recomendado por normas, que variam entre valores de 99% a 99,99% em ambientes hospitalares (ASHRAE, 2020b; CDC, 2003).

Essa situação desfavorável ocorre devido ao tempo de exposição ter sido abaixo do necessário para desinfecção. Para obter a taxa sugerida nas normas, o tempo de exposição deveria ser de 14 a 16 segundos. Esse valor é possível de ser alcançado considerando os processos de recirculação e turbulência, que são comuns em escoamentos reais. Se for considerado o tempo de exposição sugeridos pelo calculado observa-se uma relação de 280 a 320 vezes que pode ser alcançada por diversas estratégias, desde aumentar a quantidade de carreiras de lâmpadas UV-C, aumentar a irradiância média das lâmpadas UV-C (utilizando até lâmpadas de média pressão de mercúrio) ou modificação do projeto do sistema de distribuição, a fim de favorecer a exposição do escoamento ao sistema de inativação. Considerando que o objetivo é validar o modelo multifásico para estabelecer uma relação entre o potencial de desinfecção teórico e o numérico, considerando uma carreira de lâmpadas instaladas, será utilizado como referência o valor de taxa de inativação de 1,56% teórica para o modelo.

4.2.2 Análise de Sobrevivência e Potencial Desinfecção Numérico em Função da Temperatura

Para este estudo serão avaliados os resultados numéricos dos modelos transversal e perimetral, baseados nos 40 pontos da amostra retirados dos planos anterior e posterior a zona de influência da lâmpada UV-C, conforme Figura 43.

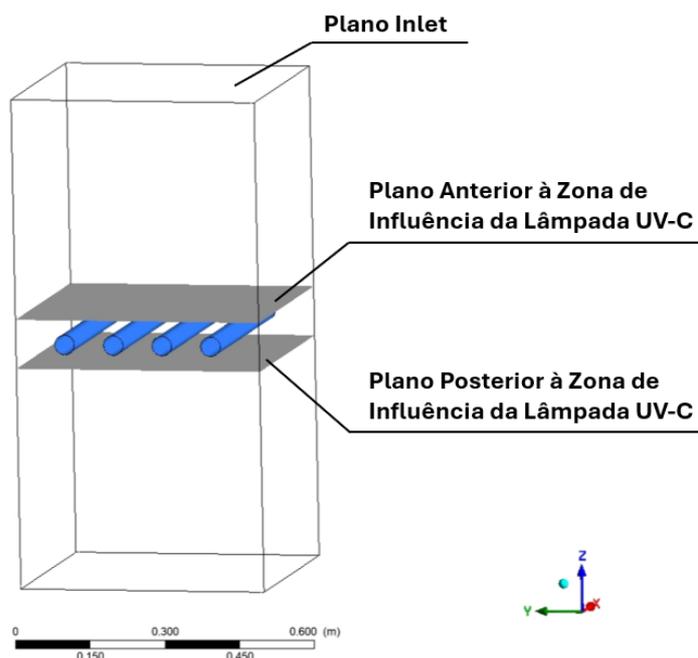


Figura 43: Localização dos Planos que Contêm as Amostras para Análise Numérica. Fonte: Elaboração Própria

4.2.2.1 Análise de Sobrevivência e Potencial Desinfecção Numérico: Modelo Transversal

Na Figura 44 é apresentada a fração volumétrica e temperatura no plano antes da zona de influência da lâmpada. Observa-se que antes da lâmpada as propriedades do *inlet* são consideradas predominantes, não havendo (nesta localização) influência da lâmpada nas propriedades analisadas do escoamento, portanto observa-se uniformidade em relação a distribuição da fração volumétrica e temperatura.

Após a lâmpada, constata-se mudanças nos perfis de fração volumétrica de água e da temperatura (Figura 45). O valor de fração volumétrica máxima neste gráfico é identificado como 0,1014% e o valor mínimo 0,09061%, a diferença entre os dois valores extremos é de 0,0107, ou seja 1,07% de fração de água é perdida em detrimento do contato com a lâmpada

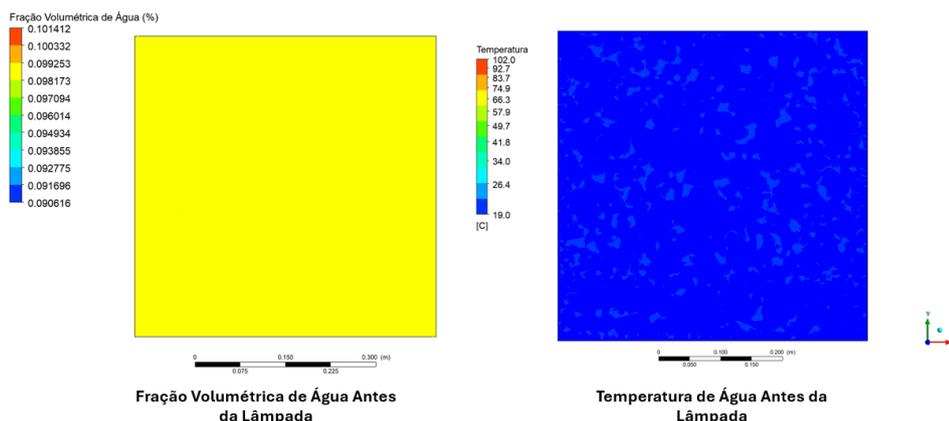


Figura 44: Fração Volumétrica de Água no Plano Horizontal Antes da Zona de Influência da Lâmpada UV-C Transversal. Fonte: Elaboração Própria.

UV-C.

Ainda conforme a Figura 45, o valor máximo de temperatura é de $21,133^{\circ}\text{C}$ e mínimo de $18,979^{\circ}\text{C}$, proporcionando uma faixa de $2,15^{\circ}\text{C}$ de diferença de temperatura global do escoamento. Esta diferença pode gerar mudanças na temperatura do ambiente interno da sala, porém ainda dentro do admissível nas normas anteriormente apresentadas.

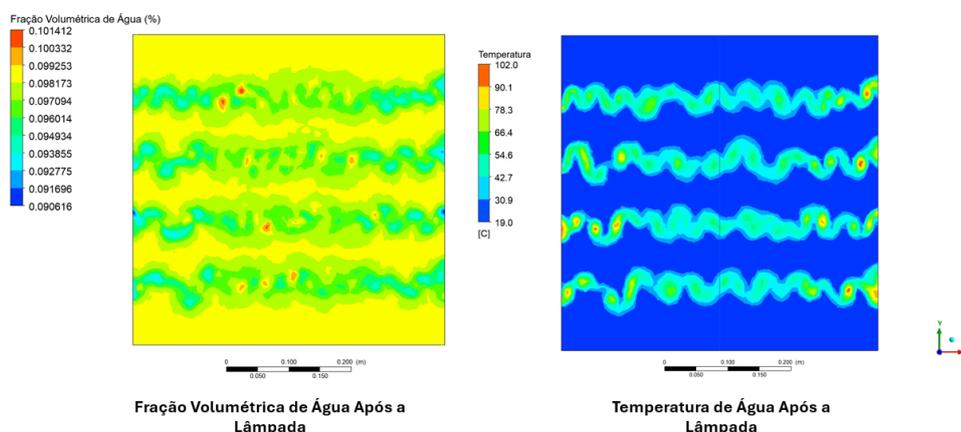


Figura 45: Fração Volumétrica de Água no Plano Horizontal Após a Zona de Influência da Lâmpada UV-C Transversal. Fonte: Elaboração Própria.

Na Figura 46 é apresentado um gráfico *boxplot* para identificação da dispersão dos valores obtidos para fração volumétrica considerando as 4 linhas igualmente distribuídas, e contidas no plano inferior das lâmpadas. Pelo gráfico é possível identificar que as amostras centrais, pertencentes às linhas 2 e 3, apresentam maior dispersão nos valores de fração mássica, explicado pela sobreposição da influência das lâmpadas laterais na região central do duto. O valor médio encontrado foi de $9,671\%$, apresentando uma taxa de evaporação de $0,329\%$. A linha 4 possui uma maior dispersão dos valores obtidos.

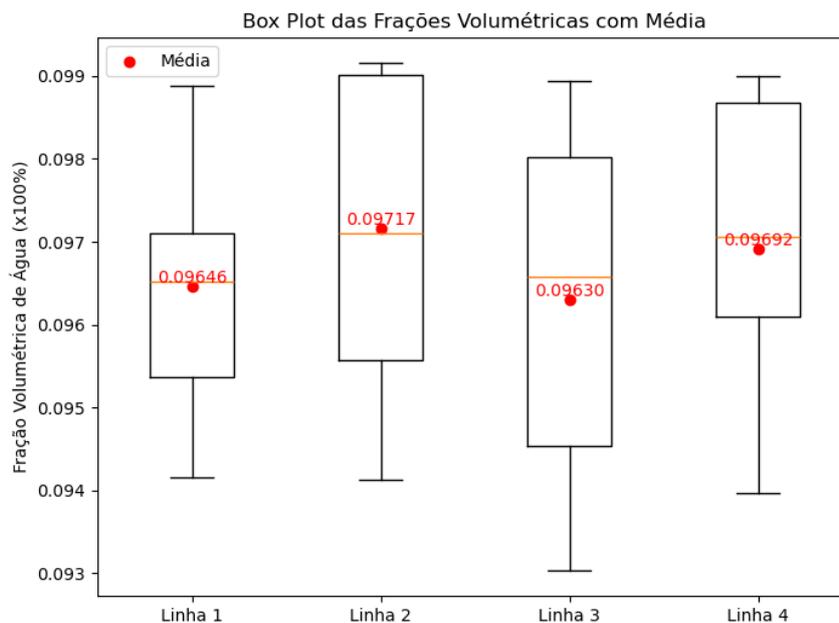


Figura 46: Boxplot da Fração Volumétrica em Cada Linha de Análise. Fonte: Elaboração Própria.

A Figura 47 apresenta a dispersão da temperatura após a zona de influência da lâmpada UV-C, neste gráfico foi observado que as linhas 2, 3 e 4 apresentaram *outliers*, ou seja amostras com valores de temperatura fora da dispersão dos quartis. Também é possível constatar maiores dispersões de temperaturas na linha 1, que são as amostras mais próximas à lateral do duto, assim como observou-se medianas de temperatura mais baixas nas linhas centrais. A média geral de temperatura das amostras, após as lâmpadas foi de $19,694^{\circ}\text{C}$, havendo uma elevação de $0,694^{\circ}\text{C}$ na temperatura global considerando a temperatura de *inlet* de 19°C , ocasionado pela influência térmica das lâmpadas.

Tanto na análise de temperatura quanto na análise de fração volumétrica de água os perfis verticais apresentam formação de zonas de esteira influenciadas pelas lâmpadas UV-C, essas zonas de esteira podem influenciar o restante do escoamento após a zona de influência da lâmpada UV-C. A Figura 48 apresenta a mudança de forma gráfica para as duas grandezas de análise fração volumétrica de água e temperatura. É possível aumentar a área de influência, diminuindo o espaçamento de passagem acrescentando mais lâmpadas a fileira, porém ao fazer isso podem ser associados efeitos fluidodinâmicos ao escoamento que gerem menor vazão para o ambiente, afetando o conforto térmico, por outro lado pode gerar maior pressão no duto e solicitando maior esforço do sistema de condicionamento de ar.

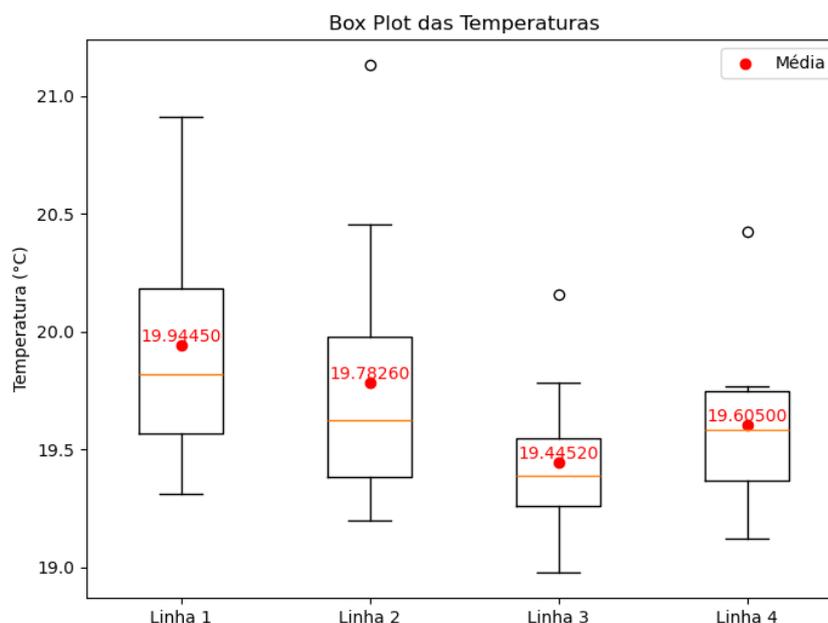


Figura 47: Boxplot da Temperatura em Cada Linha de Análise. Fonte: Elaboração Própria.

Também é possível analisar a tendência do comportamento da fração volumétrica de água no escoamento em função do gradiente da temperatura. Para realizar esta análise é necessário plotar cada amostra com seu valor de temperatura e fração volumétrica de água. A dispersão dos pontos podem ser aproximadas a uma curva polinomial para demonstrar o seu comportamento. A Figura 49 apresenta a dispersão das amostras e sua respectiva curva de aproximação. O erro acumulado de cada curva é apresentado na tabela Tabela 10.

Tabela 10: Erro Acumulado do Polinômio de Ajuste.

Linha de Análise	Polinômio	Erro
Linha 1	3º grau	0,3369
Linha 2	2º grau	0,4228
Linha 3	2º grau	0,2365
Linha 4	3º grau	0,1454

As curvas referentes às linhas 1 e 4 estão mais próximas às laterais dos dutos, apresentando curvas polinomiais de 3º grau, porém tendências contrárias. As linhas 2 e 3, associadas a região central do duto possuem curvas com tendências semelhantes e se aproximam a função polinomial de 2º grau.

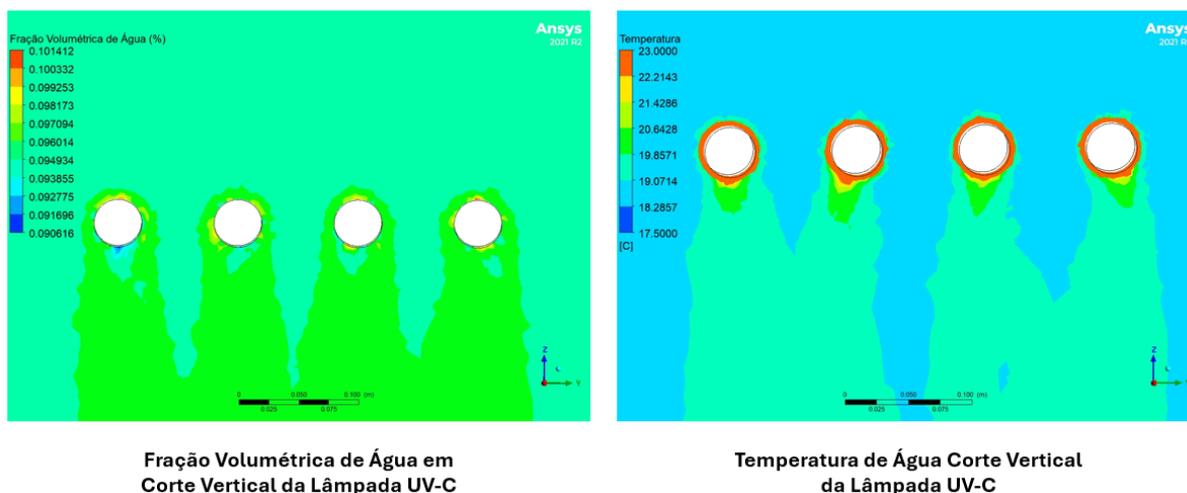


Figura 48: Fração Volumétrica e Temperatura em Corte Vertical na Zona de Influência das Lâmpadas UV-C Transversal. Fonte: Elaboração Própria.

4.2.2.2 Análise de Sobrevivência e Potencial Desinfecção Numérico: Modelo Perimetral

O modelo perimetral fornece um comportamento ineficiente para desinfecção, pois não há dispersão dos efeitos da lâmpada UV-C no plano do escoamento. Pelo contrário, os efeitos ficam concentrados apenas nas regiões perimetrais, ou seja na lateral do duto. No caso perimetral, a zona de efeito limitada a 0,05 m de distância da lateral do duto como é possível de identificar na Figura 50. Em termos de área de influência no plano de análise, a configuração perimetral apresenta 0,08 m², enquanto a configuração transversal a área de influência é de aproximadamente 0,38 m², ou seja, a configuração transversal influencia 4,75 vezes mais a área do escoamento.

A configuração perimetral apresenta valor mínimo de fração volumétrica de água de 9,342% enquanto que o valor máximo é de 10,0%, proporcionando perda máxima de 0,658%. Os efeitos na temperatura, porém, são mais acentuados do que no caso da configuração transversal, tendo valor mínimo de 18°C e valor máximo de 23°C, com gradiente máximo de temperatura de 5°C. Este comportamento pode ser explicado pela formação de zonas de esteira térmica na lateral do duto, provenientes da separação do escoamento que ocorre após a porção medial da geometria da lâmpada.

A esteira térmica é potencializada pela geometria das paredes do duto, e, apesar de não haver efeitos térmicos diretamente definidos para essas superfícies, é importante compreender as condições de contorno associadas. A definição de uma superfície como *wall* em simulações computacionais no ANSYS, com a equação de energia ativada, estabelece

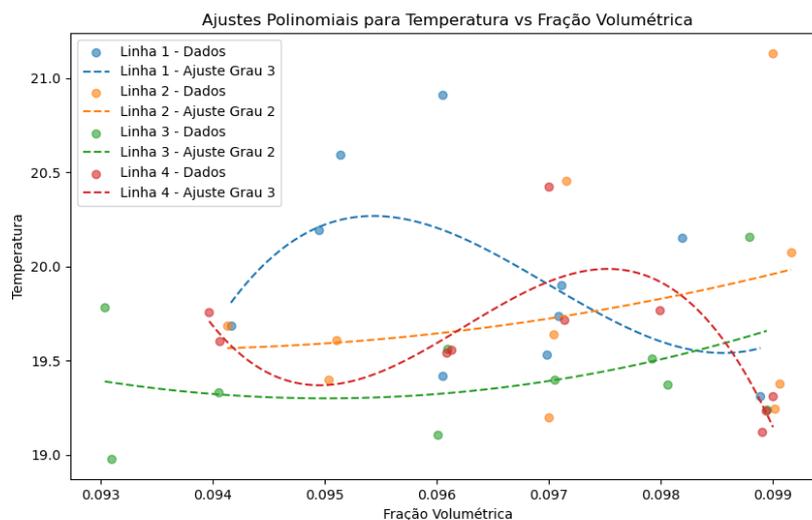


Figura 49: Gráfico da Temperatura em Função da Fração Volumétrica de Água com Curvas de Ajuste. Fonte: Elaboração Própria.

parâmetros específicos para modelar as interações entre o fluido e a superfície sólida. No presente caso, como não foram atribuídos efeitos térmicos à parede, o comportamento modelado reflete uma condição adiabática implícita ou a ausência completa de troca de calor. Isso implica que a superfície é considerada termicamente isolada, sem transferência de calor por condução, convecção ou radiação entre a parede e o fluido adjacente.

Contudo, mesmo com essa simplificação térmica, não se pode negligenciar a influência indireta da parede sobre o comportamento do escoamento. A geometria da superfície *wall* desempenha um papel crucial na formação e propagação de zonas de recirculação e de esteira térmica. Essas zonas são diretamente influenciadas pelos gradientes de pressão e alterações no perfil de velocidade causados pela interação geométrica entre o escoamento e a parede, o que, por sua vez, afeta a distribuição térmica do fluido. Portanto, embora a superfície não contribua diretamente para a transferência de calor, ela influencia indiretamente os fenômenos térmicos através de sua topologia.

Essa abordagem permite desassociar os efeitos diretos, relacionados à transferência de calor, dos efeitos indiretos, ligados à dinâmica do escoamento influenciada pela geometria. A definição de condições de contorno simplificadoras, como no caso da superfície *wall* termicamente inerte, é útil para reduzir a complexidade computacional e focar em aspectos específicos da análise. No entanto, é fundamental considerar que, mesmo sem efeitos térmicos diretos, a superfície ainda desempenha um papel relevante na dinâmica do sistema, especialmente em situações onde o comportamento do fluido é fortemente influenciado pela

interação com a geometria das paredes do duto.

De forma análoga, essa influência não é observada no modelo transversal, pois as lâmpadas UV-C não se encontram suficientemente próximas à parede do duto para sofrer interações diretas.

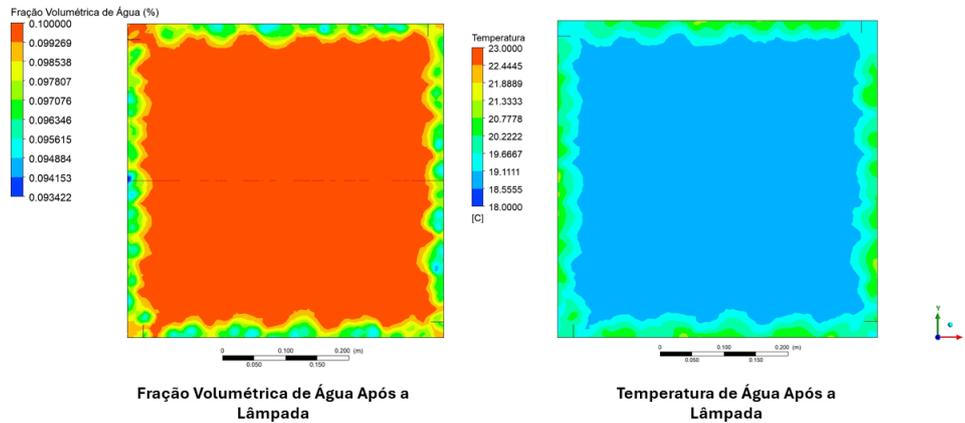


Figura 50: Fração Volumétrica de Água no Plano Horizontal Após a Zona de Influência da Lâmpada UV-C Perimetral. Fonte: Elaboração Própria.

A limitação na influência da lâmpada UV-C na direção ao centro do duto é compensada pelo seu efeito na direção do comprimento do duto. Em virtude da lateral do duto servir como uma superfície semelhante a uma placa plana, a separação do escoamento que ocorre na superfície da lâmpada, em sua região medial, é prolongada até o comprimento final do modelo de análise, proporcionando uma zona de influência de 0,25 m na direção z, classificada como zona de esteira térmica como referido anteriormente. A Figura 51 apresenta esse comportamento.

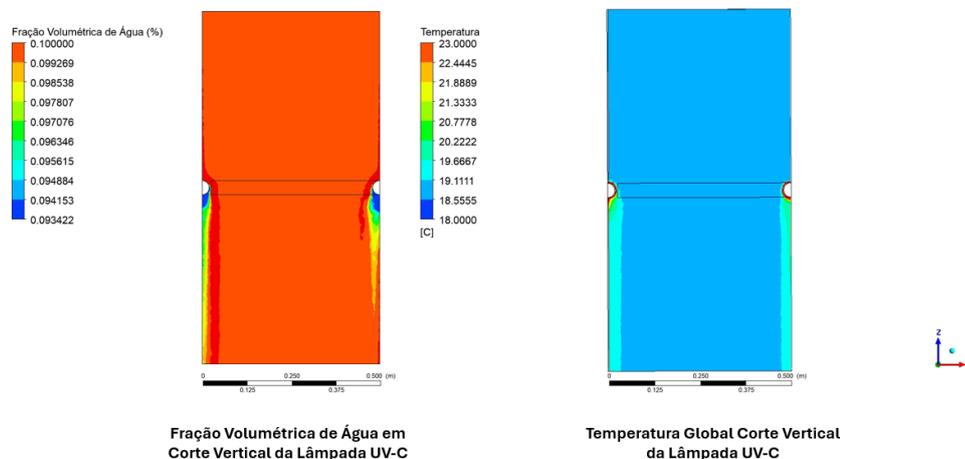


Figura 51: Fração Volumétrica e Temperatura em Corte Vertical na Zona de Influência das Lâmpadas UV-C Perimetral. Fonte: Elaboração Própria.

É possível sugerir o uso do sistema perimetral em conjunto com o configuração transversal, potencializando o poder de desinfecção das duas configurações. Porém, como já foi apresentado, seria necessária uma análise hidrodinâmica para identificar os efeitos do uso dessas configurações nas características do escoamento e suas consequências para os ocupantes do ambiente considerado nesta junção de configurações.

4.2.2.3 Relação Entre Modelos Numérico e Teórico

A relação entre os modelos será verificada considerando três cenários, o de mínima desinfecção, desinfecção média e máxima desinfecção do modelo numérico, considerando o modelo teórico fixo, com valor de desinfecção padrão de 1,56%.

O cenário de máxima desinfecção do modelo numérico foi calculado considerando a maior diferença encontrada entre o valor de fração volumétrica inicial e a encontrada no resultado da simulação, o valor obtido foi de 1,07% de desinfecção. O valor médio foi calculado através da mesma diferença, porém considerando o valor médio geral de fração volumétrica de todas as amostras obtidas, a taxa de desinfecção obtida foi de 0,329%. O valor mínimo foi obtido com base na menor diferença do valor inicial para o maior valor das amostras, chegando ao valor de 0,084% de desinfecção. Na Tabela 11 encontra-se os valores mínimo, médio e máximo e as comparações com o valor de desinfecção teórico.

Tabela 11: Comparação Resultado Teórico e Numérico Multifásico.

Cenário	Fração de Desinfecção	Diferença Teórica e Numérica	Relação Numérica por Teórica	Fator de Correção
Mínimo	0,084%	1,476%	5,38%	18,57
Médio	0,329%	1,231%	21,08%	4,74
Máximo	1,070%	0,490%	68,58%	1,45

Percebe-se que em nenhum dos cenários obteve o valor teórico calculado, sendo o cenário de máxima desinfecção o que mais se aproxima, exigindo fator de correção de 1,45. Esses comportamento aquém da referência são justificados pelos efeitos hidrodinâmicos e térmicos do escoamento, efeitos estes que não são considerados no cálculo do modelo teórico. Considerando que o modelo numérico se apresenta entre o modelo teórico e o experimental, é possível inferir que o resultado é válido, mas passível de experimental para validação completa do modelo. Os resultados podem apresentar valores de desinfecção baixos, porém vale ressaltar que são proporcionais ao tempo de simulação, extrapolando os resultados numéricos de desinfecção é possível obter valores de 99% em 15 minutos de

simulação.

A simulação para este caso foi realizada em regime transiente com 10 segundos de duração. Na Figura 52 são apresentados os resultados de fração volumétrica de água ao longo do tempo. É importante ressaltar que essa variação temporal não reflete o tempo de exposição do composto viral ao sistema UV-C, mas sim o tempo da simulação, considerando seus efeitos na fase aquosa do escoamento.

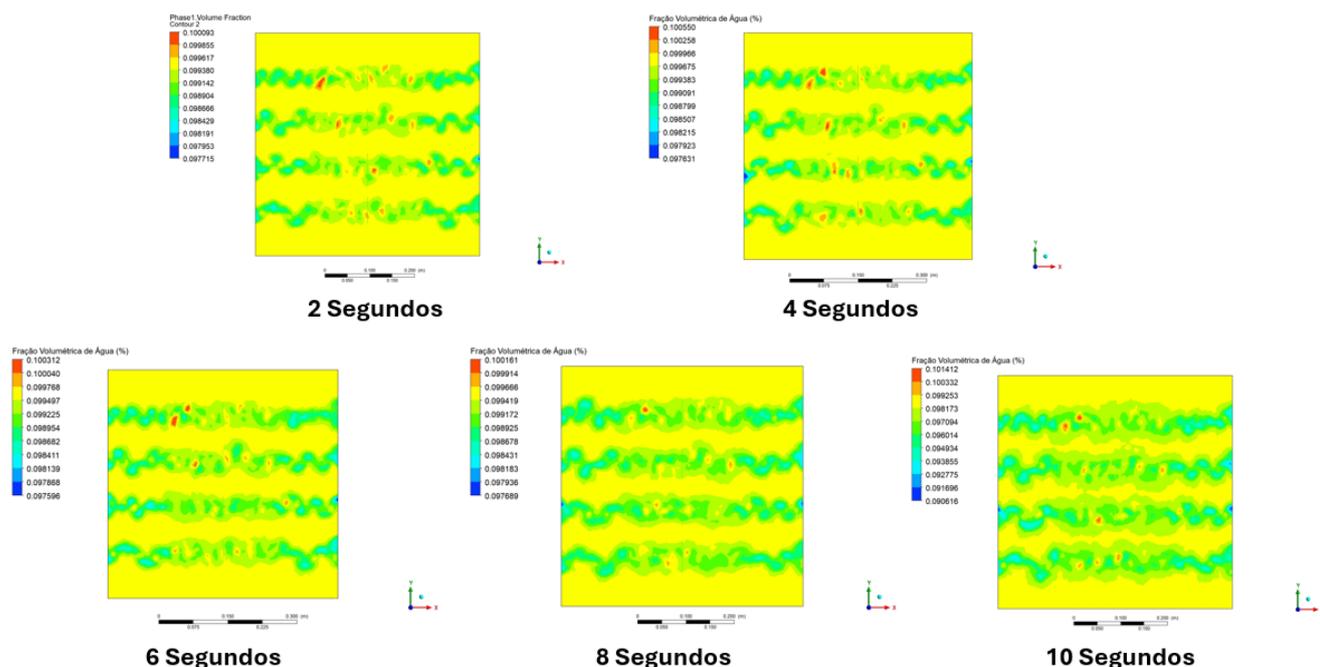


Figura 52: Evolução da Fração Volumétrica de Água ao Longo do Tempo de Simulação. Fonte: Elaboração Própria.

A fração de água sofre variações ao longo do tempo. Os pontos de máxima concentração que são apresentados em vermelho no início da simulação diminuem e aumenta-se o espalhamento das zonas verde que apresentam composições menores da fase, sendo interpretada como aumento do efeito de desinfecção.

Na Figura 53 é apresentado o gráfico que relaciona os valores médios de fração volumétrica com o tempo de simulação. O comportamento pode ser aproximado a uma curva exponencial dada pela 4.2, o erro acumulado da curva (soma das diferenças absolutas entre os valores numéricos e ajustados da curva) foi de aproximadamente 10%.

$$\eta = e^{0,5345 \cdot t} + 0,1265 \quad (4.2)$$

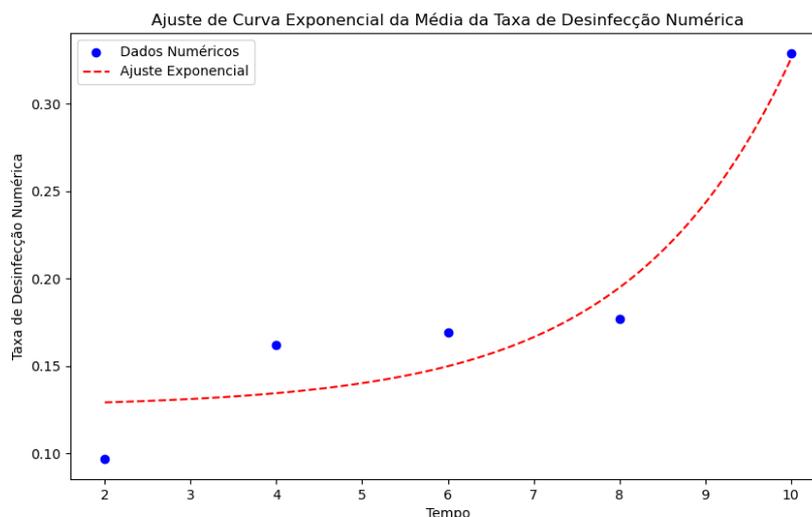


Figura 53: Curva de Valores Médios de Desinfecção em Relação ao Tempo de Simulação.

Esta curva pode ser definida como a curva aproximada de desinfecção para a simulação com modelo de escoamento multifásico, o coeficiente de correlação para o ajuste exponencial é aproximadamente 0,956, indicando uma forte correlação positiva entre os dados experimentais e os valores ajustados. Isso sugere que este modelo exponencial descreve adequadamente os dados fornecidos.

Estabelecendo-se uma análise entre o modelo teórico e o modelo numérico, a hipótese de uso do UVGI inserido dentro do duto de insuflamento de ar da sala cuidados clínicos fornecer potencial de desinfecção adequado, considerando o teste com modelos multifásicos, é verdadeira, esta investigação pressupõem com os dados apresentados baseados na utilização do arranjo transversal são suficientes para determinar a desinfecção do ambiente em tempo específico.

Porém, é necessário interpretar cada tempo como cenários distintos de desinfecção, associada a variação das propriedades do escoamento e não a exposição as lâmpadas UV-C. Sendo assim, diante dos resultados obtidos é possível inferir que é imperativo a interpretação das propriedades do escoamento para obter uma função de desinfecção realística. A não consideração dessa prerrogativa pode caracterizar o fracasso do planejamento de desinfecção do ambiente a que se deseja proteger.

Outro panorama que pode ser relevante para avaliação das propriedades do escoamento é a análise de particulado, tanto para avaliação do espalhamento quanto para interpretação das mudanças na propriedades das partículas insufladas no duto.

CONCLUSÃO

A aplicação de sistemas de Irradiação Germicida Ultravioleta (UVGI) em ambientes hospitalares revelou-se uma solução promissora para melhorar a qualidade do ar e o conforto térmico, especialmente em espaços críticos como salas de pneumologia. O estudo demonstrou que, ao serem integrados a sistemas de climatização, esses dispositivos podem otimizar a circulação do ar, reduzir zonas de calor residual e contribuir significativamente para a segurança microbiológica de pacientes e profissionais de saúde.

A análise das hipóteses lançadas no início do trabalho trouxe contribuições relevantes para o campo de estudo. Em primeiro lugar, a hipótese de que dispositivos de Irradiação Germicida Ultravioleta (UVGI), fixos ou móveis, implementados em salas hospitalares poderiam melhorar o potencial de desinfecção ao reduzir a concentração de microrganismos patogênicos transportados pelo ar foi confirmada, desde que os arranjos e configurações fossem otimizados por meio de análises baseadas na Dinâmica dos Fluidos Computacional (DFC). Contudo, a hipótese de que esses dispositivos alterariam significativamente o comportamento hidrodinâmico e térmico do ambiente apresentou resultados contraditórios. Embora sejam fontes de calor, os dispositivos UVGI não elevaram de maneira significativa a temperatura local nem afetaram diretamente a sensação térmica dos ocupantes, não sendo um limitante para o seu uso. Por outro lado, a integração dos dispositivos no sistema de climatização, especialmente no duto de insuflamento, mostrou-se eficaz para garantir um potencial adequado de desinfecção, conforme validado por modelos multifásicos e o uso de arranjos transversais.

A influência do UVGI nas propriedades térmicas e hidrodinâmicas do ambiente hospitalar foi notável. Configurações otimizadas eliminaram zonas de estagnação do ar, criando ambientes mais saudáveis e confortáveis. No entanto, a eficiência desses sistemas depende de uma análise criteriosa das condições ambientais, como temperatura, umidade e velocidade do fluxo de ar, além de uma integração cuidadosa com os sistemas HVAC existentes.

A pesquisa destaca a necessidade de validação experimental dos resultados simulados. Estudos em ambientes hospitalares reais seriam fundamentais para comprovar a eficácia dos sistemas UVGI em condições práticas, considerando variáveis adicionais, como ocupação humana e interferências externas. Esse tipo de validação pode também reforçar a importância de políticas públicas e regulamentações mais detalhadas para o uso do UVGI.

Uma linha promissora de investigação é o desenvolvimento de tecnologias adaptativas para sistemas UVGI. Soluções baseadas em sensores de qualidade do ar e ocupação poderiam ajustar automaticamente a intensidade e o posicionamento das lâmpadas UVGI, otimizando a eficiência energética e operacional. Essa abordagem tornaria a tecnologia mais acessível e sustentável, alinhando-a às demandas atuais de eficiência energética e proteção ambiental.

Além do ambiente hospitalar, os sistemas UVGI têm potencial para aplicação em outros espaços de uso coletivo, como escolas, escritórios e transporte público. Estudos futuros poderiam explorar a adaptação da tecnologia a diferentes contextos, com foco na redução de doenças respiratórias e na melhoria da qualidade do ar em locais de alta densidade populacional.

A pesquisa também levanta questões sobre o impacto energético do UVGI em sistemas HVAC. Investigações futuras podem explorar formas de mitigar o aumento no consumo de energia, como a integração de fontes renováveis e o uso de algoritmos de controle inteligente para reduzir custos operacionais. Essa abordagem ajudaria a alinhar a implementação do UVGI com os objetivos de sustentabilidade global.

Outra vertente que pode ser adequada ao estudo de arranjos UVGI está associada ao acoplamento com modelos de transferência de calor por radiação, que podem trazer resultados mais fundamentados no potencial de desinfecção e na influência no ambiente.

Finalmente, para garantir a adoção segura e eficiente dessa tecnologia, é imprescindível atualizar e expandir as normativas técnicas no Brasil. A criação de diretrizes claras, baseadas em evidências científicas, pode assegurar a aplicação consistente do UVGI, protegendo pacientes e profissionais enquanto promove a inovação em engenharia e saúde pública. Essas iniciativas podem consolidar o UVGI como uma ferramenta indispensável na melhoria da qualidade do ar e na mitigação de infecções respiratórias em ambientes fechados.

REFERENCES

- ABNT. *Instalação de Ar-condicionado - Sistemas Centrais e Unitários - Parte 2: Parâmetros de Conforto Térmico*. [S.l.], 2008.
- ABNT. *Instalação de Ar-condicionado - Sistemas Centrais e Unitários - Parte 3: Qualidade do Ar Interior*. [S.l.], 2008.
- ABNT. *NBR-7256, Tratamento de ar em Estabelecimento Assistenciais de Saúde (EAS): Requisitos para projetos e execução das Instalações*. 2022. Associação Brasileira de Normas técnicas, Rio de Janeiro.
- AL-BAGHDADI, M. A. S. Cfd analysis of spread covid-19 with air conditioning systems. *International Journal of Energy and Environment*, International Energy and Environment Foundation, v. 12, n. 2, p. 63–73, 2021.
- ALLEN, J. G.; MARR, L. C. Recognizing and controlling airborne transmission of sars-cov-2 in indoor environments. *Indoor air*, Wiley-Blackwell, v. 30, n. 4, 2020.
- ALREBI, O. F. et al. Airflow dynamics in an emergency department: A cfd simulation study to analyse covid-19 dispersion. *Alexandria Engineering Journal*, Elsevier, v. 61, n. 5, p. 3435–3445, 2022.
- ALVES, C. G. A. et al. Cob-2021-1725 analysis of indoor ventilation in a pneumology ward at the lauro wanderley university hospital, brazil. 2021.
- ANDERSON, J. D. *Computational fluid dynamics: The basics with applications*. [S.l.]: McGraw-Hill, 1995.
- ANSYS. *ANSYS Fluent User's Guide*. [S.l.], 2021.
- ANVISA. *Resolução n. 9, de 16 de janeiro de 2003*. [S.l.], 2003.
- ANVISA. *Pediatria: prevenção e controle de infecção hospitalar, Ministério da Saúde, Agência Nacional de Vigilância Sanitária*. [S.l.], 2005.
- (ANVISA), A. N. de V. S. *Resolução nº 9, de 16 de janeiro de 2003: Qualidade do ar interno em ambientes climatizados de uso público e coletivo*. Brasília, Brazil: ANVISA, 2003.
- (ANVISA), A. N. de V. S. *RDC nº 50, de 21 de fevereiro de 2002: Regulamento técnico para planejamento, programação, elaboração e avaliação de projetos físicos de estabelecimentos assistenciais de saúde*. Brasília, Brazil: ANVISA, 2020.
- APPOLINÁRIO, R. S. Absenteísmo na equipe de enfermagem: análise da produção científica. *Rev. enfermagem UERJ*, p. 83–87, 2008.
- ASHRAE. *ASHRAE Handbook - Fundamentals*. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2017.
- ASHRAE. *ASHRAE Handbook - HVAC Systems and Equipment*. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2020.

ASHRAE. *Position Document on Filtration and Air Cleaning*. 2020.

<https://www.ashrae.org/technical-resources/filtration-and-air-cleaning>. Acessado em 13 Novembro de 2022.

BARBOSA, B. P. P.; BRUM, N. de C. L. Ventilation mode performance against airborne respiratory infections in small office spaces: limits and rational improvements for covid-19. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Springer, v. 43, n. 6, p. 1–19, 2021.

BLAZEK, J. *Computational fluid dynamics: principles and applications*. [S.l.]: Butterworth-Heinemann, 2015.

BOUROUIBA. The fluid dynamics of disease transmission. *Annual Review of Fluid Mechanics*, Annual Reviews, v. 53, 2020.

BOUROUIBA, L.; DEHANDSCHOEWERCKER, E.; BUSH, J. W. M. Violent expiratory events: on coughing and sneezing. *Journal of Fluid Mechanics*, v. 903, p. F1, 2020.

BRASIL. *Lei nº 13.589, de 4 de janeiro de 2018. Dispõe sobre a manutenção de instalações e equipamentos de sistemas de climatização de ambientes*. [S.l.]: Diário Oficial da União, 2018. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2015-2018/2018/Lei/L13589.htm>. Acesso em: 27 dez. 2024.

CAMPOS, L. A.; LOPES, E. C.; COSTA, M. M. Setorização hospitalar: Análise em um hospital público de médio porte. *Revista de Gestão em Sistemas de Saúde*, v. 6, n. 2, p. 121–134, 2017.

CARRIER. *Self-Contained*. 2024. <https://carrierdobrasil.com.br/blog/produtos/self-contained/>. Accessed 20 march 2024.

CARVALHO, A. Impacto da climatização em ambientes de trabalho na saúde e bem-estar dos trabalhadores. *Revista Brasileira de Saúde Ocupacional*, v. 42, n. 2, p. 245–257, 2021.

CATTAI, F.; D’ORAZIO, A.; SBARDELLA, G. A systematic review on the application of ultraviolet germicidal irradiation to hvac systems. *Energies*, v. 16, n. 22, 2023. ISSN 1996-1073. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1996-1073/16/22/7569>>.

CDC. *Guidelines for Environmental Infection Control in Health-Care Facilities*. 2003. <https://www.cdc.gov/infectioncontrol/guidelines/environmental/index.html>. Acessado em 13 Novembro de 2022.

CDC et al. National nosocomial infections surveillance (nnis) system report: data summary from january 1992-june 2001, issued august 2001. *Am. J. Infect. Control*, v. 29, p. 404–421, 2001.

(CEN), E. C. for S. *EN 16798-1: Energy performance of buildings - Ventilation for buildings - Part 1: Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting, and acoustics*. Brussels, Belgium: CEN, 2019.

CENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. *Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications*. [S.l.]: McGraw-Hill Education, 2010.

CHAKRABORTY; MAITY. Covid-19 outbreak: Migration, effects on society, global environment and prevention. *Science of The Total Environment*, v. 728, p. 138882, 2020. ISSN 0048-9697.

- CHIA, P. Y. et al. Detection of air and surface contamination by sars-cov-2 in hospital rooms of infected patients. *Nature communications*, Nature Publishing Group, v. 11, n. 1, p. 1–7, 2020.
- COAD, W. *HVAC Systems - Design Handbook*. New York: McGraw-Hill, 2019.
- CREDER, H. *Instalações de Ar Condicionado*. São Paulo: LTC, 2004.
- DIFFEY, B. L. Solar ultraviolet radiation effects on biological systems. *Physics in Medicine and Biology*, IOP Publishing, v. 36, n. 3, p. 299–328, 1991.
- DING, J.; YU, C. W.; CAO, S.-J. Hvac systems for environmental control to minimize the covid-19 infection. *Indoor and Built Environment*, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 29, n. 9, p. 1195–1201, 2020.
- DOREMALEN, N. van et al. Aerosol and surface stability of sars-cov-2 as compared with sars-cov-1. *The New England Journal of Medicine*, v. 382, p. 1564–1567, 2020.
- DOSE, U. Ultraviolet air and surface treatment. *Proc ASHRAE Handbook-HVAC Appl*, 2019.
- FERZIGER, J. H.; PERIC, M. *Computational Methods for Fluid Dynamics*. [S.l.]: Springer, 2002.
- FOX, R. W.; MCDONALD, A. T.; PRITCHARD, P. J. *Introdução a Mecânica dos Fluidos*. [S.l.]: LTC, 2018.
- GBD. Global, regional, and national deaths, prevalence, disability-adjusted life years, and years lived with disability for chronic obstructive pulmonary disease and asthma, 1990–2015: a systematic analysis for the global burden of disease study 2015. *The Lancet Respiratory Medicine*, v. 5, n. 9, p. 691–706, 2017.
- GIVONI, B. Comfort, climate analysis and building design guidelines. *Energy and Buildings*, v. 18, n. 1, p. 11–23, 1992. ISSN 0378-7788.
- GOBBI, M. E.; SANTOS, M.; ROLA, S. M. Qualidade do ar e ventilação natural no ambiente hospitalar: o exemplo do edificio sarah kubitschek no rio de janeiro. *Annals of Encuentro Latinoamericano y Europeo Sobre Edificaciones y Comunidades Sostenibles*, v. 3, p. 1153–1161, 2019.
- GONZALEZ, O.; STUART, A. M. *A First Course in Continuum Mechanics*. [S.l.]: Cambridge University Press, 2017.
- HEATING, R. American Society of; (ASHRAE), A.-C. E. *Standard 62.1-2019: Ventilation for acceptable indoor air quality*. Atlanta, USA: ASHRAE, 2019.
- (ISO), I. O. for S. *ISO 16000-1: Indoor air - Part 1: General aspects of indoor air quality*. Geneva, Switzerland: ISO, 2019.
- (ISO), I. O. for S. *ISO 14644-1: Cleanrooms and associated controlled environments - Part 1: Classification of air cleanliness by particle concentration*. Geneva, Switzerland: ISO, 2020.
- JONES, E.; BROWN, K. Uv-c lamps for surface disinfection in healthcare facilities. *American Journal of Infection Control*, Elsevier, v. 48, n. 3, p. 295–299, 2020.
- JR., J. D. A. *Computational Fluid Dynamics: The Basics with Applications*. [S.l.]: McGraw-Hill Education, 2016.

- KHANKARI, K.; BAHNFLETH, W. Cfd analysis of fixture output impact on upper room germicidal ultraviolet light system performance. *ASHRAE Journal*, v. 65, n. 6, 2023.
- KILGORE, P. E.; BROSSEAU, L. M.; GRAVELLE, C. R. *Infectious Disease Transmission in the Indoor Environment*. Boca Raton: CRC Press, 2020.
- KIM, S.; WANG, L.; ZHANG, Q. Uv-led technology for water and air disinfection: A review. *Water Research*, Elsevier, v. 201, p. 117301, 2021.
- KOWALSKI, W. *Ultraviolet germicidal irradiation handbook: UVGI for air and surface disinfection*. [S.l.]: Springer science & business media, 2010.
- KOWALSKI, W. J.; BAHNFLETH, W. P. Uvgi for building environmental control: What can it do? *ASHRAE Journal*, v. 52, n. 6, p. 30–37, 2010.
- KRISHNAMOORTHY, G.; TANDE, B. M. Improving the effectiveness of ultraviolet germicidal irradiation through reflective wall coatings: Experimental and modeling based assessments. *Indoor and Built Environment*, v. 25, n. 2, p. 314–328, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1177/1420326X14547785>>.
- KUNDU, P. K.; COHEN, I. M. *Fluid Mechanics*. [S.l.]: Academic Press, 2004.
- LAUNDER, B. E.; SPALDING, D. B. The numerical computation of turbulent flows. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Elsevier, v. 3, n. 2, p. 269–289, 1974.
- LI, Y. et al. Evidence for probable aerosol transmission of sars-cov-2 in a poorly ventilated restaurant. *Building and Environment*, v. 196, p. 107788, 2021.
- LIN, S.; ZHONG, Y.; FANG, X. Study on energy-saving and performance optimization of hvac systems using uvgi technology. *Energy and Buildings*, v. 229, p. 110572, 2021.
- LIU, Y. et al. Aerodynamic analysis of sars-cov-2 in two wuhan hospitals. *Nature*, v. 582, p. 557–560, 2020.
- LÖHNER, R. et al. Detailed simulation of viral propagation in the built environment. *Computational Mechanics*, Springer, v. 66, n. 5, p. 1093–1107, 2020.
- LÓPEZ-REBOLLAR, B. M. et al. Proposal of a mask and its performance analysis with cfd for an enhanced aerodynamic geometry that facilitates filtering and breathing against covid-19. *Fluids*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 6, n. 11, p. 408, 2021.
- MACHADO, A. A. Infecção pelo vírus influenza a (h1n1) de origem suína: como reconhecer, diagnosticar e prevenir. *Jornal Brasileiro de Pneumologia*, SciELO Brasil, v. 35, n. 5, p. 464–469, 2009.
- MALALASEKERA, W.; VERSTEEG, H. An introduction to computational fluid dynamics. *The finite volume method*, Harlow: Prentice Hall, p. 1995, 2007.
- MALISKA, C. R. *Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional*. [S.l.]: Grupo Gen-LTC, 2017.
- MARIAM et al. Cfd simulation of the airborne transmission of covid-19 vectors emitted during respiratory mechanisms: Revisiting the concept of safe distance. *ACS omega*, ACS Publications, v. 6, n. 26, p. 16876–16889, 2021.

- MARTIN, G. B. et al. Assistência hospitalar à população idosa em cidade do sul do brasil. *Epidemiologia e Serviços de Saúde*, Coordenação-Geral de Desenvolvimento da Epidemiologia em Serviços/Secretaria . . . , v. 15, n. 1, p. 59–65, 2006.
- MARTINS, F.; OLIVEIRA, R. Uso de ar-condicionado em edifícios no brasil: uma análise dos padrões de consumo e tendências. In: *Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica*. [S.l.: s.n.], 2020. v. 28, n. 1, p. 112–120.
- MEMARZADEH, F.; OLMSTED, R. N.; BARTLEY, J. M. Applications of ultraviolet germicidal irradiation disinfection in health care facilities: Effective adjunct, but not stand-alone technology. *American Journal of Infection Control*, v. 38, n. 5, Supplement, p. S13–S24, 2010. ISSN 0196-6553.
- MILLER, R.; MILLER, M. *Ar-Condicionado e Refrigeração*. 2ª edição. ed. [S.l.]: LTC, 2014.
- MILLER, R. V. et al. Bacterial responses to ultraviolet light. *American Society for Microbiology (ASM) News*, v. 65, n. 8, p. 535–541, 1999.
- MIRZAI, M. et al. Covid-19 spread in a classroom equipped with partition—a cfd approach. *Journal of Hazardous Materials*, Elsevier, v. 420, p. 126587, 2021.
- MORAWSKA, L. et al. How can airborne transmission of covid-19 indoors be minimised? *Environment International*, v. 142, p. 105832, 2020.
- MOTA, R. J. B. S. et al. Qualidade do ar interno no ambiente hospitalar: uma revisão integrativa. *Revista Saúde-UNG-Ser*, v. 8, n. 1-2, p. 44–52, 2014.
- MOUKALLED F, M. L. D. M. *The finite volume method in computational fluid dynamics: An advanced introduction with OpenFOAM and Matlab*. [S.l.]: Springer, 2016.
- MUNSON, B. R. et al. *Fundamentals of Fluid Mechanics*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2009.
- PANTON, R. L. *Incompressible Flow*. [S.l.]: Wiley, 2013.
- PARK, S.; MISTRICK, R.; RIM, D. Performance of upper-room ultraviolet germicidal irradiation (uvgi) system in learning environments: Effects of ventilation rate, uv fluence rate, and uv radiating volume. *Sustainable Cities and Society*, v. 85, p. 104048, 2022. ISSN 2210-6707. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210670722003663>>.
- PATANKAR, S. V. *Numerical heat transfer and fluid flow*. [S.l.]: CRC press, 1980.
- PESSOA, M. A. S. et al. A física de um desinfector com radiação uv–c. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, Sociedade Brasileira de Física, v. 43, n. Rev. Bras. Ensino Fís., 2021 43, p. e20210217, 2021. ISSN 1806-1117. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2021-0217>>.
- PHAM, T.; BROCHARD, L. J.; SLUTSKY, A. S. Mechanical ventilation: state of the art. *Mayo Clinic Proceedings*, v. 96, n. 2, p. 296–309, 2021.
- PHOSEON. *Understanding Ultraviolet LED Wavelength*. 2021. Accessed: 2024-12-27. Disponível em: <<https://phoseon.com/understanding-ultraviolet-led-wavelength/>>.
- PLETCHER, R. H.; TANNEHILL, J. C.; ANDERSON, D. *Computational fluid mechanics and heat transfer*. [S.l.]: CRC press, 2012.

- POPE, S. B. *Turbulent Flows*. [S.l.]: Cambridge University Press, 2000.
- QUADROS, M. E. *Qualidade do Ar em Ambientes Internos Hospitalares: parâmetros físico-químicos e microbiológicos*. Dissertação (Mestrado) — UFSC, June 2008.
- REN, C.; ZHU, H.-C.; CAO, S.-J. Ventilation strategies for mitigation of infection disease transmission in an indoor environment: A case study in office. *Buildings*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 12, n. 2, p. 180, 2022.
- RIBEIRO, C. T. et al. Perfil epidemiológico das infecções hospitalares no hospital universitário João de Barros Barreto, Belém-Pará, no período de janeiro a dezembro de 2000. *Rev. para. med*, p. 43–46, 2002.
- ROACHE, P. J. *Verification and validation in computational science and engineering*. [S.l.]: Hermosa Publishers, 1998.
- ROSENBERG, M. *HVAC Fundamentals*. Nova York: McGraw-Hill, 2017.
- SANTANA, W. O. de; FORTUNA, J. L. Microbiota de aparelhos de ar condicionado das áreas críticas de hospitais públicos e particulares e sua relação com as infecções hospitalares. *Revista Biociências*, v. 18, n. 1, 2012.
- SANTOS, A. A. M. et al. *DIAGNÓSTICO DO CONTROLE DA INFECÇÃO HOSPITALAR NO BRASIL (Web Publications)*. 2005. ANVISA, Brasil, www.anvisa.gov.br/servicosaude/controlo/Infectes%20Hospitalares_diagnostico.pdf. Accessed 04 September 2021.
- SANTOS, A. F. et al. Best practices on hvac design to minimize the risk of covid-19 infection within indoor environments. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, Instituto de Tecnologia do Paraná - Tecpar, v. 63, n. Braz. arch. biol. technol., 2020 63, p. e20200335, 2020. ISSN 1516-8913. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/1678-4324-2020200335>>.
- SATHEESAN, M. K.; MUI, K. W.; WONG, L. T. A numerical study of ventilation strategies for infection risk mitigation in general inpatient wards. In: SPRINGER. *Building simulation*. [S.l.], 2020. p. 1–10.
- SATHEESAN, V.; KIAKHOobi, A. Computational fluid dynamics (cfD) simulations of uvc disinfection systems for hvac applications. *Building Simulation*, v. 13, n. 5, p. 1073–1086, 2020.
- SCHUTZ, B. F. *A First Course in General Relativity*. [S.l.]: Cambridge University Press, 1985.
- SCHWARTZMANN, P. V. et al. Pneumonia comunitária e pneumonia hospitalar em adultos. *Medicina (Ribeirão Preto)*, v. 43, n. 3, p. 238–248, 2010.
- SETLOW, J. K. The molecular basis of biological effects of ultraviolet radiation and photoreactivation. *Current Topics in Radiation Research*, University of Pittsburgh Press, v. 2, p. 195–248, 1966.
- SETLOW, R. B. Dna damage and repair: A photobiological odyssey. *Photochemistry and Photobiology*, Wiley, v. 65, n. S, p. 119S–122S, 1997.
- SETLOW, R. B.; SETLOW, J. K. Evidence that ultraviolet-induced thymine dimers in dna cause biological damage. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, National Academy of Sciences, v. 48, n. 7, p. 1250–1257, 1962.

- SILVA, J. R. et al. Setorização hospitalar: estudo de caso de um hospital público de grande porte. *Revista de Gestão em Sistemas de Saúde*, v. 8, n. 2, p. 212–230, 2019.
- SILVA, L. Tendências e desafios no uso de sistemas de climatização em ambientes urbanos no Brasil. *Revista Brasileira de Engenharia Ambiental*, v. 18, n. 3, p. 201–215, 2023.
- SMITH, J.; JONES, R. *Principles of Air Conditioning*. New York: Springer, 2022.
- SMITH, J.; WANG, Y.; JOHNSON, M. Uv-c lamps for air purification: A review of performance and applications. *Indoor Air*, Wiley, v. 29, n. 5, p. 690–701, 2019.
- SOUZA, S. O. de et al. Eficácia de um sistema de desinfecção do ar uvc para hvac de uma uti. *EUR. Física. J. Mais*, v. 137, p. 37, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-021-02240-y>>.
- STADNYTSKYI, V. et al. The airborne lifetime of small speech droplets and their potential importance in sars-cov-2 transmission. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, National Acad Sciences, v. 117, n. 22, p. 11875–11877, 2020.
- STOECKER, W. F.; JONES, J. W. *Refrigeração e Ar Condicionado*. São Paulo: McGraw-Hill, 1985.
- STORM, N. et al. Rapid and complete inactivation of sars-cov-2 by ultraviolet-c irradiation. *Scientific Reports*, Nature Publishing Group, v. 10, n. 1, p. 1–5, 2020.
- TANNEHILL, J. C.; JR., D. A. A.; PLETCHER, R. H. *Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer*. [S.l.]: Taylor & Francis, 1997.
- TIPPLE, A. F. V. et al. O ensino do controle de infecção: um ensaio teórico-prático. *Revista Latino-Americana de Enfermagem*, SciELO Brasil, v. 11, n. 2, p. 245–250, 2003.
- TORRES, A. et al. Challenges in severe community-acquired pneumonia: a point-of-view review. *Intensive care medicine*, v. 43, n. 6, p. 780–793, 2017.
- ABRAVA. *Projetos de Sistemas de Ar-Condicionado*. 2024. <https://slideplayer.com.br/slide/351812/>. Accessed 20 march 2024.
- ASHRAE. *FILTRATION/DISINFECTION*. 2021. <https://www.ashrae.org/technical-resources/filtration-disinfection>. Accessed 10 February 2022.
- CDC. *Scientific Brief: SARS-CoV-2 Transmission*. 2021. <https://www.cdc.gov/coronavirus/2019-ncov/science/science-briefs/sars-cov-2-transmission.html>. Accessed 10 February 2022.
- DAIKIN. *Centrifugal Chiller Dual Copressor*. 2024. <https://www.daikinapplied.com/products/chiller-products/centrifugal-chiller-dual-compressor>. Accessed 20 march 2024.
- EMBRAR. *Como Funciona um Chiller*. 2024. <https://blog.embrar.com.br/como-funciona-chiller/>. Accessed 20 march 2024.
- VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. *An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method*. [S.l.]: Pearson Education, 2007.

- VESTBO, J. et al. Global strategy for the diagnosis, management, and prevention of chronic obstructive pulmonary disease: Gold executive summary. *American journal of respiratory and critical care medicine*, v. 187, n. 4, p. 347–365, 2013.
- VUORINEN, V. et al. Modelling aerosol transport and virus exposure with numerical simulations in relation to sars-cov-2 transmission by inhalation indoors. *Safety Science*, Elsevier, v. 130, p. 104866, 2020.
- WANG, J. et al. High temperature and high humidity reduce the transmission of covid-19. *Available at SSRN*, v. 3551767, p. 2020b, 2020.
- WANG, X. et al. Association between universal masking in a health care system and sars-cov-2 positivity among health care workers. *JAMA*, v. 324, n. 7, p. 703–704, 2020.
- WHITE, F. M. *Fluid Mechanics*. [S.l.]: McGraw-Hill, 2011.
- WILCOX, D. C. *Turbulence modeling for CFD*. [S.l.]: DCW industries, 1998.
- WILCOX, D. C. *Turbulence modeling for CFD*. [S.l.]: DCW industries La Canada, CA, 2006.
- WU, C. et al. A new mathematical model for irradiance field prediction of upper-room ultraviolet germicidal systems. *Journal of Hazardous Materials*, v. 189, n. 1, p. 173–185, 2011. ISSN 0304-3894. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030438941100207X>>.
- ZHANG, C. et al. Impact of uvgi system on thermal environment in hvac systems of office buildings. *Indoor and Built Environment*, v. 28, n. 7, p. 905–917, 2019.
- ZHANG, J. et al. Study of viral filtration performance of residential hvac filters. *ASHRAE J*, v. 62, n. 8, p. 26–32, 2020.
- ZHANG, Y. *Indoor Air Quality Engineering*. [S.l.]: CRC Press, 2004.

ANEXO A - CARTA PSICROMÉTRICA

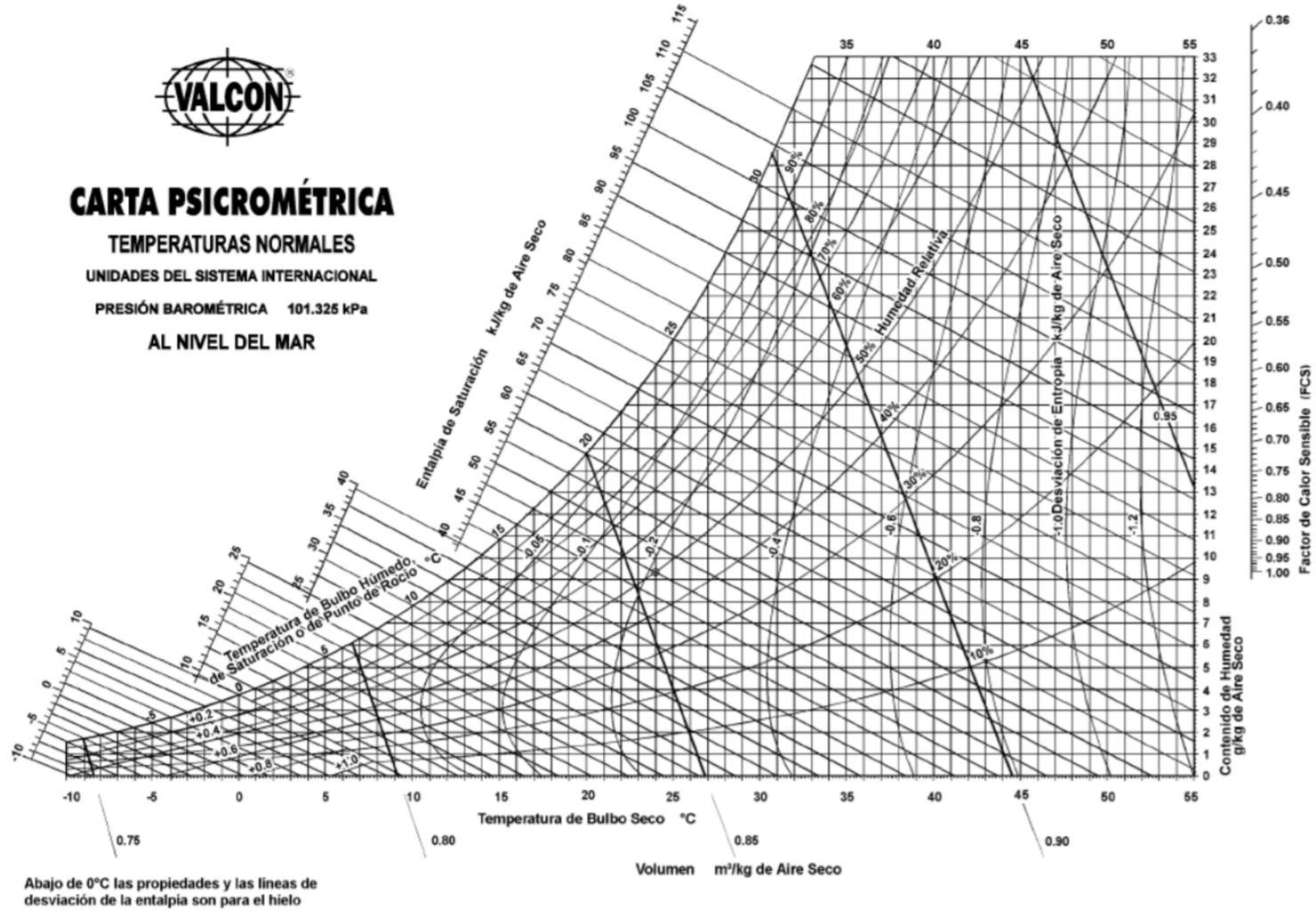


Figura 54: Carta Psicrométrica. Fuente: Valcon