



Karoly Santos Miranda

**Modelagem multifísica de dispersão de
sistemas particulados em suspensões
gasosas**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, de Materiais e Processos Ambientais, do Departamento de Engenharia Química e de Materiais da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Eduardo A. Brocchi
Co-orientador: Prof. Rodrigo F. M. De Souza

Rio de Janeiro
Maio de 2023



Karoly Santos Miranda

**Modelagem multifísica de dispersão de
sistemas particulados em suspensões
gasosas**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, de Materiais e Processos Ambientais da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo.

Prof. Dr. Eduardo de Albuquerque Brocchi

Orientador e Presidente

Departamento de Engenharia Química e de Materiais – PUC-Rio

Prof. Dr. Rodrigo Fernandes Magalhães de Souza

Co-orientador

Departamento de Engenharia Química e de Materiais – PUC-Rio

Prof. Dra. Nathalli Meorlluw Mello

Departamento de Engenharia Química e de Materiais – PUC-Rio

Prof. Dr. Rodrigo Lipparelli Fernandez

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. Dra. Rachel Ann Hauser-Davis

FIOCRUZ

Rio de Janeiro, 09 de maio de 2023

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da autora, do orientador e da universidade.

Karoly Santos Miranda

Graduou-se em Engenharia Civil na FTC (Faculdade de Tecnologia e Ciências) em 2016. Especializou-se em Saneamento Básico e em Meio ambiente na FAVENI (Faculdade Venda Nova do Imigrante) em 2021. Desenvolveu projetos de modelagem hidráulica para instituições públicas e privadas, e atuou supervisionando trabalhos na área de saneamento.

Ficha catalográfica

Miranda, Karoly Santos

Modelagem multifísica de dispersão de sistemas particulados em suspensões gasosas / Karoly Santos Miranda ; orientador: Eduardo de Albuquerque Brocchi ; co-orientador: Rodrigo Fernandes Magalhães de Souza. – 2023.

78 f. : il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Química e de Materiais, 2023.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Química e de Materiais – Teses. 2. Interação fluido-partícula. 3. Modelagem multifísica. 4. Fluidodinâmica computacional. 5. Coronavírus. I. Brocchi, Eduardo de Albuquerque. II. Souza, Rodrigo Fernandes Magalhães de. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Química e de Materiais. IV. Título.

CDD: 620.11

Dedico esta dissertação ao meu esposo Flávio, companheiro de todas as horas, que sempre me apoiou e acreditou nesse sonho. À minha filha Emanuely, que me renova e encoraja todos os dias. Aos meus pais Gilson e Marlene, meus irmãos e sobrinhos pelo carinho, amor e incentivo.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, pelo dom da vida e força durante todo esse caminho, me sustentando e não me deixando fraquejar, pois, sem Ele, nada seria possível.

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

À PUC-Rio, pela concessão de bolsas de isenção e humanitária, sem as quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Eduardo Brocchi, pelo acompanhamento, disponibilidade e por todo o apoio e confiança, desde o momento que ingressei no curso e, por todo apoio neste trabalho.

Ao meu Co-orientador, Prof. Dr. Rodrigo Fernandes Magalhães de Souza, pela sugestão do tema, pelos ensinamentos, pela troca de conhecimentos, por todo o apoio e confiança. Obrigada pelas correções e sugestões, que melhoraram este trabalho.

À banca examinadora, pelo empenho de avaliar e contribuir para a melhoria deste trabalho. Aos professores do departamento que, com seus ensinamentos e experiência, me ajudaram a amadurecer academicamente.

Ao meu esposo, Flávio, que ao longo desses anos, me deu todo apoio, força e compreensão, estando sempre ao meu lado, nos momentos que mais precisei, sempre acreditando no meu potencial. À minha filha Emanuely, minha força diária, que me motiva e encoraja a sempre buscar o meu melhor. À minha família, em especial, meus pais, Gilson e Marlene, irmãos e sobrinhos, por todo amor, carinho e incentivo.

Aos meus colegas de curso e amigos, em especial José Carlos, companheiro no dia a dia, sempre me ajudando e buscando compartilhar seus conhecimentos e a todos que de alguma forma fizeram parte da realização deste sonho.

Resumo

Miranda, Karoly Santos; Brocchi, Eduardo Albuquerque; de Souza, Rodrigo Fernandes Magalhães. **Modelagem multifísica de dispersão de sistemas particulados em suspensões gasosas**. Rio de Janeiro, 2023. 78p. dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Química e de Materiais, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Com o surgimento e agravamento da pandemia do novo coronavírus (Sars-Cov-2) em 2020, tornou-se necessário controlar os índices de ocupação de ambientes fechados por meio da estratégia de distanciamento social, com o intuito de mitigar a contaminação nesses locais. Todavia, observa-se que as medidas tomadas para definir a distância entre as pessoas são, essencialmente, de natureza qualitativa. Desta forma, o presente estudo se propõe a investigar por meio de uma abordagem multifísica as características desse sistema de dispersão de gotículas em fase discreta (gotas) e em fase contínua (ar), a fim de quantificar os índices de ocupação aceitáveis de uma sala de aula em diferentes condições (ex.: arranjo de cadeiras e/ou planejamento do sistema de ventilação). O trabalho foi conduzido para um ambiente tridimensional e a resolução numérica se dará pelo método de elementos finitos. O software COMSOL e seus módulos complementares, de fluidodinâmica computacional (CFD) e de definição de trajetórias de partículas (Particle Tracing), foram utilizados como ferramentas para apreciação do comportamento dos vetores mecânicos de transporte de vírus respiratórios. Com isso, deseja-se identificar condições otimizadas para uma sala exemplo, uma vez que, isso possa servir como parâmetro para determinação de condutas em ambientes similares.

Palavras-chave:

Interação fluido-partícula; Fluidodinâmica computacional; Rastreamento de partículas; Pandemia Sars-Cov-2.

Abstract

Miranda, Karoly Santos; Brocchi, Eduardo Albuquerque (Advisor); de Souza, Rodrigo Fernandes Magalhães (Co-advisor). **Multiphysics modeling of dispersion of particulate systems in gaseous suspensions**. Rio de Janeiro, 2023. 78p. Master's Dissertation – Departamento de Engenharia Química e de Materiais, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

With the emergence and worsening of the novel coronavirus (Sars-Cov-2) pandemic in 2020, it has become necessary to control indoor occupancy rates through the strategy of social distancing, to mitigate contamination in these places. However, the measures taken to define the distance between people are essentially qualitative in nature. This study therefore sets out to investigate the characteristics of this discrete-phase (droplets) and continuous-phase (air) droplet dispersion system using a multiphysics approach, in order to quantify the acceptable occupancy rates of a classroom under different conditions (for example, seating arrangement and/or ventilation system planning). The work was carried out in a three-dimensional environment and the numerical resolution will be done using the finite element method. The COMSOL software and its complementary computational fluid dynamics (CFD) and particle trajectory definition (Particle Tracing) modules were used as tools to assess the behavior of the mechanical transport vectors of respiratory viruses. The aim is to identify optimized conditions for an example room, since this can serve as a parameter for determining ducts in similar environments.

Keywords:

Fluid-particle interaction; Computational fluid dynamics; Particle tracing; Sars-Cov-2 Pandemic.

Sumário

1	Introdução	15
2	Revisão Bibliográfica.....	17
2.1	O vírus SaRS-CoV-2.....	17
2.1.1	Transmissão aérea do vírus SaRS-CoV-2.....	22
2.1.2	Relação do tamanho dos aerossóis com a distância percorrida	26
2.1.3	Influência dos mecanismos de ventilação do ambiente sobre os índices de transmissão.....	28
2.1.4	O uso da proteção respiratória e facial, para controle de contaminação pelo SARS-CoV-2	30
2.2	Fluidodinâmica computacional (Computer Fluid Dynamics- CFD)	32
2.2.1	O Software COMSOL.....	35
2.2.2	Aplicações de modelos de fluidodinâmica computacional (CFD) em estudos sobre a pandemia do COVID-19	36
2.2.3	Relevância do estudo sobre o vírus SaRS-CoV-2 e suas variantes	37
2.2.4	Variantes no Brasil e número de mortes causadas pelo vírus SARS-CoV-2	41
2.2.5	A ventilação no ambiente, como estratégia para reduzir os índices e transmissão aérea.....	44
3	Metodologia	46
3.1	Softwares Utilizados.....	46
3.2	Dimensões e especificações da sala de aula no AutoCAD	46
3.3	Projeto Tridimensional no SketchUp	48
3.4	Trabalhando com o Software COMSOL	49
3.5	Importando o arquivo para o software COMSOL.....	50
3.6	Geração da malha.....	51
3.7	Condição de contorno	52

3.8	Discretização pelo método dos Elementos Finitos	54
3.9	Equações governamentais	54
4	Resultados e discussão	59
4.1	Simulação do Cenário 01	59
4.2	Simulação do Cenário 02	62
4.3	Simulação do Cenário 03	64
5	Análise dos resultados	67
5.1	Análise de convergência da malha.....	68
6	Conclusão	70

Lista de Figuras

Figura 1 - Casos de COVID-19 confirmados no Brasil, por milhão de pessoas (Adaptado de Our World in Data, 2022)

Figura 2 - Número de Casos de COVID-19 no mundo, por milhão de pessoas em janeiro de 2020 (Adaptado de Our World in Data, 2022)

Figura 3 - Número de Casos de COVID-19 no mundo, por milhão de pessoas em janeiro de 2021 (Adaptado de Our World in Data, 2022)

Figura 4 - Número de Casos de COVID-19 no mundo, por milhão de pessoas em janeiro de 2022 (Adaptado de Our World in Data, 2022)

Figura 5 - Reprodução de espirro e tosse, mostrando gotas maiores semi-balísticas, visíveis a olho nu, da ordem de mm (Adaptado de Balachandar, (2020)

Figura 6 - Sequências de SARS-CoV-2 por variante, pelo período de 9 meses (Adaptado de Our World in Data, (2022)

Figura 7 - Interface do AutoCAD (Fonte: Miranda et al 2023)

Figura 8 - Planta baixa da sala de aula modelo (Fonte: Miranda et al 2023)

Figura 9 - Interface do SketchUp (Fonte: Miranda et al 2023)

Figura 10 - Sala de aula modelo, com dimensões reais, em ambiente tridimensional (Fonte: Miranda et al 2023)

Figura 11 - Interface do COMSOL (Fonte: Miranda et al 2023)

Figura 12 - Interface do software COMSOL, com o projeto da sala de aula (Fonte: Miranda et al 2023)

Figura 13 - Malha gerada no software COMSOL (Fonte: Miranda et al 2023)

Figura 14 - Seleção de entrada e saída de ar (Inlet e Outlet) no ambiente (Fonte: Miranda et al 2023)

Figura 15 - Distribuição de velocidade dos aerossóis exaladas (m/s), Cenário 01 (Fonte: Miranda et al 2023)

Figura 16 - Trajetória das partículas e aerossóis dentro do ambiente, Cenário 01 (Fonte: Miranda et al 2023)

Figura 17 - Pressão dentro do ambiente, Cenário 01 (Fonte: Miranda et al 2023)

Figura 18 - Distribuição de velocidade dos aerossóis exaladas (m/s), Cenário 02 (Fonte: Miranda et al 2023)

Figura 19 - Trajetória das partículas e aerossóis dentro do ambiente, Cenário 02 (Fonte: Miranda et al 2023)

Figura 20 - Pressão dentro do ambiente, Cenário 02 (Fonte: Miranda et al 2023)

Figura 21 - Distribuição de velocidade dos aerossóis exaladas (m/s), Cenário 03 (Fonte: Miranda et al 2023)

Figura 22 - Trajetória das partículas e aerossóis dentro do ambiente (Fonte: Miranda et al 2023)

Figura 23 - Pressão dentro do ambiente, Cenário 03 (Fonte: Miranda et al 2023)

Figura 24 - Resultados das simulações (a) sala de aula com porta e janelas abertas; (b) porta e janelas abertas, considerando barreira de proteção entre o emissor e receptor; (c) portas e janelas fechadas (Fonte: Miranda et al 2023)

Figura 25 - Malha extremamente grossa (Fonte: Miranda et al 2023)

Figura 26 - Malha extremamente fina (Fonte: Miranda et al 2023)

Lista de Tabelas:

Tabela 1: Procedimentos para evitar a transmissão aérea de vírus (Adaptado de “Airborne transmission of severe acute respiratory syndrome coronavirus-2”, 2020).

Tabela 2: Demonstrativo de Variantes de interesse e de preocupação registradas no Brasil (Fonte: Adaptado de Michelin, 2021).

Lista de Gráficos:

Gráfico 01: Taxas de cobertura vacinal contra a Covid-19 (Adaptado de Our World in Data, 2023).

Lista de Abreviaturas e Siglas:

DEQM- Departamento de Engenharia Química e de Materiais

SARS-CoV-2- Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus 2

CFD- Computer Fluid Dynamics

OMS- Organização Mundial da Saúde

EUA- Estados Unidos da América

OPAS- Organização Pan-Americana de Saúde

Fiocruz- Fundação Oswaldo Cruz

UV- Ultravioleta

RCP- Ressuscitação Cardiopulmonar

MEF- Método dos Elementos Finitos

1

Introdução

A pandemia do novo coronavírus e o contexto da sociedade atual apresentaram novos desafios para a humanidade, visto que, houve uma queda de paradigmas e, assim, uma série de atividades corriqueiras como ensino, comércio e lazer, tiveram que se adaptar a esse novo cenário. Desta forma, compreender como acontecem as transmissões de aerossóis por advecção, em ambientes fechados, tornou-se essencial.

O Sars-CoV-2 é o vírus responsável pela pandemia do Covid-19, doença que apresenta nível de contaminação elevado, sendo considerada a principal forma de transmissão do vírus a dispersão de aerossóis através de partículas expelidas pela tosse, espirro e fala por pessoas infectadas.

A possibilidade de transmissão de Sars-CoV-2 por aerossóis, levanta questionamentos e tem um desdobramento alarmante, pois, se considerado apenas a transmissão através de gotículas expelidas pelo espirro e saliva, estas sofrem maior ação da gravidade, sendo depositadas quase que imediatamente, não percorrendo grandes distâncias. Já os aerossóis permanecem por diversas horas em suspensão no ar, alcançando distâncias maiores através das correntes de ar.

A propagação do COVID-19 se dá, principalmente, através de partículas infectadas pelo SARS-CoV-2 que são inaladas ou transmitidas por toque em superfícies contaminadas. Ao analisar a permanência dos aerossóis em ambientes internos, algumas partículas são jogadas para fora do ambiente, por meio de ventilação, outras são depositadas no chão ou em superfícies (carteiras, mesa, maçaneta).

O problema enfrentado por toda população é que até o presente momento, tem-se pouca informação quantitativa, com substratos teóricos e práticos que apresentem parâmetros de referência para ocupação de espaços comuns e qual o melhor cenário para essa ocupação (janelas abertas, ventilação ambiente, ar-condicionado ligado, entre outros fatores). Apenas são apontadas suposições de que, quanto mais ventilado o ambiente e maior a distância entre pessoas, melhor. Porém, ainda não dispuseram estudos que comprovem tais conceitos.

Este projeto tem por objetivo criar cenários que indicarão o comportamento das partículas de aerossóis a partir da análise e da interpretação de resultados

utilizando modelagem multifísica de dispersão de gotículas em um ambiente tridimensional. Com isso, deseja-se identificar condições otimizadas para uma sala exemplo que possa servir como parâmetro para determinação de condutas em ambientes similares. Para atender à demanda de respostas para as inúmeras questões levantadas sobre as formas de transmissão, foi conduzida uma investigação sistemática baseada em Dinâmica de Fluidos Computacionais, do inglês, Computer Fluid Dynamics (CFD), do fluxo do ar interno e o transporte de aerossóis em uma sala de aula.

2

Revisão Bibliográfica

2.1

O vírus SaRS-CoV-2

Um novo vírus chamado SaRS-CoV-2 surgiu no mundo causando surto de doenças respiratórias e, embora já tivessem existido outros surtos anteriormente e sido controlados (SARS, MERS e Gripe Espanhola), os números de pessoas infectadas nem se comparam aos milhões de casos confirmados de pessoas infectadas pela pandemia do Covid-19. Esse vírus possui a capacidade de se espalhar facilmente e de forma rápida através do sistema respiratório (Shafaghi et al., 2020).

O vírus foi notificado pela primeira vez em Wuhan, China, e apresenta taxa de transmissão muito maior quando é observada em ambientes fechados do que em ambientes externos. (Ahmadzadeh; Farokhi; Shams, 2021). De modo geral, o risco de transmissão de doenças é afetado, especialmente pelos fatores a seguir: 1) características do tamanho das partículas contaminadas, 2) fluxo de ar, 3) tipo de vírus, 4) características do vírus (Kohanski; Lo; Waring, 2020).

Segundo Mohamadi e Fazeli, (2022), a pandemia do novo coronavírus não afetou apenas a vida das pessoas em todo o mundo, mas também prejudicou as economias dos países. A contaminação pelo vírus SARS-CoV-2, assim como muitas outras doenças respiratórias, apresenta como principal forma de transmissão, a disseminação através do ar, desta forma, pode afetar rapidamente grande parte da população mundial, matando milhares de pessoas.

De acordo com Bhattacharyya et al., (2020), a taxa de mortalidade desta doença é entre 2% e 3% e a maioria dessas estatísticas se relaciona com a idade e histórico de saúde das pessoas infectadas. Novas mutações do SaRS-CoV-2 têm surgido e estão tornando-se preocupação a nível mundial. Desta forma, cada país está adotando medidas de contenção para controle e erradicação do vírus em suas nações (Ahmadzadeh; Farokhi; Shams, 2021).

Estudos publicados anteriormente sugeriram que, a propagação do vírus SARS-CoV-2 ocorria, principalmente pela dispersão de grandes gotas em uma trajetória balística de, aproximadamente 1 a 2 metros ou por contaminação em

superfícies. Em contrapartida, trabalhos recentes apontaram que, a propagação de gotículas com índices de longo alcance ocorre por partículas ou gotículas menores, denominadas *aerossóis*. (Rencken et al., 2021).

Segundo Borak, (2020), a disseminação global do vírus ensinou à toda a população o quão pouco se conhece sobre o vírus e os mecanismos pelos quais ele se espalha. Sabe-se sobre sua transmissão através de secreções nasais ou gotículas mucosas, que são emitidas durante a fala, espirro ou tosse. Diante da falta de informações precisas e o desconhecimento sobre como o vírus se comporta e efetivamente se espalha nos ambientes, Wilson et al. (2020) afirma que, “pesquisas urgentes são necessárias para entender melhor sobre a transmissão aérea e medir a produção de aerossóis virais durante a atividade respiratória e procedimentos médicos” (Wilson; Corbett; Tovey, 2020).

A Organização Mundial da Saúde (OMS, 2020), aponta que, a principal forma de transmissão se dá através da disseminação direta e indireta de gotículas. Com base em evidências, a OMS recomenda precauções de contato para pessoas que cuidam de pacientes com COVID-19, assim como precauções no ar para ambientes e/ou circunstâncias em que os geradores de aerossóis possuem avaliação de risco. Ao mesmo tempo, os Centros de Controle e Prevenção de Doenças dos EUA recomendam que em qualquer situação que envolva pessoas com COVID-19, seja considerado o uso de máscaras como uma opção, especialmente máscaras (N95, FFP2 ou FFP3). (OMS, 2020).

A organização “Our World In Data”, órgão especializado em divulgar pesquisas experimentais e dados analíticos sobre mudanças e aspectos em todo o mundo, divulgou em sua página, estudos sobre o aumento das taxas de infecção e morte a nível global, apontando dados empíricos em tempo real, desde o momento que o primeiro caso confirmado foi divulgado. A Figura 1 mostra o avanço dos casos diários confirmados de COVID-19, por milhão de pessoas em todo o país, iniciando em março de 2020 a maio de 2022. (OUR WORLD IN DATA, 2022).



Figura 1: Casos de COVID-19 confirmados no Brasil, por milhão de pessoas

As Figuras 2, 3 e 4 mostram o avanço do SARS-CoV-2 a nível global, nos anos 2020, 2021 e 2022, respectivamente, demonstrando o avanço do vírus em todo o mundo. É interessante observar que, a diferença de tamanho da população entre os países é grande, e que o número real de casos pode ser muito maior do que o número de casos confirmados, já que muitas pessoas contaminadas não fazem o teste para atestar infecção pelo vírus SARS CoV-2.

Segundo a OMS, em 31 de dezembro de 2019, houve o alerta sobre diversos casos de pneumonia na cidade de Wuhan, na China, porém, em 7 de janeiro de 2020, as autoridades chinesas confirmaram que se tratava de um novo tipo de coronavírus, que ainda não havia sido identificado em humanos. (OMS, 2022).

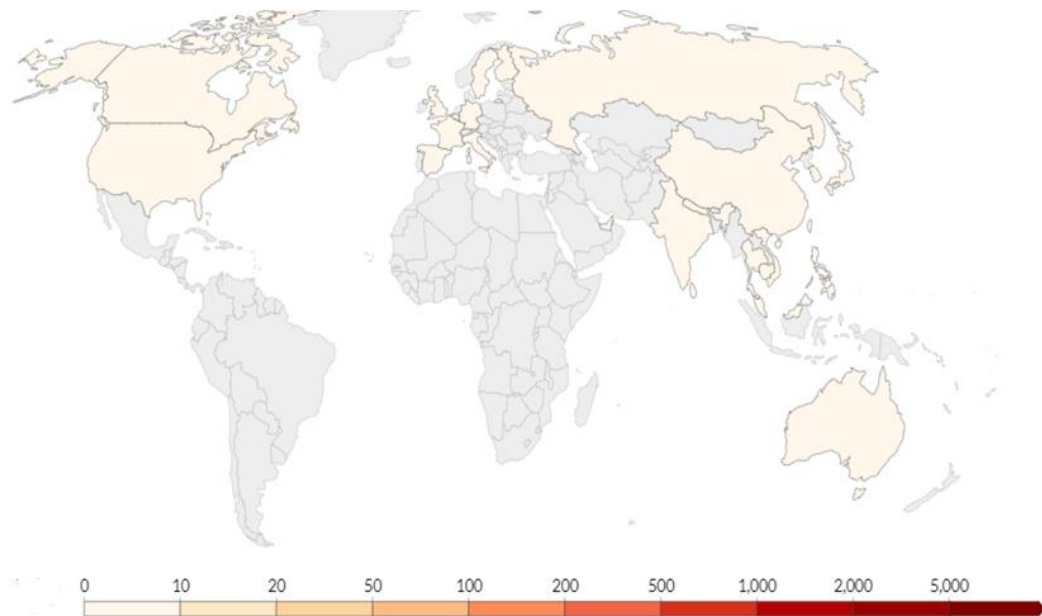


Figura 2: Número de Casos de COVID-19 no mundo, por milhão de pessoas em janeiro de 2020

O nível de infecção pelo vírus SARS CoV-2 foi considerado altíssimo e, embora tenham sido feitas diversas tentativas de fechar as fronteiras dos países na tentativa de conter a circulação do vírus e assim, diminuir o número de infectados pela COVID-19, ele se espalhou rapidamente, como pode-se observar na Figura 3. Diante disso, em março de 2020, foi declarada uma nova pandemia.

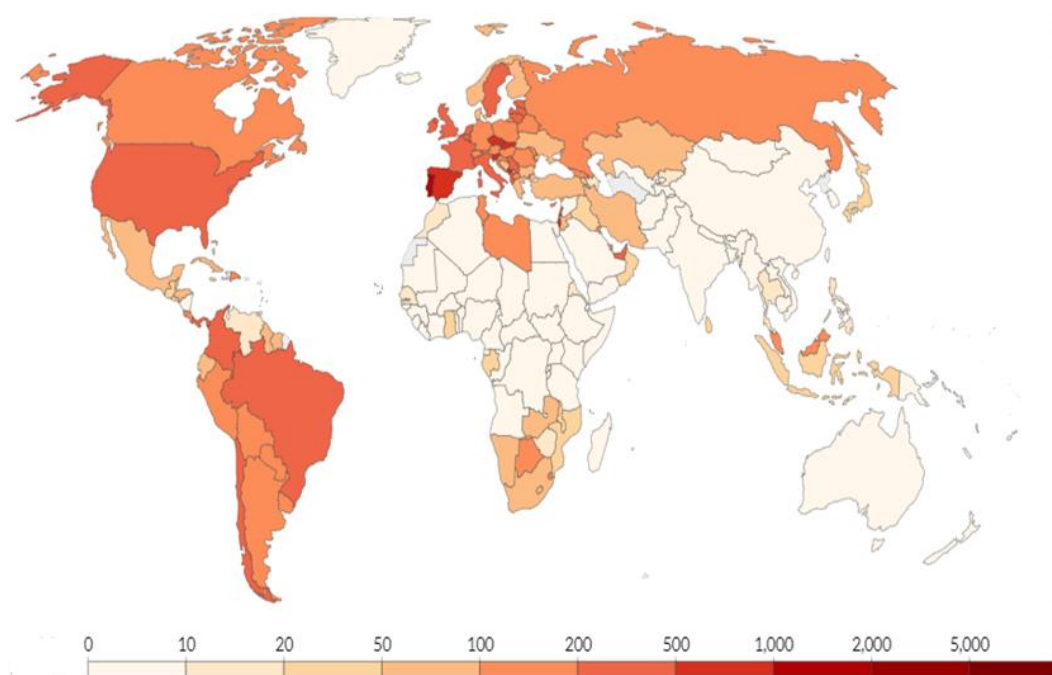


Figura 3: Número de Casos de COVID-19 no mundo, por milhão de pessoas em janeiro de 2021

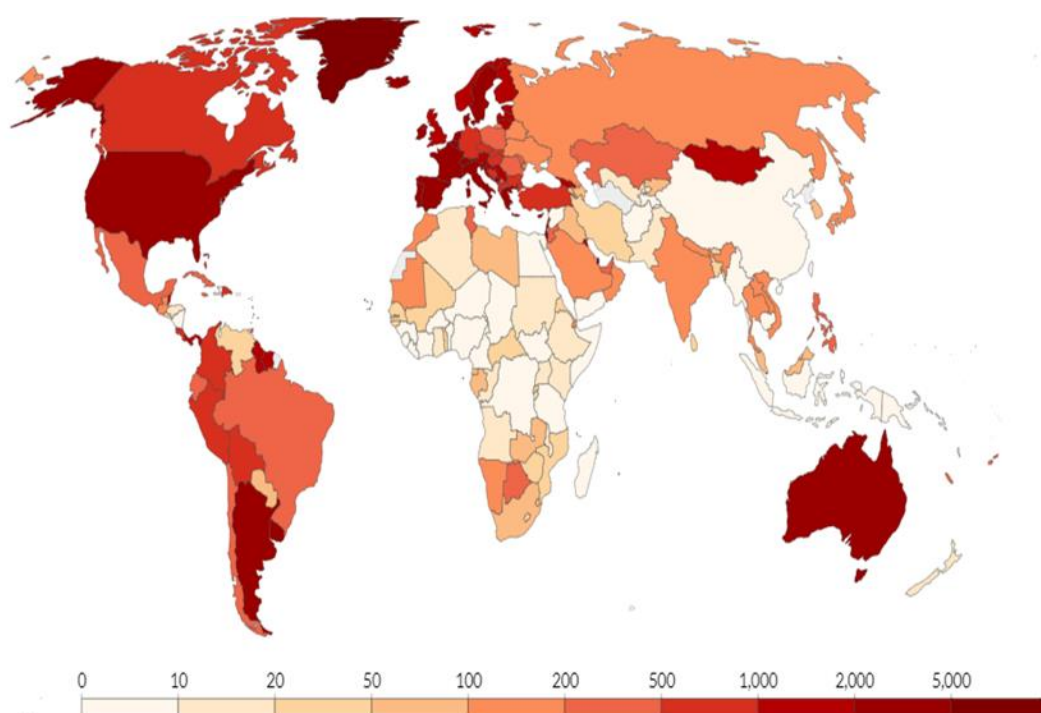


Figura 4: Número de Casos de COVID-19 no mundo, por milhão de pessoas em janeiro de 2022

Passados dois anos desde que o primeiro caso de contaminação pelo SARS-CoV-2 foi confirmado, finalmente em maio de 2023, a OMS declarou o fim da pandemia. A distribuição de vacinas e campanhas de conscientização contribuiu significativamente para reduzir os índices de contaminação, porém, ainda não foi alcançado o objetivo de suprimir a contaminação do vírus, especialmente devido às sub-linhagens e evolução genética do SARS-CoV-2. (Paho, 2022).

Especialistas afirmam que, embora o número de casos e mortes por COVID-19 tenham diminuído, não se pode ignorar os riscos de novos surtos causados pelo vírus, pois grande parte da população mundial, ainda não recebeu nenhuma dose da vacina. (OPAS, 2022).

2.1.1

Transmissão aérea do vírus SaRS-CoV-2

A doença do novo coronavírus se tornou uma das piores pandemias dos últimos séculos em número de mortes. Foi relatada pela primeira vez na cidade de Wuhan, China, no ano de 2019 (Chen, 2020), e tem como agente causador o vírus SaRS-CoV-2, que é um vírus altamente contagioso e que, segundo dados da Organização Mundial da Saúde (OMS), o número de mortes pela pandemia do COVID-19, ultrapassou 4,5 milhões de pessoas. (Jayaweera et al., 2020).

Segundo Fennelly, (2020), aerossóis infecciosos são suspensões de patógenos em partículas no ar, sujeitas às leis físicas e biológicas. O tamanho das partículas é o ponto determinante do comportamento do aerossol. Partículas com tamanho de 5 μm ou menores podem permanecer no ar por um tempo indefinido, na maioria das condições internas, a menos que haja remoção devido a correntes de ar ou ventilação de diluição no ambiente. Geralmente, a transmissão do COVID-19 consiste em duas vias principais: através da transmissão por contato e da transmissão por gotículas. (Che; Ding; Li, 2022). A transmissão por gotículas, onde são encontradas gotículas e partículas, contendo vírus menores (conhecidas como aerossóis, com diâmetro inferior a 5 μm), podem ser suspensas no ar por longas distâncias (Ding; Yu; Cao, 2020).

Para começar a analisar o papel dos aerossóis respiratórios na distribuição da infecção, faz-se extremamente necessário conhecer a distribuição de tamanho dos aerossóis, os mecanismos e locais de produção de partículas. Doenças

respiratórias transmitidas pelo ar, como o Covid-19, representam desafios significativos para o transporte público. (Zhang et al., 2021). A dispersão das partículas e gotículas respiratórias no ar, sob diferentes condições internas e layouts, tem sido amplamente investigada, no intuito de avaliar a infecção de pessoas em ambientes confinados. (Mohamadi; Fazeli, 2022).

De acordo com Balachandar et al., (2020), gotas muito grandes, de tamanhos possíveis de serem vistas a olho nu, são minimamente afetadas pelo sopro. Essas gotículas viajam semi-balisticamente, com apenas um ajuste mínimo de arrasto, mas caem rapidamente devido à atração gravitacional. Gotículas menores ($\lesssim 100 \mu\text{m}$), que permanecem suspensas dentro do sopro, são advectadas para frente, conforme demonstrado na Figura 5.

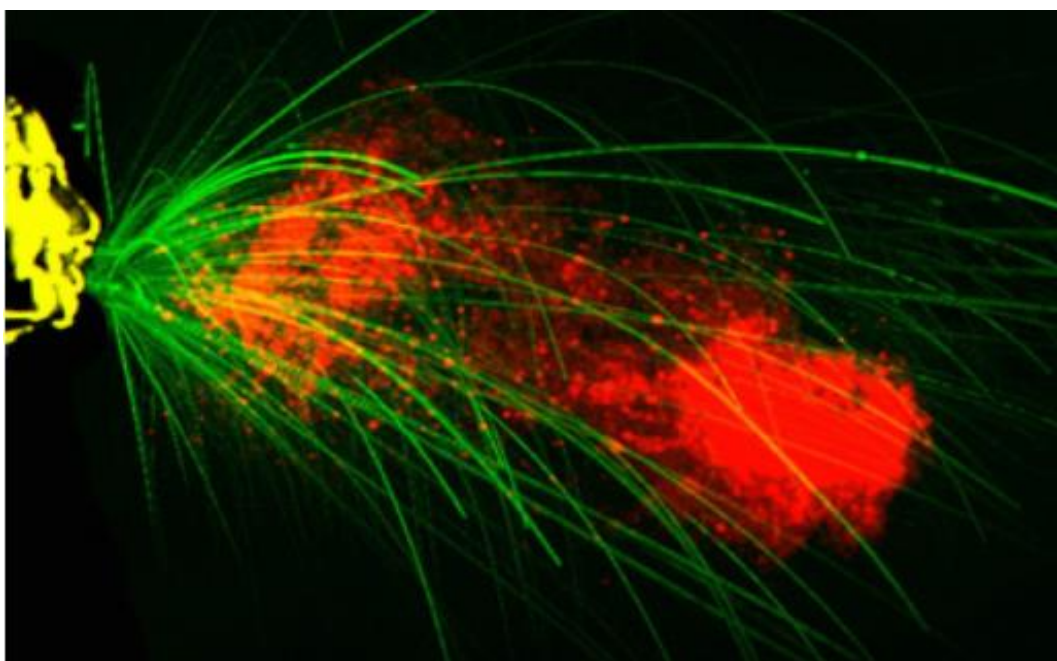


Figura 5: Reprodução de espirro e tosse, mostrando gotas maiores semi-balísticas, visíveis a olho nu, da ordem de mm

Estudos comprovaram que, pessoas infectadas produzem um número maior de partículas ao tossir, em comparação com pessoas saudáveis. (Wilson et al., 2020). Embora as diretrizes da indústria para controlar a propagação de aerossóis tenham adotado um espaçamento de 1,8 metros em ambientes fechados, evidências sugerem que, a disseminação em maior alcance é responsável em espaços públicos, como restaurantes, transporte público, hotéis, hospitais, prédios de vários andares e cruzeiros navios. (Rencken et al., 2021). Desta forma, estudos sobre como acontece a dispersão dessas partículas em

ambientes fechados estão sendo amplamente realizados, no intuito de reduzir os índices de contaminação nesses ambientes.

Compreender como os vírus se propagam é um passo importantíssimo para a implementação de medidas de proteção. O SARS-CoV-2 é um vírus que pode ser transmitido diretamente e indiretamente entre as pessoas. No entanto, estudos apontam que a sua principal forma de transmissão ocorre por meio de gotículas respiratórias, que são geradas durante a respiração, tosse, fala e espirro. (Shafaghi et al., 2020).

Considerando que estudos anteriores sugerem que a disseminação do SARS-CoV-2 se dava, principalmente, devido a grandes gotas dispersas em uma trajetória balística aproximada de 1 a 1,8 m, ou por contaminação da superfície, trabalhos mais recentes destacaram que, o veículo para disseminação de longo alcance, como gotículas menores ou partículas, denominadas aerossóis, permaneçam suspensos no ar por longos períodos de tempo e, possivelmente, sejam mais infecciosos do que as partículas maiores. (Rencken et al., 2021).

Segundo Balachandar et al., (2020), a recomendação atual de 1,8 metros, considerada como distância segura é um tanto desatualizada e baseada na suposição de que a rota direta é o principal mecanismo de transmissão.

A capacidade do vírus de se espalhar fácil e rapidamente através do sistema respiratório entre os indivíduos, bem como o período de incubação de longo prazo, distingue o vírus de outros vírus em sua família, tornando-se assim, um problema de saúde global. Estudos recentes relataram que esse vírus poderia ser transmitido pelo ar por núcleos de pequenas partículas conhecidas como aerossóis, que são definidos como uma coleção de partículas sólidas ou líquidas suspensas em uma fase gasosa. (Shafaghi et al., 2020).

De acordo a OMS, a transmissão aérea é diferente da transmissão por gotículas, pois a transmissão aérea se refere à presença de micróbios dentro dos núcleos das gotículas, que geralmente são consideradas partículas < 5µm de diâmetro e podem permanecer no ar por longos períodos de tempo podendo ser transmitidas a outras pessoas, até mesmo em distâncias superiores a 1 metro. (OMS, 2020).

Estudos de amostragem do ar em aeronaves e centros de saúde demonstraram um significativo de cópias do genoma viral nas partículas transportadas pelo ar. Houve estudantes de medicina que contraíram o vírus SARS-CoV-2, mesmo estando a mais de um metro de distância do paciente contaminado. (Wilson et al., 2020).

Sabe-se que há diferentes formas de transmissão, porém, predominantemente, a contaminação pelo vírus ocorre por partículas transportadas pelo ar, de pessoa para pessoa, especialmente em ambientes fechados e com pouca ventilação. Esta forma de propagação do vírus representa desafios enormes para retorno a ocupação de ambientes coletivos de forma segura, como transportes públicos, escolas, shoppings, cinemas etc. (Zhang et al., 2021a). Diante da constatação de que dentre os mecanismos de transmissão destaca-se o aéreo, a prática do uso de máscaras de proteção tornou-se popular, como forma de prevenção.

Os aerossóis são leves e sobrevivem no ar, por horas, com elevado potencial de contaminação, especialmente quando considerados sistemas de ar-condicionado, pois os aerossóis são leves e pequenos o bastante para serem aspirados pelo aparelho atravessando os seus filtros. (Campos; Guedes, 2020). Como o ar interno não é renovado, os índices de contaminação se elevam, pois, as partículas contaminadas permanecem flutuando por todo o ambiente.

Em seus estudos, Kotb e Khalil, (2020) simularam a transmissão do Covid-19 em um espaço fechado, considerando o espirro e a tosse de uma pessoa infectada movendo-se dentro de uma cabine de aeronave. Os resultados mostraram que as partículas do espirro tiveram efeitos mais prejudiciais do que as partículas da tosse. Também, constatou-se neste estudo que, quanto mais rápido a pessoa se move, maior a dispersão das gotículas, percorrendo por longas distancias dentro do ambiente. (Mirzaie et al., 2021).

A tabela 1 apresenta precauções que devem ser tomadas ao realizar procedimentos, no intuito de prevenir a transmissão aérea do COVID-19.

Tabela 1: Procedimentos para evitar a transmissão aérea de vírus (Adaptado de “Airborne transmission of severe acute respiratory syndrome coronavirus-2”, 2020).

Precauções no Ambiente	Precauções para o Profissional de Saúde	Precauções para o Paciente	Precauções nos Procedimento Hospitalares
Aumentar as taxas de ventilação no local	Usar EPI adequado em momentos de risco de transmissão	Usar máscara cirúrgica	Minimizar a tensão de cisalhamento nas vias aéreas

Se não houver sistema formal de ventilação, abra janelas e portas.	Usar viseira	Evitar tossir, espirrar, falar	Evitar ciclagem de abertura e fechamento das vias aéreas
Aumentar a temperatura, umidade e luz UV	Usar a proteção de máscara aérea mais eficiente disponível	Evitar falar muito alto, fluxos e volumes expiratórios	Evitar broncoscopia e ressuscitação cardiopulmonar-RCP
Evitar locais pequenos e lotados	Manter-se fora da pluma de exalação direta	Evitar que o pulmão fique sem ar ou entre em colapso	Usar máscaras ou capuzes selados com filtros virais
	Minimizar o tempo em contato próximo com o paciente		Minimizar a sucção
	Respirar nasalmente e reduza o volume minuto		Prevenir a tosse

2.1.2

Relação do tamanho dos aerossóis com a distância percorrida

De acordo com Abuhegazy et al., (2020), descobriu-se que uma fração de 24% a 50% das partículas menores que 15 μm saem do ambiente em 15 minutos através do sistema de ar-condicionado, já as partículas maiores que 20 μm são quase inteiramente depositadas no chão, mesas e superfícies próximas.

Para Bourouiba, (2021), as gotas que variam em diâmetro de 1 a 1000 μm , são comparadas o tempo de evaporação completa de gotículas isoladas com seu tempo de sedimentação e, relatou que partículas com o diâmetro $>100 \mu\text{m}$, assentam na forma líquida, no solo, em menos de um segundo. (Bourouiba, 2021).

Em seus estudos, Fennelly, (2020), aponta que, aerossóis de tosse e de respiração exalada de pacientes com infecções respiratórias mostraram semelhanças marcantes nas distribuições de tamanhos de aerossóis, com predominância de patógenos em partículas pequenas ($<5 \mu\text{m}$), onde, estes são imediatamente respiráveis, sugerindo a necessidade de proteção respiratória individual para indivíduos próximos a pacientes com patógenos potencialmente virulentos.

Segundo Fawwaz Alrebil et al., (2022), os microrganismos podem ser transmitidos através do contato direto ou indireto com uma pessoa infectada ou objeto contaminado ou por meio de transmissão aérea. Isso ocorre quando gotículas respiratórias, geralmente maiores que 5 μm de tamanho, são transmitidas de uma pessoa infectada e viajam no ar por distâncias para atingir outra pessoa. O fluxo de ar e o sistema de ventilação no ambiente desempenham um papel significativo na transmissão de patógenos.

Em diferentes ambientes, onde há o acúmulo de pessoas, pode haver um risco elevado de contaminação se não forem tomados os devidos cuidados. Em ônibus, por exemplo, o fluxo de ar é afetado por diversos fatores, como sistema de ar-condicionado, ventilação, abertura de portas para entrada e saída de passageiros, janelas (abertas ou fechadas), respiração, movimentação de pessoas, dentre outros. Desta forma, estudos publicados no início da pandemia apontavam que partículas maiores que 100 μm são mais pesadas, caindo dentro de 2m de distância de serem exaladas. (Zhang et al., 2021).

Em seus estudos, Fennelly, (2020) destaca que, estudos de imagem sofisticados, mostraram que plumas de aerossóis são geradas por espirros ou tosse. A pluma de aerossol contém a maior concentração de partículas que se dissipam no ar ao longo do tempo e da distância. Essa distância agora considerada, é muito maior do que anteriormente estimado, onde as partículas viajam entre 7-8 metros.

De acordo com Fears et al., (2020), os resultados da suspensão de aerossol sugerem que o SARS-CoV-2 persiste por mais tempo do que seria esperado quando gerado como partícula desse tamanho (diâmetro aerodinâmico mediano de massa de 2 μm).

Segundo (Rencken et al., 2021), o limite superior para o tamanho desses aerossóis é de 5 μm , com possibilidade de partículas menores que 100–200 μm se tornarem aerossóis por evaporação. A equação de Stokes sugere que a velocidade relativa entre a partícula e o ar circundante é inferior a 10^{-3} ms^{-1} , ou seja, que os aerossóis seguem a trajetória das correntes de ar ambiente.

Todavia, não se considera as partículas menores, que viajam pela corrente de ar ambiente, ficando suspensas no ar, contendo carga viral, atingindo pessoas que estão distantes da fonte propagadora do vírus. Espirrar pode gerar cerca de um milhão de gotículas de até 100 μm de diâmetro, além de vários milhares de partículas maiores formadas predominantemente de saliva na parte frontal da boca. (Xie et al., 2007). Esse fator de transporte de deposição das partículas, são

fortemente influenciados pela localização da fonte de exalação dos aerossóis. Segundo Abuhegazy et al., (2020), as barreiras de vidro reduzem a transmissão do aerossol e cerca de 92%, quando consideradas partículas de 1 μm e estando o agente transmissor separado por pelo menos 2,4 metros.

De acordo Xie et al., (2007), no ano de 1934, Wells estudou a evaporação de gotas em queda, usando cálculos simples, que revelaram que gotículas menores que 100 μm de diâmetro secaria totalmente antes de cair no chão a 2 m de distância, ou seja, a altura humana média. Este achado permitiu estabelecer a teoria da transmissão de gotículas e núcleos de gotículas em função do tamanho da gotícula infectada. Este estudo também demonstrou que, gotículas menores que o diâmetro citado, permanecem suspensas no ar por um longo tempo, podendo ser carregadas por longas distancias pela corrente de ar no ambiente.

Segundo estudos realizados por Shafaghi et al., (2020), foi observado que a distância máxima de queda de gotículas é de 6,5 m para gotículas geradas por tosse, o que implica que a gota exalada pode se mover ao longo dessa distância, antes de cair em um ambiente interno sem qualquer fluxo. Desta forma, a distância mínima, comumente sugerida pelas autoridades, de 1 a 2 m, não pode considerada segura, especialmente em ambientes fechados.

As velocidades das partículas variam de acordo com o tipo de expiração. A respiração pode gerar fluxo de ar de até 1 ms^{-1} , a fala até 5 ms^{-1} , a tosse entre 2 e 50 ms^{-1} e os espirros > 100 ms^{-1} . A força de cisalhamento geradas pela tosse e pelo espirro levam à expulsão de um grande número de partículas, de tamanhos variados. (WILSON et al., 2020).

2.1.3

Influência dos mecanismos de ventilação do ambiente sobre os índices de transmissão

Geralmente, os sistemas de ventilação são entendidos como sistemas naturais e sistemas mecânicos. O sistema de ventilação natural, depende de fluxos de ar passivos, através de aberturas (janelas, portas, frestas), enquanto o sistema de ventilação mecânica, se dá por meio de ventiladores e dutos. (MOTAMEDI et al., 2022).

A renovação do ar no ambiente é um fator extremamente importante no que aspecto de prevenção de contaminação em locais fechados. Diversos

ambientes climatizados não possuem as condições adequadas de renovação ou tratamento de ar, elevando os riscos de transmissão de doenças respiratórias. (CAMPOS; GUEDES, 2020).

Foi confirmado que a COVID-19 pode ser transmitida por meio de gotículas criadas quando um ser humano infectado tosse ou espirra. (FENG et al., 2020). Com tantos casos de contaminação por COVID-19, decisões baseadas em evidências precisam ser aderidas, principalmente para situações em ambientes confinados. A transmissão de aerossóis dentro desses espaços torna-se profundamente complexa e as trajetórias sob diferentes condições climáticas devem ser entendidas. (JAYAWEERA et al., 2020).

Segundo estudo feito por Abuhegazy et al., (2020), ao abrir as janelas, a fração de saída das partículas aumenta em aproximadamente 38% em comparação com janelas fechadas e reduz a deposição de aerossol nas pessoas presentes no ambiente.

De acordo Che; Ding e Li, (2022), o desempenho da ventilação natural é limitado a múltiplos fatores internos e externos, como a estrutura do edifício, direção predominante do vento, condições climáticas, entre outros, o que torna a análise da ventilação cruzada em edifícios bastante complexos.

Além disso, a rápida transmissão da pandemia de COVID-19 indicou que os atuais esquemas de projeto de ventilação cruzada (por exemplo, projeto de portas e janelas, da maioria dos edifícios, podem ser insuficientes para fornecer taxa de ventilação necessária, para evitar a transmissão de doenças infecciosas. (CHEN; FENG, 2019).

Ao analisar o efeito da umidade relativa do ar no ambiente de estudo, Xie et al., (2007) observou que em um ambiente com umidade relativa mais alta, as gotículas evaporam muito mais lentamente, e, portanto, caem mais rapidamente, demorando mais tempo para sair de um jato e cair a 2 metros de distância.

Quanto ao tempo de vida do vírus, um estudo experimental feito por Shafaghi et al., (2020), demonstrou que o SARS-CoV-2 aerossolizado permanece viável no ar com meia-vida de cerca de 1 h. Como resultado, a estimativa do caminho de gotículas grandes antes do assentamento, a caracterização dos aerossóis e o transporte dos núcleos das gotículas no ar e a avaliação dos parâmetros ambientais, como a corrente de ar no caminho das gotículas, significa que é vital tomar precauções. Quando consideradas partículas de 1 μm , cerca de 69% saem do sistema, quando as janelas estão abertas. (ABUHEGAZY et al., 2020).

Para Mirzaie et al., (2021), os sistemas de ventilação frequentemente utilizados, alteram a concentração das gotículas, assim como a temperatura e a umidade do ar interno. Desta forma, estudos sugerem que a ventilação insuficiente, aumenta significativamente os riscos de transmissão de doenças nos ambientes.

Ensaio realizado por Ren et al., (2021), simularam estratégias de ventilação em uma enfermaria típica, com pacientes infectados pelo SARS-CoV-2, considerando gotículas com variados diâmetros. Ainda neste estudo, foi observado que partículas menores se movem de acordo com os fluxos principais, atingindo longas distâncias, muitas delas saem do sistema, através da ventilação.

Entretanto, partículas maiores não são carregadas pelos fluxos de ar, sendo sua grande maioria sedimentada em superfícies sólidas, percorrendo pequenas distâncias. De acordo com Fawwaz Alrebi et al., (2022), o fluxo de ar e os sistemas de ventilação desempenham um papel significativo na transmissão de patógenos.

Um estudo realizado por Chandra Shekar et al., (2021), considerou um modelo de uma sala de isolamento, com um paciente infectado por doença aguda, transmitida através das vias aéreas, e uma ventilação eficaz no ambiente. A posição da ventilação de entrada e saída da simulação, foi adequada para direcionar as partículas do vírus para a saída, mantendo uma pressão negativa. Ao fim do estudo, pôde-se observar que, ao alterar os locais de entrada e saída de ar, minimizou-se a propagação das partículas contaminadas, usando o fluxo de entrada de ar contra as gotículas difusas.

2.1.4

O uso da proteção respiratória e facial, para controle de contaminação pelo SARS-CoV-2

No que diz respeito à proteção respiratória, atualmente existem evidências fracas de que o uso de respiradores oferece melhor proteção do que máscaras cirúrgicas para SARS-CoV-2 ou outros vírus. A proteção ocular deve ser garantida sempre que houver risco de respingos, gotículas ou aerossóis. (Peres; Boléo-Tomé; Santos, 2020).

Por recomendação dos órgãos de saúde, o uso de máscaras tem sido adotado para controle e redução dos índices de contaminação. Este método tem como principais vantagens o seu baixo custo e a possibilidade de imediata

implementação, não necessitando nenhuma intervenção na infraestrutura dos ambientes.

A principal desvantagem deste método de prevenção é que seu uso em ambientes fechados, onde não existe a renovação do ar (como ambientes com ar condicionado, por exemplo), assume-se o risco da existência de ambientes saturados com partículas contaminadas, sendo a máscara a única proteção dos usuários. Muitas delas, não atingem a proteção adequada, pois, ao serem fabricadas de forma caseira, utilizando-se de tecidos que possuem poros com tamanho superior às partículas contaminadas pelo Sars-CoV-2, assim, estas partículas atravessam facilmente o tecido ou se depositam no mesmo, elevando os riscos de contaminação dos usuários.

Em junho de 2020, a Organização Mundial da Saúde (OMS) recomendou que as máscaras descartáveis fossem usadas apenas pelos profissionais da saúde, casos suspeitos ou confirmados de infecção e pessoas com doenças autoimunes, devido à uma política global de uso de máscaras durante a pandemia, o que ocasionou a escassez do equipamento para profissionais de saúde. Desta forma, a OMS orientou a população para fabricação de máscaras de tecido adequado, para amplo uso em locais públicos, onde não há como se fazer distanciamento social. (Ortelan et al., 2020).

As máscaras são barreiras físicas efetivas no intuito de limitar a transmissão por contato direto ou indireto em curtas distancias e dispersão de gotículas. Estudos apontam que as máscaras faciais (adaptadas e usadas corretamente) interrompem a dispersão das partículas expelidas pelo espirro e tosse, bloqueando a transmissão de doenças respiratórias. Diante disso, recomenda-se o uso de máscaras, também, por pessoas assintomáticas, como intervenção de saúde pública, no intuito de bloquear a transmissão e as fontes infecciosas aparentemente saudáveis. (Garcia, 2020).

Com a obrigatoriedade do uso de máscaras, surgiu uma diversidade enorme de modelos decorados, coloridos, produzidas em algodão, tecidos sintéticos, com formas e tamanhos variados. (Souza; Farias, 2020). Embora as máscaras de fabricação caseira apresentem desempenho inferior às máscaras cirúrgicas e as máscaras N95, estas são capazes de reter partículas e vírus transportados pelo ar, de modo que, esses não alcancem pessoas próximas. (Garcia, 2020).

Em seus estudos, (Garcia, 2020) aponta que, embora as máscaras faciais ofereçam benefícios de proteção incertos, seu uso pode contribuir na

conscientização da responsabilidade coletiva e pessoal, especialmente no contexto de enfrentamento a doenças infecciosas. No ano de 2002, o comprometimento da população ajudou a controlar a pandemia da Síndrome Respiratória Aguda Grave (SARS) e, também, se faz fundamental na luta contra a nova pandemia do Covid-19.

Em março de 2022, alguns estados do Brasil, começaram a decretar o fim da obrigatoriedade do uso de máscaras em qualquer lugar, com exceção das pessoas que possuem imunossupressão, comorbidades graves e que ainda não se vacinaram. Alguns locais exigem o passaporte vacinal, para entrada em estabelecimentos e eventos, mas governantes pretendem acabar com esta exigência, quando a população vacinada atingir 70% de imunização, com a dose de reforço.

A Fiocruz emitiu uma nota técnica sobre o contexto da flexibilização das medidas protetivas, reafirmando que ainda há o enfrentamento da pandemia de COVID-19. O instituto afirma que o uso das máscaras faciais no dia a dia, é uma importante medida de proteção e, tem a vacinação, como principal medida de controle da pandemia. Ressalta, ainda, a importância da manutenção das medidas sanitárias, como ventilação em locais fechados e higienização das mãos, mesmo considerando a redução de transmissibilidade e medidas de flexibilização. (Estrada, 2022).

2.2

Fluidodinâmica computacional (Computer Fluid Dynamics- CFD)

A modelagem numérica de dinâmica de fluidos computacional, do inglês, Computer Fluid Dynamics (CFD) tem sido usada para ajudar na modelagem da propagação e transporte de gotículas por meio de espirros, tosse e outros eventos expiratórios. Existem vários estudos numéricos simulando a propagação e deposição de gotículas virais e aerossóis em ambos os ambientes externos e espaços fechados, como enfermarias de hospitais, escritórios, cabines de aeronaves e mictórios por meio de simulações CFD. (Narayanan; Yang, 2021).

A Fluidodinâmica Computacional é uma ferramenta que auxilia a resolução de problemas da dinâmica dos fluidos através dos métodos numéricos. É comumente aplicada em engenharia de aeronaves, automobilismo, meteorologia, oceanografia, entre outros (Simões, 2009).

De acordo com Messias, (2016), CFD é um braço da mecânica dos fluidos e da transferência de calor, que estuda os fluxos de fluidos usando análise numérica e sofisticados algoritmos

Segundo Maitelli, (2010), a Fluidodinâmica Computacional- CFD, é a análise de sistemas de equações diferenciais parciais (EDP's) que envolvem problemas de escoamento dos fluidos, transferência de calor e outros processos, com a finalidade de obter soluções numéricas para o cálculo de pressões, velocidade e temperatura através de simulações computacionais.

Conforme Vianna et al., (2014), a Fluidodinâmica Computacional estuda os fenômenos relacionados com a movimentação de fluidos e suas propriedades. O ponto de partida são as equações básicas dos fenômenos de transporte.

Para Augusto, (2014), *Computer Fluid Dynamics* - CFD consiste em um conjunto de ferramentas e técnicas usadas na análise de sistema, envolvendo escoamento de fluidos, transferência de calor e massa e fenômenos associados, como reações químicas, através da simulação numérica.

Como há diferentes ambientes que demandam adequações e, considerando suas pluralidades de condições, podem ser feitos estudos através da fluidodinâmica computacional para viabilizar diferentes soluções, possibilitando análises complexas, tornando possível estimar de forma robusta o comportamento de diferentes sistemas de ventilação, assim como, os contaminantes se distribuem no ambiente. (Campos; Guedes, 2020).

Para simular o transporte transiente, condensação/evaporação e deposição de gotículas carregadas de SARS-CoV-2, emitidas por tosse, com diferentes velocidades de vento e diâmetros de partículas, são fornecidas informações sobre as diretrizes de modelos de fluidodinâmica computacional (CFD), para estabelecer evidências e informações sobre o distanciamento social. (Feng et al., 2020).

O processo de modelagem e simulação se inicia com a consideração de um conjunto de hipóteses, a respeito de como ocorrem os fenômenos físicos e químicos no interior dos equipamentos. O modelo é, então, resolvido numericamente, gerando respostas que são comparadas com os dados experimentais, para sua validação. (Vianna et al., 2014).

Estudos recentes investigam os efeitos de diferentes locais de fontes de aerossol, tamanhos de partículas, barreiras de vidro e janelas usando simulação CFD, e mostram como a mudança no fluxo de ar no domínio pode alterar

significativamente os padrões de deposição/remoção das partículas. (Narayanan; Yang, 2021).

Para Passos, (2012), a Fluidodinâmica Computacional é uma ferramenta computacional que pode ser empregada para prever ou analisar fenômenos físicos ou físico-químicos que ocorrem em escoamentos de fluidos, dentro de um volume pré-definido. Estes fluidos podem ser relacionados com a ação e a interação de fatores como dissipação, difusão, convecção, interações com superfícies, condições de contorno e turbulência.

Até o momento, a grande maioria dos esforços de simulação para prever a exposição à transmissão de gotículas considera a dinâmica de fluido computacional (CFD), onde o fluxo de ar turbulento é resolvido usando a média de Navier-Stokes de Reynolds (RANS) juntamente com o rastreamento de partículas Lagrangianas. (Zhang et al., 2021).

Shen, Zhang e Bierg (2012), acrescentam que os programas de CFD simulam o fluido numericamente com base em equações fundamentais dos fluidos (equações de Navier Stokes que descrevem conservação de massa, momento e energia no escoamento) e podem prever as características pormenorizadas do ar no interior e no entorno da construção.

Para Carreira et al., (2012), a fluidodinâmica computacional é, por definição genérica, a análise e a simulação numérica de processos físicos e/ou químicos, que envolvem escoamento de fluidos, com ou sem troca de calor e massa. Já para Silva, (2015), as técnicas CFD, baseiam-se nos princípios de conservação da massa, da quantidade de movimento e da energia. Desta forma, esses princípios são representados por equações diferenciais parciais não-lineares, de segunda ordem. Essas equações são funções do tempo e do espaço (tridimensional), sendo, por sua vez, discretizadas, isto é, transformadas em equações algébricas passíveis de serem resolvidas numericamente.

Em ambientes de sala de aula / saúde, uma alta taxa de ventilação é necessária para remover com eficácia os aerossóis carregados de vírus transportados pelo ar do domínio. Uma taxa de ventilação de pelo menos $288 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$ por pessoa é recomendado pela Organização Mundial da Saúde (OMS, 2021a). Segundo estudos, essa taxa ventilação pode não ser alcançada apenas com a ventilação natural, sendo necessário o uso de ventiladores e purificadores portáteis para ajudar a aumentar a ventilação líquida, para atingir o nível desejado. (Narayanan; Yang, 2021).

O estudo da dinâmica dos fluidos de transmissão de doenças ou, mais geralmente, de fluidos e saúde, visa elucidar a dinâmica fluida fundamental e os mecanismos biofísicos que moldam a dinâmica da missão de patógenos em que atuam gotas, bolhas e fluxos multifásicos e complexos papéis proeminentes nos processos de transmissão. (Bourouiba, 2021).

2.2.1

O Software COMSOL

O Software COMSOL Multiphysics, é uma poderosa ferramenta para elementos finitos, que possui módulos adicionais para expandir as capacidades do software base para as seguintes áreas de aplicação: CA/CC, Acústica, Engenharia Química, Ciência da Terra, Transferência de Calor, MEMS, RF e Mecânica Estrutural. O software também possui importação de Módulos, através de softwares de apoio e Biblioteca de Materiais. (Roger W. Pryor, 2009).

De acordo com o site oficial do software, COMSOL é o nome de uma empresa sueca que, desde 1998 comercializa software de modelagem técnica e simulação, que permite estudar aplicações químicas, elétricas, de fluidos e mecânicas. O produto base da marca é o COMSOL Multiphysics, que utiliza métodos avançados de modelagem e simulações de fenômenos físicos. O COMSOL pode ser usado em combinação com outros softwares, como Autocad e Matlab, por exemplo. (COMSOL, 2023).

O software apresenta uma interface que dispõe físicas prontas que descrevem a dispersão de gotículas e aerossóis, assim como configurações para receber dados de entrada, que podem ser usadas para formular as equações do modelo. (Ayuba, 2019). Trata-se de um programa especializado em solucionar equações, usando métodos dos elementos finitos, criando modelos e simulando sistemas físicos. (Barros; Junior, 2015).

O COMSOL conta com inúmeros módulos técnicos, que são divididos nas categorias: estrutural, elétrico, acústico, fluidos, calor, químico e multiobjetivo. Com módulos adicionais, pode-se obter uma funcionalidade especializada para eletromagnetismo, mecânica estrutural, acústica, transferência de calor, engenharia química e fluxo de fluidos. (COMSOL, 2023).

A plataforma do software possibilita utilizar as dimensões em 1D, 2D ou 3D, onde a simulação pode ser feita após inserir por meio de importação de

arquivo ou construindo no próprio software, selecionando as geometrias, o material, as unidades, o tipo da física e as medidas. (Ayuba, 2019).

2.2.2 Aplicações de modelos de fluidodinâmica computacional (CFD) em estudos sobre a pandemia do COVID-19

Diversos estudos têm sido realizados nos últimos anos, sobre modelagem de transmissão aérea do vírus causador do Covid-19. Questões importantes precisam ser abordadas, como, por exemplo, os sistemas de ventilação e, como podem afetar na disseminação do vírus dentro de salas de aula, assim como, em ambientes fechados.

Estudos experimentais nesse caso, seriam desafiadores, desta forma, a Fluidodinâmica Computacional (CFD), fornece ferramentas valiosas para simulação de cenários, onde será acompanhada a distribuição de gotículas carregadas de vírus e como acontece a propagação das partículas gerada pelo espirro, tosse e fala de pessoas infectadas. (Mirzaie et al., 2021).

De acordo Motamedi et al., (2022), a maioria dos estudos numéricos sobre a propagação da infecção do vírus empregam índices de exposição da qualidade do ar, que, geralmente agregam fontes de concentração de regiões infectadas, para avaliar os níveis de contaminação em ambientes fechados.

Segundo Mirzaie et al., (2021), devido à falta de dados experimentais sobre a dinâmica dos fluidos de gotículas infectadas com COVID-19, revisar as simulações já feitas e disponibilizadas sobre a disseminação da gotícula por meio de espirros, fala e tosse, é muito útil, especialmente para melhorar a compreensão das modelagens de transmissão de COVID-19.

Estudos de Gao e Niu, (2006), aplicaram um modelo de Fluidodinâmica Computacional Transiente Euleriano, simulando diferentes processos de respiração, avaliando os principais impactos em uma pessoa próxima a uma sala com sistema de ventilação natural. Os resultados mostraram que, um processo normal de respiração humana, está associado a um baixo risco de infecção, enquanto em caso de espirro ou tosse, o risco aumentaria em grande medida, dependendo da orientação relativa dos ocupantes.

Para Vita et al., (2023), a Modelagem Térmica Dinâmica (DTM) e a Fluidodinâmica (CFD), são duas metodologias amplamente utilizadas na indústria,

com validade para modelar o comportamento da ventilação interna de edificações, amplamente aceitas na comunidade de praticantes.

Os professores Qingyan Chen e Zhipeng Deng, da Escola de Engenharia Mecânica da Universidade de Purdue, usaram dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) para simular o fluxo de ar e rastrear o movimento das partículas exaladas de um paciente presumido em um restaurante. Foram simulados dois cenários: No primeiro, as janelas estão todas fechadas. No segundo, a janela frontal, esquerda e direita foram abertas. Cada simulação foi calculada para 10 minutos. A quantidade de aerossóis foi produzida enquanto comia e conversava. Para ambos os casos, foi comprovado que o ideal é ter pelo menos duas aberturas em lados opostos, facilitando a passagem do ar. (Padilla; Beard, 2021).

Em um levantamento feito em estudos numéricos, observou-se que, a maioria das estratégias de redução da transmissão aérea de aerossóis, foram estudos baseados em modelagem. Os modelos comumente utilizados são classificados em duas linhas principais: A avaliação do risco de infecção e abordagens numéricas. (Rayegan et al., 2022).

2.2.3

Relevância do estudo sobre o vírus SaRS-CoV-2 e suas variantes

Na história do mundo, já foram relatadas outras pandemias, que atingiram milhões de pessoas, levando-as à morte, devido à propagação de vírus. Doenças como a gripe espanhola (1918-1919), levando a morte cerca de 40 e 50 milhões de pessoas, a gripe asiática (1957-1958), aproximadamente 1,1 milhão de pessoas, a gripe suína (2009-2010), com cerca de 200 mil mortos, entre outras. (Alves et al., 2020).

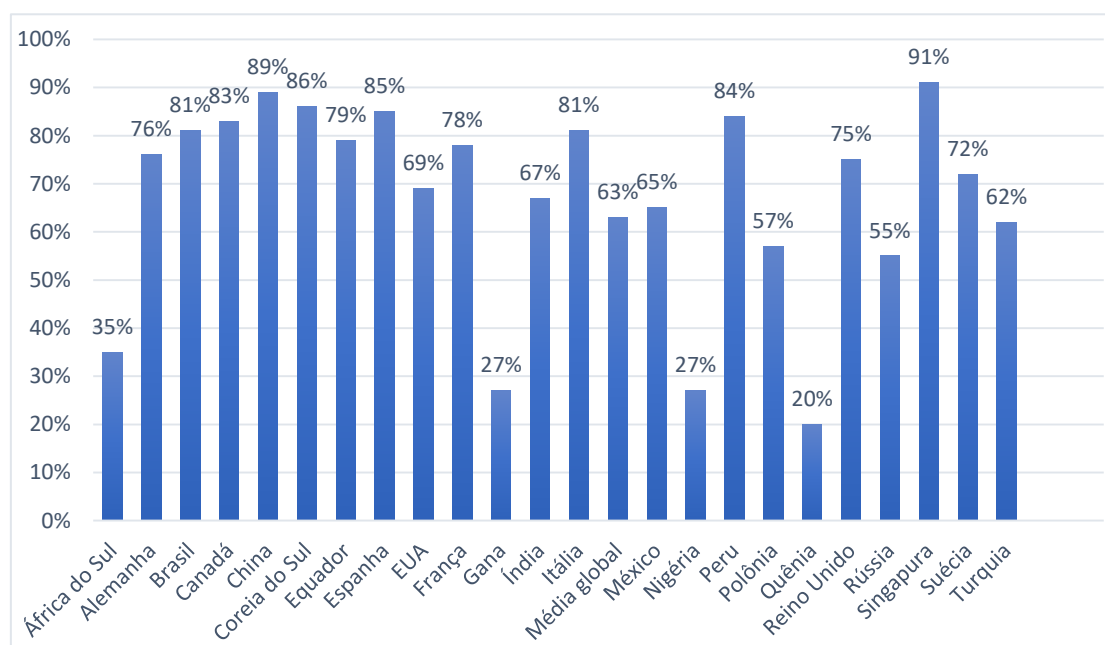
A pandemia do novo coronavírus, que surgiu em 2019, na cidade de Wuhan, na China, tornou-se a maior pandemia dos últimos 100 anos, que atualmente apresenta mais de 650 milhões de casos de infecções confirmadas, incluindo mais de 6 milhões de mortes confirmadas no mundo. (OMS, 2022).

Os países começaram a distribuir vacinas contra a Covid-19 em 2020, sendo distribuídas e espalhadas por todo o mundo, na expectativa de reduzir o número de registros de pessoas infectadas gravemente. No Brasil, a primeira

vacina foi aplicada em janeiro de 2021, sendo iniciada a imunização para os profissionais de saúde que trabalhavam da linha de frente, contra o Covid-19.

Para diminuir o número de contaminados pelo vírus SARS-CoV-2, bem como acabar com a pandemia, a maneira mais segura e eficaz é a imunização de toda a população. Dados do *Our World In Data*, apontam que, aproximadamente 69,5% da população mundial recebeu pelo menos uma dose da vacina contra o coronavírus. (Mathieu; Ritchie; Ortiz-Ospina, 2023). Os dados apontam ainda que, no Brasil 88,3% da população brasileira recebeu pelo menos uma dose da vacina e, cerca de 81% da população, foi totalmente imunizada, conforme aponta o gráfico a seguir.

Gráfico 01: Taxas de cobertura Vacinal contra a Covid-19



*Dados coletados até janeiro de 2023.

A pandemia da Gripe Espanhola no ano de 1918, que matou mais de 50 milhões de pessoas, tem sido usada como parâmetro para tomadas de decisões em relação a todas as outras pandemias. Quase todos os casos de contaminação por influenza A, são causadas por descendentes do vírus de 1918 e, circulam pelo mundo infectando milhões de pessoas todos os anos. De acordo Lawton, (2021), o coronavírus pode ser capaz de se esquivar da imunidade adquirida pela infecção e, possivelmente, superar as vacinas.

Estudos revelam que provavelmente o vírus SARS-CoV-2, agente causador da nova pandemia do covid-19, se torne endêmico. De acordo com

cientistas, o vírus permanecerá entre a humanidade, porém, as pessoas irão desenvolver alguma imunidade a ele (por meio de infecção natural ou vacinação), desta forma, não apresentarão sintomas graves. Tudo isso foi considerado pelo fato de que outros vírus endêmicos circulam entre a humanidade há centenas de anos e são responsáveis por aproximadamente 15% das infecções respiratórias, sendo contraídos muitas vezes ainda na infância. Desta forma, o sistema imunológico desenvolve imunidade a eles. (Lawton, 2021).

A Organização Mundial da Saúde OMS, (2021), destacou que medidas firmes para contenção do avanço da Covid-19 devem ser tomadas, pois com o atual cenário. O número de mortes na Europa poderia ultrapassar o número de 2 milhões até março de 2022. Dados apontam que o afrouxamento da obrigatoriedade do uso de máscaras e o alto número de pessoas não vacinadas contribuem significativamente para o avanço da doença, que hoje conta com aumento no número de casos, principalmente considerando a variante Delta, altamente transmissível, que já é dominante na Europa e vista como um dos principais fatores no aumento de casos. (OMS, 2021).

Especialistas da OMS, apontam que novas variantes da Covid-19 estão sendo encontradas, e que dentre estas foi identificada na África do Sul, em novembro de 2021, uma variante, batizada de Omicron. De acordo com a OMS, esta é uma variante que gera imensa preocupação, pois estudos preliminares mostraram que a Omicron possui muitas mutações quando comparada as outras e ainda são necessários estudos para entender o impacto desta nova variante. Pesquisas serão direcionadas para compreender o potencial de transmissão, tratamentos, e até mesmo se as vacinas oferecem proteção. (OMS, 2021).

Estudos feitos por pesquisadores de diversos locais e publicados no site Our World In Data mostram as sequencias das variantes do vírus SARS-CoV-2, desde o início da pandemia, em que, pode-se observar a quantidade de novas cepas e como foram se espalhando por todo o mundo. O sequenciamento genético do SARS-CoV-2 é a melhor maneira de entender as formas de atuação do vírus, descobrindo de onde ele se originou e como se tornou infeccioso para os hospedeiros, como ele se replica, suas mutações genéticas, para assim, alcançar um possível alvo para criação de vacinas e medicamentos, bem como, identificar os tipos de tratamentos mais eficazes. (Our World in Data, 2022).

De acordo levantamentos feitos no site *Our World In Data* e, ao observar isoladamente a variação do sequenciamento de cepas no Brasil em dados constantes na imagem a seguir, pode-se constatar que, no início da pandemia do

novo coronavírus, a cepa do vírus presente em 85% dos casos, se tratava predominantemente da Sequência Gama. Em junho de 2021, a variante Delta mostrou-se como a cepa mais agressiva do SARS-CoV-2, chegando a 95% dos casos confirmados. Tempos depois, surgiu a variante Ômicron e, hoje, praticamente 100% dos casos, são derivados deste sequenciamento genético do vírus. (Mathieu et al., 2020).

Segundo pesquisadores, a vacina contra COVID-19 se comprova eficaz a cada nova variante que surge, pois mesmo que atuem com menor potencial neutralizante, caso não existissem, novas pandemias surgiriam a cada nova cepa do SARS-CoV-2. Foi estabelecido um sistema, chamado Pangolin, que tem por objetivo padronizar a classificação do SARS-CoV-2, com base em características genéticas. Atualmente já foram descritas mais de 2.500 linhagens do vírus causador da Covid-19, mas nem todas essas linhagens obtiveram sucesso evolutivo, não conseguindo dispersar por diferentes localidades e países e, muitas dessas mutações, já deixaram de circular. (Fiocruz, 2023).

As vacinas contra COVID-19, que foram recomendadas pela OMS, são altamente eficazes, na prevenção de doenças graves, hospitalização e morte, contra todas as cepas do vírus SARS-CoV-2, incluindo as variantes Delta e Ômicron. Embora as vacinas não sejam capazes de prevenir completamente a infecção, reduzem consideravelmente a transmissão do vírus. (OPAS, 2022).

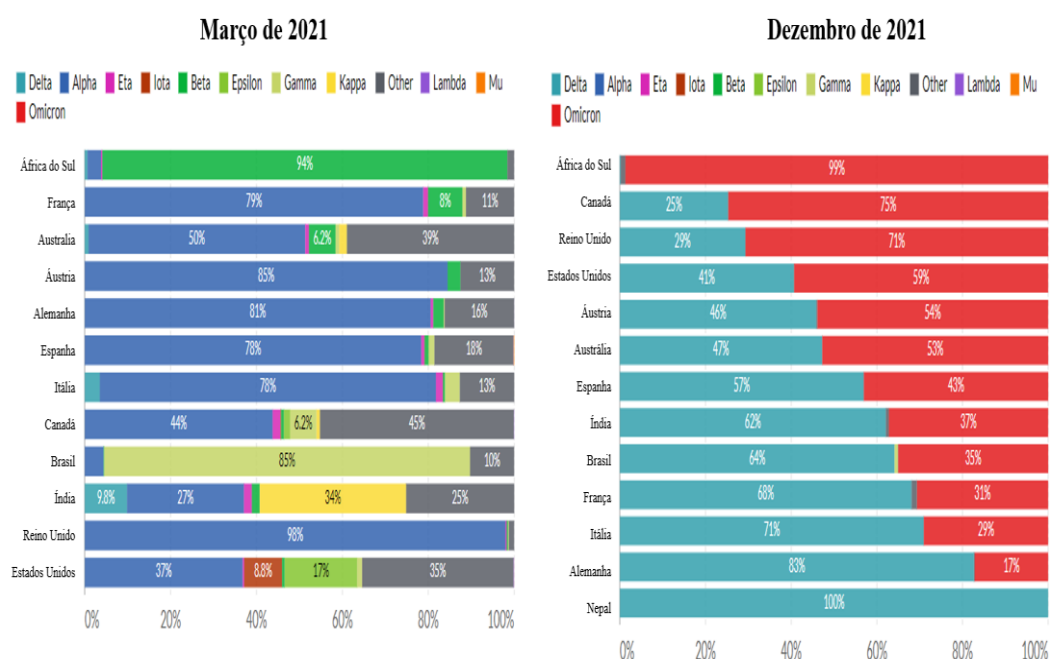


Figura 6: Sequências de SARS-CoV-2 por variante, pelo período de 9 meses

2.2.4

Variantes no Brasil e número de mortes causadas pelo vírus SARS-CoV-2

Desde o surgimento da nova pandemia do Covid-19, frequentemente surgem novas variantes em todo o mundo. Análises genéticas do vírus revelaram que o SARS-CoV-2 sofreu diversas mutações. No Brasil, foram identificadas diversas linhagens, sendo quatro delas consideradas variantes de preocupação e duas delas, variantes de interesse, segundo a OMS. (Michelon, 2021)

De acordo (Michelon, 2021), no período de janeiro de 2020 a maio de 2021, no Brasil, foram registradas mutações nas linhagens dominantes do vírus, responsável pela pandemia do Covid-19, segundo pesquisas da Fiocruz. Dentre as variantes registradas no Brasil, estão destacadas principalmente:

1. Alfa (B.1.1.7, Variante do Reino Unido)

Detectada em setembro de 2020, esta variante tornou-se a linhagem dominante no Reino Unido em dezembro de 2020, mesma época que foi identificada no Brasil.

2. Beta (B.1.351, Variante Sul-Africana)

Surgiu na África do Sul, no início de outubro de 2020, se espalhando rapidamente nas regiões próximas.

3. Gama (B.1.1.28.1 ou P.1, Variante Brasileira – Manaus)

Foi notificada à OMS em janeiro de 2021, pelo Japão, detectado em pessoas provenientes do Brasil.

4. Zeta (B.1.1.28.2 ou P.2, Variante Brasileira – Rio de Janeiro)

Foi identificada em outubro de 2020 no estado do Rio de Janeiro. Esta variante foi encontrada, também, na Argentina, Chile, Estados Unidos, Mexico, Uruguai, Venezuela e na Ilha de São Martinho.

5. Delta/ Kapa (B.1.617, Variante Indiana)

Foi identificada na Índia em dezembro de 2020. No Brasil, a variante indiana foi confirmada em maio de 2021.

6. Lambda (C.37, Variante Andina)

Foi notificada inicialmente no Peru, em dezembro de 2020, sendo encontrada em diversos países das Américas e, em fevereiro de 2021, foi identificada no Brasil.

7. Variantes da linhagem B.1.1.33

Foi uma das mais difundidas no Brasil em 2020, entretanto suas mutações não foram consideradas preocupantes.

8. Variantes da linhagem B.1.1.28

Esta variante foi identificada pela primeira vez em janeiro de 2021, sendo uma das linhagens predominantes no país.

A tabela 2 apresenta um demonstrativo das principais variantes do vírus SARS-CoV-2, sua linhagem, país de origem e período em que foi detectada pela primeira vez.

Tabela 2: Demonstrativo de Variantes de interesse e de preocupação registradas no Brasil

Nome	Linhagem	País Primeira Detecção	Data Primeira amostra	Mutações registradas	Tipo de Variante
Alfa	B.1.1.7	Reino Unido	Setembro 2020	H69/V70del, Y144del, N501Y, A570D, P681H, S106/G107/F108del	Variante de Preocupação (VOC)
Beta	B.1.351	África do Sul	Agosto 2020	L242/A243/L244del, K417N, E484K, N501Y, S106/G107/F108del	Variante de Preocupação (VOC)
Gama	B.1.1.2 8.1 ou P.1	Brasil e Japão	Dezembro 2020	K417T, E484K, N501Y, S106/G107/F108del	Variante de Preocupação (VOC)

Delta	B.1.617 .2	Índia	Outubro 2020	T19R, (G142D), 156del, 157del, R158G, L452R, T478K, D614G, P681R, D950N	Variante de Preocupaç ão (VOC)
Épsilon	B.1.427 / B.1.429	Estados Unidos	Junho 2020	L452R, W152C, S13I, D614G	Variante de Interesse (VOI)
Zeta	B.1.1.2 8.2 ou P.2	Brasil	Abril 2020	L18F, T20N, P.26S, F157L, E484K, D614G, S929I, V1176F	Variante de Interesse (VOI)
Eta	B.1.525	Diversos países	Dezembro 2020	H69-V70del, Y144del, Q52R, E484K, Q677H, D616G, S929I, V1176F	Variante de Interesse (VOI)
Teta	B.1.1.2 8.3 ou P.3	Filipinas e Japão	Fevereiro 2021	141-143del, E484K, N501Y, P681H	Variante de Interesse (VOI)
Iota	B.1.526	Estados Unidos	Novembro 2020	LSF, T95I, D253G, D614G, V483A, H655Y, G669S, Q949R, N1187D	Variante de Interesse (VOI)
Kapa	B.1.617 .1	Índia	Outubro 2020	(T95I), G142D, E154K, L452R, E484Q, D614G, P681R, Q1071H	Variante de Interesse (VOI)
Lambda	C.37	Perú	Dezembro 2020	L452Q, F490S, D614G e T859N	Variante de Interesse (VOI)

2.2.5

A ventilação no ambiente, como estratégia para reduzir os índices e transmissão aérea

A ventilação é o meio de troca do ar interno, em um espaço, por mecanismos naturais ou mecânicos. Através da ventilação, controla-se a velocidade com que o ar da sala é substituído durante um período de tempo. A distribuição adequada da ventilação, garante que a carga viral seja diluída, evitando, assim, seu acúmulo dentro do ambiente. (Morawaska et al., 2020).

Segundo Vilain, (2016), a eficiência dos sistemas de ventilação desempenha um papel importante para minimizar a contaminação cruzada. Assim, pode-se dizer que, a ventilação é, possivelmente, a ferramenta mais eficiente que se tem disponível no controle da qualidade do ambiente interno.

A transmissão aérea é definida como sendo a disseminação de um agente infeccioso através de núcleos de gotículas, conhecidas como aerossóis, que ainda permanecem com potencial infeccioso, mesmo quando suspensos no ar por longas distâncias. Estudos têm sido realizados, discutidos e avaliados, no intuito de entender se o SARS-CoV-2, também pode se espalhar por aerossóis na ausência de procedimentos geradores de aerossóis, principalmente em ambientes internos com pouca ventilação. (Health et al., 2020).

De acordo Benetti et al., (2021), a equipe de saúde, de sistemas prisionais, estabeleceu medidas de prevenção, como ventilação dos ambientes; limpeza e desinfecção de todas as superfícies internas com álcool 70% e hipoclorito de sódio, bem como criação de rotinas de higienização nos locais de circulação externa, galerias, pátios e áreas de vivência.

Em sua publicação, Morawaska e Milton, (2020) destaca que, em velocidades de ar internas típicas, uma partícula de 5 μm , viajará dezenas de metros, muito maior do que a escala de uma sala típica, enquanto se acomoda de uma altura de 1,5 m até o chão. Vários estudos retrospectivos conduzidos após a epidemia de coronavírus-1, da síndrome respiratória aguda grave (SARS-CoV-1), demonstraram que, a transmissão aérea era o mecanismo mais provável para explicar o padrão espacial das infecções.

De acordo com Vita et al., (2023), acredita-se que, grandes gotículas contenham muito menos material viral do que partículas transportadas pelo ar, além disso, ressalta que, terceira rota de transmissão, envolvendo partículas que

viajam pelo ar dominado por advecção sobre efeitos gravitacionais, é o principal vetor para o transporte e transmissão de vírus no campo próximo e distante, que geralmente é chamado de rota de infecção transmitida pelo ar.

Pessoas infectadas com SARS-CoV-2 produzem pequenas partículas respiratórias carregadas de vírus e, ao expirá-las, alguns deles serão inalados quase imediatamente, por aqueles dentro de uma distância típica de “curto alcance” (distancias menores que 1 metro), enquanto o restante se dispersa por distâncias maiores, para serem inalados por outros mais distantes. Existem partículas maiores (de curto alcance), que são consideradas gotículas e, partículas menores, de longo alcance, porém todas são aerossóis, pois podem ser inaladas diretamente do ar. (Tang et al., 2021).

Aerossóis e gotículas podem promover infecção por meio de deposição em superfícies e posterior transferência, através da mão, que leva a partícula até os olhos, nariz ou boca e, por inalação. Enquanto as gotículas suspensas no ar podem persistir no ar por vários minutos, os aerossóis não se estabelecem rapidamente e podem persistir por períodos mais longos. À medida que o tamanho dos aerossóis diminui, sua capacidade de se dispersar no ar aumenta. (Godri Pollitt et al., 2020).

Considerando que, uma pessoa em um ambiente interno pode inalar vírus suficiente para causar uma infecção, mesmo que esta, esteja a mais de 2 m de distância da fonte original, os mecanismos de substituição ou limpeza do ar, se tornam muito mais importantes. Isso significa que, abrir janelas, instalar ou atualizar sistemas de ventilação e ar-condicionado, deve ser uma medida amplamente vista, especialmente em conformidade com as descrições publicadas em um documento recente da OMS. (Tang et al., 2021).

Os sistemas de ventilação comumente utilizados, alteram a concentração das gotículas, bem como a temperatura e a umidade do ambiente interno. Muitos estudos sugerem que, uma ventilação insuficiente, aumenta o risco de transmissão de doenças no ambiente interno. Muitas gotículas são removidas do ambiente, por ventilação através das saídas de ar, porém, partículas maiores, se depositam em superfícies sólidas, por sedimentação gravitacional. (Mirzaie et al., 2021).

3

Metodologia

Um modelo de sala de aula foi projetado no software AutoCAD, que através da tecnologia tridimensional reproduz com máxima fidelidade as especificações técnicas de projetos residenciais, a partir de elementos gráficos vetoriais. O ambiente é construído e tomado para a análise. (AUTOCAD, 2023)

Posteriormente, esta geometria foi importada no COMSOL, software que possui ferramentas para simular o comportamento dos aerossóis e partículas, através da fluidodinâmica computacional. As dimensões e especificações do modelo da sala de aula, são demonstradas adiante. (COMSOL, 2023).

3.1

Softwares Utilizados

Os softwares AutoCAD, SketchUp e COMSOL Multiphysics, que foram utilizados para o desenvolvimento do modelo de elementos finitos para avaliação da movimentação das partículas e aerossóis, em ambientes fechados são apresentados nesta seção.

3.2

Dimensões e especificações da sala de aula no AutoCAD

Segundo Rojas, o AutoCAD é um software do tipo CAD, “*Computer Aided Design*”, criado e comercializado pela Autodesk. É utilizado, principalmente, para a elaboração de peças de desenho técnico em duas dimensões (2D) e para criação de modelos tridimensionais (3D). O software disponibiliza, em suas versões mais recentes, vários recursos para visualização em diversos formatos. É amplamente utilizado em arquitetura, design de interiores e nas engenharias civil, mecânica, geográfica, elétrica e em vários outros ramos da indústria (Rojas, 2014).

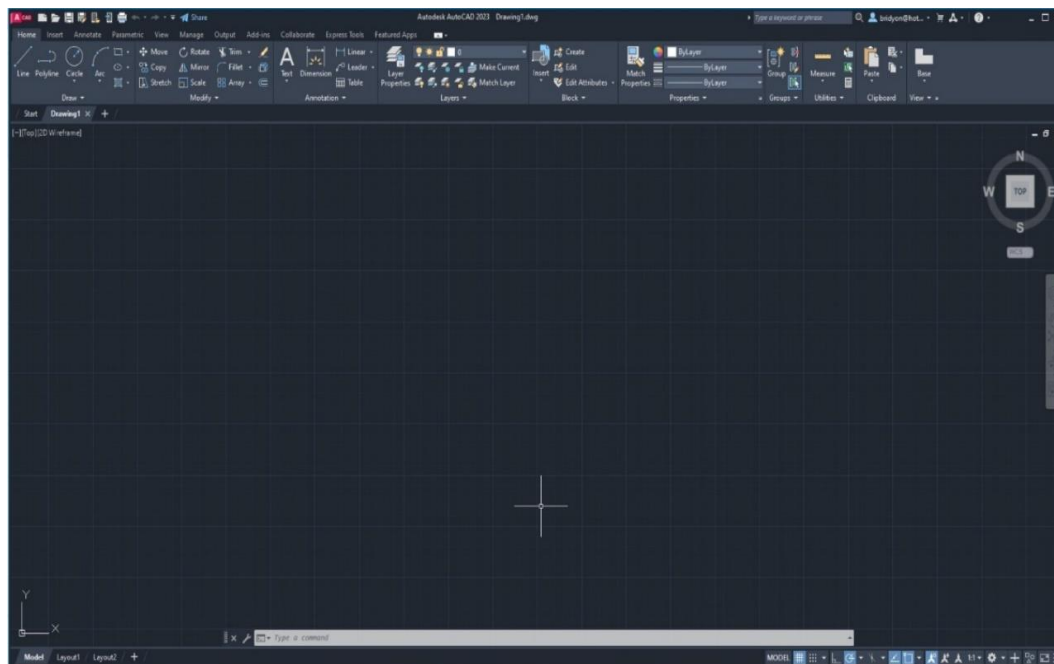


Figura 7: Interface do AutoCAD

O modelo de sala de aula projetada, apresentado na Figura 08, apresenta dimensões de L x P x A (9,69 m x 7,27 m x 3,41 m) e, consiste em seis janelas de dimensões distintas, distribuídas em três paredes da sala.

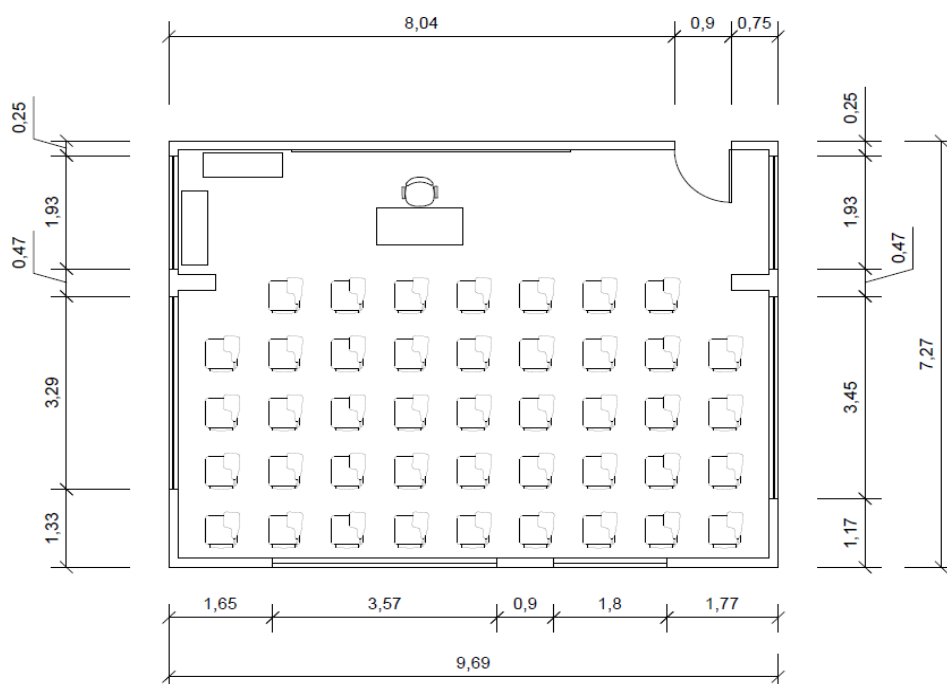


Figura 8: Planta baixa da sala de aula modelo

A sala de aula modelo possui janelas separadas por pilares de sustentação, a uma distância de 0,47 m, cada. Além disso, as janelas estão localizadas a uma altura de 0,85 m, da base da sala. A sala de aula é modelada, desenvolvendo cenários distintos, onde serão consideradas simulações com as janelas abertas e fechadas.

3.3

Projeto Tridimensional no SketchUp

O SketchUp é um software de desenho, assistido por computador (CAD), que possibilita a criação de ambientes e objetos em 3D. É uma ferramenta bastante utilizada nas esferas da arquitetura e engenharia. O software foi lançado ao mercado em 2000. (SKETCHUP, 2023).

Com o auxílio deste software, desenvolveu-se um ambiente fidedigno às dimensões de uma das salas de aula da PUC-Rio, conhecida como “DEQM 01”, onde, utilizou-se como protótipo para realização de análises, sendo considerados diferentes cenários.

O trabalho foi conduzido para um ambiente tridimensional e, a resolução numérica se deu pelo método de elementos finitos.

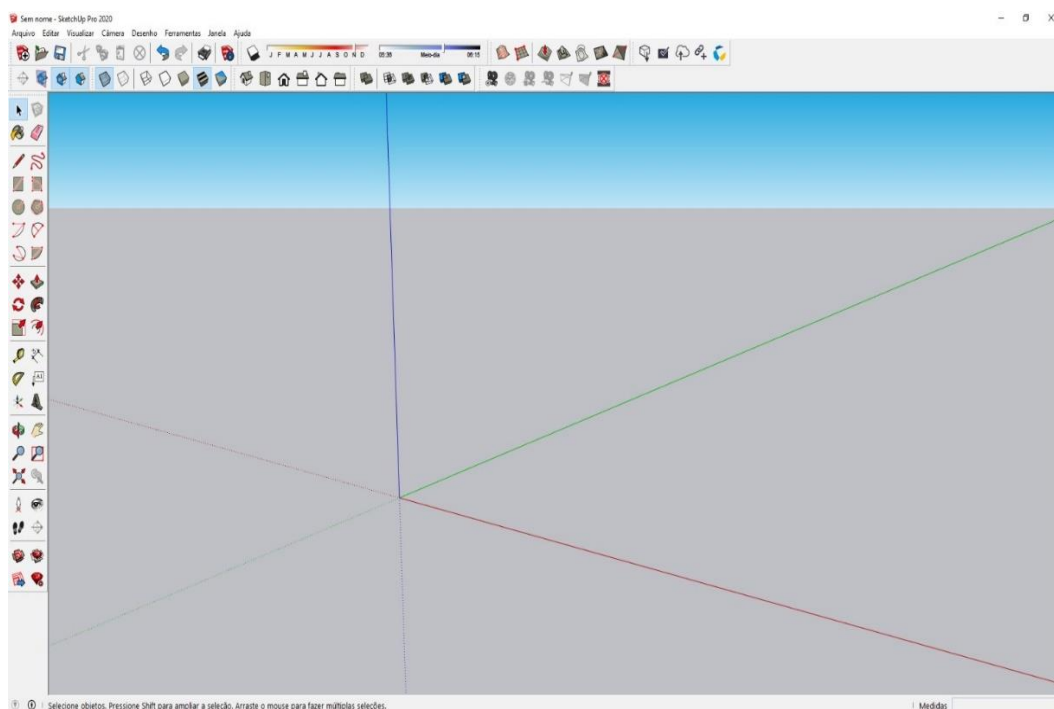


Figura 9: Interface do SketchUp

A seguir, é exibido o projeto da sala de aula, criado com o auxílio do SketchUp, software apropriado para criação de modelos tridimensionais.



Figura 10: Sala de aula modelo, com dimensões reais, em ambiente tridimensional

3.4

Trabalhando com o Software COMSOL

Para desenvolver os dados, foi utilizado o software COMSOL MULTTHIPHYSICS, na versão 5.6.0.401, disponível no laboratório da PUC-Rio, cuja interface é apresentada na Figura 11. O software auxiliou na elaboração da geometria, implementação das variáveis e condições físicas, impostas em cada um dos cenários, geração da malha e resolução das equações, geradas pela simulação.

O software e seus módulos complementares, de fluidodinâmica computacional (CFD) e de definição de trajetórias de partículas (Particle Tracing), foram utilizados como ferramentas para apreciação do comportamento dos vetores mecânicos de transporte de vírus respiratórios.

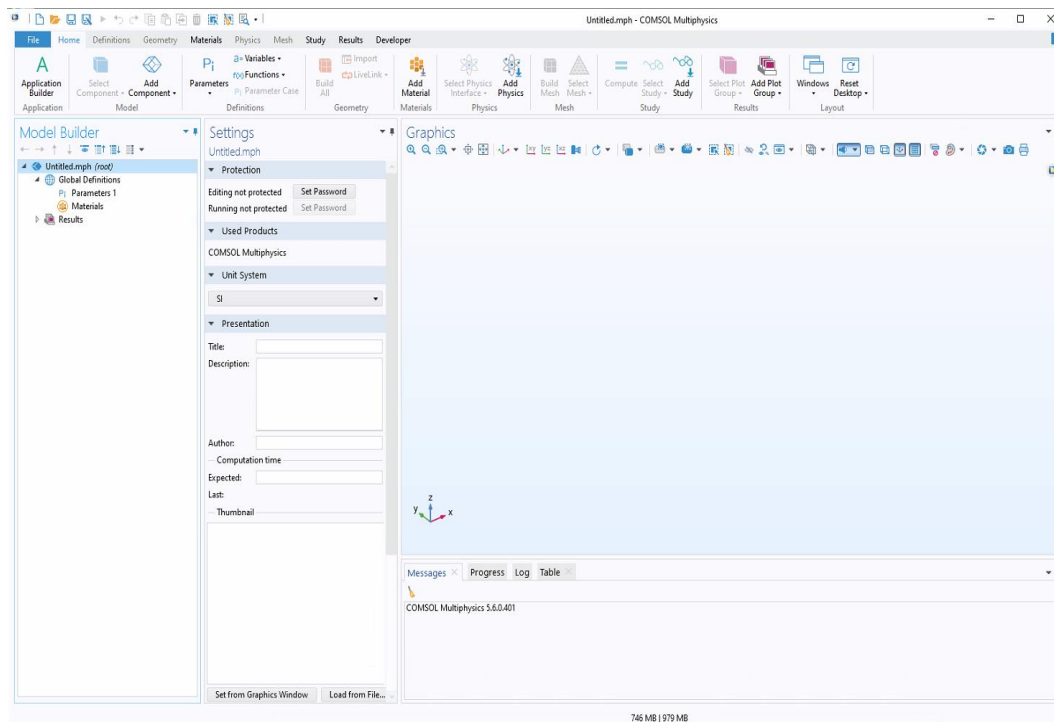


Figura 11: Interface do COMSOL

3.5

Importando o arquivo para o software COMSOL

Inicialmente, foi importado para o software, o projeto no formato CAD, de cada um dos cenários que estão sendo considerados. Após importar a geometria base, iniciou-se a definição de todas as dimensões e propriedades do sistema.

As definições incluíram informações como: temperatura, velocidade, pressão, e demais constantes arbitrárias. Os parâmetros adotados foram definidos através de literatura utilizada, com exceção dos dados utilizados na parte computacional, já contidos na base do software.

Na etapa de seleção do componente, definiu-se um arquivo tridimensional, para elaboração do estudo. Além deste, foram adotados módulos do mesmo cenário, no formato 2D, pelo fato de que este apresenta os mesmos resultados da modelagem em 3D, com menor exigência para o computador. A Figura 12 mostra como a importação do arquivo foi realizada.

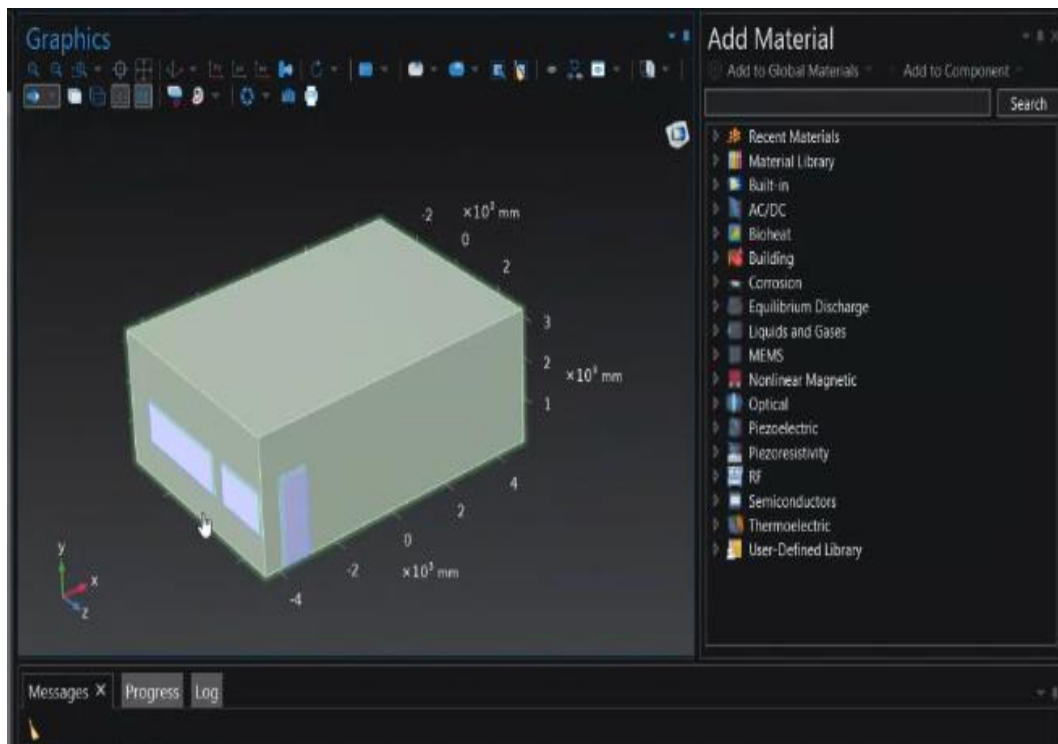


Figura 12: Interface do software COMSOL, com o projeto da sala de aula

3.6

Geração da malha

Depois de definir a geometria base e as condições físicas do cenário, a próxima etapa é a criação da malha, no qual, o software COMSOL irá desenvolver os cálculos de campo. Neste ponto, pode-se definir qual tipo de malha desejada, assim como, todas as suas propriedades, tamanho dos elementos, número de elementos e taxa de crescimento.

A etapa de criação da malha, trata-se de uma parte crucial para se obter resultados satisfatórios, pois, caso esta fase seja comprometida, pode acarretar diversos erros ao fim da simulação, apontando considerações incorretas.

Utilizando como base a biblioteca do software COMSOL, que, possui diversas propriedades físicas de elementos utilizados nos experimentos, salvos em sua base, a malha foi criada e, posteriormente adicionada, uma configuração dentro dela, onde, pode-se alterar os tamanhos dos elementos nesta região, influenciando nos demais fatores interligados.

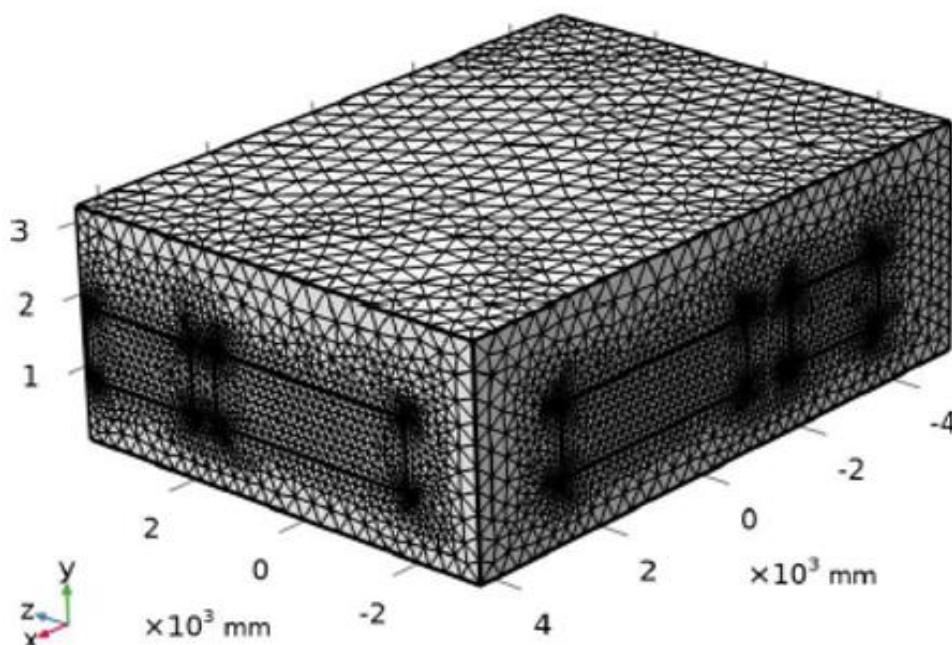


Figura 13: Malha gerada no software COMSOL

Na etapa de construção da malha, o domínio foi dividido em células, onde as equações para determinação da dispersão dos aerossóis são aplicadas. O tamanho da malha varia de extremamente fina, até extremamente grossa. Quanto mais refinadas forem as células, melhores os resultados, pois, se aproximam mais do modelo real, porém, quanto maior o número de células, maior a exigência computacional.

3.7

Condição de contorno

Segundo buscas na literatura, pode-se afirmar que, para solução das equações de Navier-Stokes, requerem que se estabeleça condições de contorno sobre a malha. Isso inclui, por exemplo, definir as condições de entrada e saída de ar, dentro do ambiente.

Tendo como base, o site do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), constatou-se que, o bairro da Gávea (localidade onde funciona a PUC-Rio,

universidade que integra a sala de aula, adotada como modelo), apresenta condições climáticas estáveis, durante todo o ano.

Foi feita, então, uma média entre o fluxo máximo e mínimo anual e, definiu-se que, o fluxo de ar na sala de aula, seria de aproximadamente $1,80 \text{ ms}^{-1}$. Considerando como entradas e saídas de ar, a porta da sala e as seis janelas, foram realizadas três simulações distintas, sendo estas:

- Primeiro cenário- Portas e janelas abertas, considerando um aluno espirrando a uma distância média de 2m do professor, considerando a velocidade da ventilação natural do ambiente;
- Segundo cenário- Portas e janelas abertas, considerando um aluno espirrando a uma distância média de 2m do professor, considerando a velocidade da ventilação natural do ambiente, porém, nesse cenário foi acrescentado uma barreira de proteção entre o professor e o aluno.
- Terceiro cenário- Porta e janelas fechadas, considerando a velocidade da ventilação natural do ambiente.

Após a determinação das fontes de entrada e saída do ar dentro do ambiente, o software entende que as demais formas geométricas inseridas no cenário, tratam-se de paredes, impedindo assim, que o ar entre ou saia por essas extremidades não selecionadas. Todas as paredes, piso e teto foram considerados adiabáticas.

A simulação da dinâmica do fluxo de transmissão do vírus Sars-CoV-2, foi realizada em duas etapas. Inicialmente, a condição de fluxo de ar dentro da sala de aula, em estado estacionário, foi simulada, observando-se, como o fluxo ventilação natural do ambiente se comportava. Na segunda etapa, gotículas e aerossóis de vários tamanhos (simulando partículas contaminadas pelo vírus da COVID-19) foram expelidas pelo espirro único da pessoa infectada (no caso, o aluno) em frente ao professor, dentro da sala de aula.

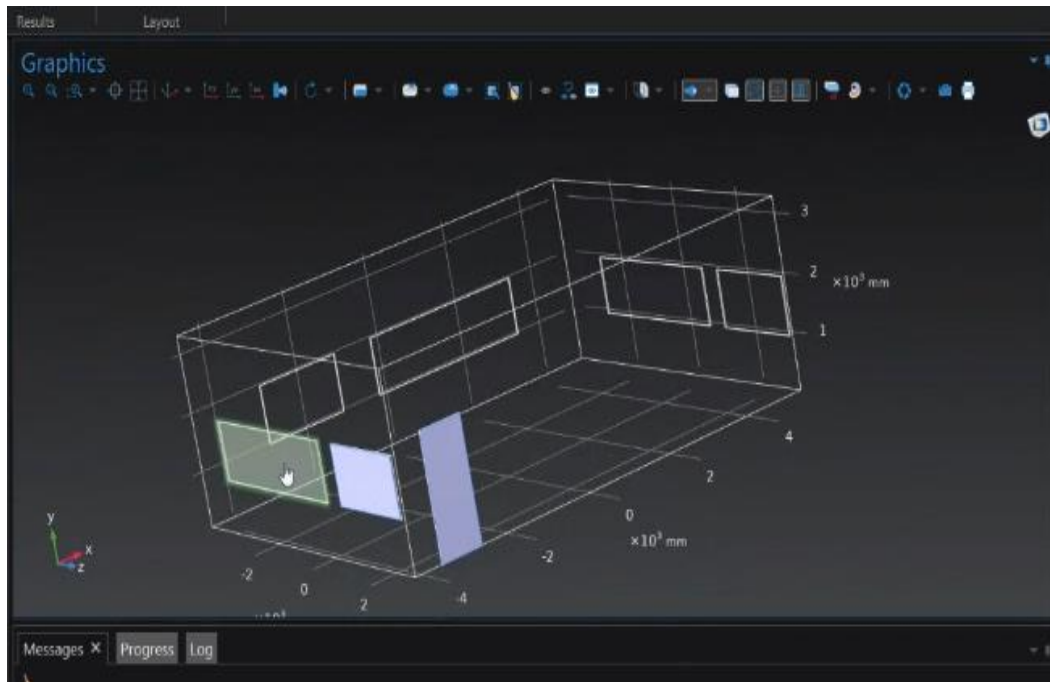


Figura 14: Seleção de entrada e saída de ar (Inlet e Outlet) no ambiente.

3.8

Discretização pelo método dos Elementos Finitos

Segundo Ayuba, (2019), a discretização envolve a transformação de equações diferenciais, que são resolvidas computacionalmente. O software COMSOL Multiphysics é um solver que realiza a discretização dessas equações, adotando o método dos elementos finitos.

O Método dos Elementos Finitos (MEF) é um método de discretização que mais aproximam as equações diferenciais originais de um problema resolvido, permitindo a criação de um modelo contendo os seus fenômenos multifásicos. (Basarová et al., 2021).

3.9

Equações governamentais

Para calcular os fluidos incompressíveis que são os fluidos cuja densidade é constante, utilizou-se a Equação 1, de Navier-Stokes, que é um método CFD

bem estabelecido, aplicado para modelar a ventilação em ambientes fechados. De forma geral, pode ser representada por:

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{F}. \quad (1)$$

Onde:

$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t}$ = conservação de massa

ρ = densidade média do fluido

$\nabla \mathbf{u}$ = vetor gradiente

$-\nabla p$ = pressão dinâmica

$\mu \nabla^2 \mathbf{u}$ = viscosidade de um ponto do fluido

$\mathbf{F}$ = força externa por unidade de massa

O software COMSOL, possui em seu sistema, físicas e configurações pré-estabelecidas, que são usadas para receber as informações e formular as equações, resolvendo-as, de acordo com os dados inseridos na concepção do projeto. (COMSOL, 2023).

Todos os cálculos de CFD foram executados pelo COMSOL. Desta forma, o solver solucionou as equações abaixo, segundo cada uma das variáveis da simulação.

Para calcular o fluxo laminar, considera-se a equação 2:

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} &= \nabla \cdot [-p \mathbf{I} + \mathbf{K}] + \mathbf{F} \\ \rho \nabla \cdot \mathbf{u} &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

A equação 3, representa a propriedade dos fluidos é resolvida da seguinte forma:

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} &= \nabla \cdot [-p \mathbf{I} + \mathbf{K}] + \mathbf{F} \\ \rho \nabla \cdot \mathbf{u} &= 0 \\ \mathbf{K} &= \mu (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) \end{aligned} \quad (3)$$

Para cálculo de parede, temos as equações 4 e 5:

$$\underline{\underline{\mathbf{u} = \mathbf{0}}} \quad (4)$$

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}_c \quad (5)$$

Onde, $\mathbf{v}_c$ é a velocidade da partícula ao atingir a parede.

Para o interior da parede, considerou-se igual a zero, conforme apresentado na equação 6:

$$\begin{aligned} \underline{\underline{\mathbf{u}_u = \mathbf{0}}} \\ \underline{\underline{\mathbf{u}_d = \mathbf{0}}} \end{aligned} \quad (6)$$

Para prever a concentração de aerossóis dentro da sala de aula, foi utilizado o modelo de transporte de espécies. Nesse caso, foram definidas através das entradas de ar (janelas, porta, nariz e boca do aluno), através das equações 7 e 8, abaixo apresentadas. Para janelas e portas, tem-se que:

$$[-p\mathbf{I} + \mathbf{K}]\mathbf{n} = -\underline{\underline{f_0\mathbf{n}}} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{u} \cdot \mathbf{t} &= 0 \\ [-p\mathbf{I} + \mathbf{K}]\mathbf{n} &= -p_{\text{grad}}\mathbf{n} \end{aligned} \quad (8)$$

Para o espirro e boca do emissor, considerou-se as equações 9 e 10:

$$\underline{\underline{\mathbf{u} = -U_0\mathbf{n}}} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} [-p\mathbf{I} + \mathbf{K}]\mathbf{n} &= -\underline{\underline{\hat{p}_0\mathbf{n}}} \\ \hat{p}_0 &\leq p_0, \end{aligned} \quad (10)$$

Já para o rastreamento das partículas para escoamento dos fluidos, temos a equação 11:

$$\frac{d(m_p\mathbf{v})}{dt} = \mathbf{F}_t \quad (11)$$

O solucionador resolve a equação 12, que calcula a força de arrasto, na forma abaixo:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{F}_D &= \frac{1}{\tau_p} m_p M(\mathbf{u} - \mathbf{v}) \\
 \tau_p &= \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu} \\
 M &= \frac{1}{1 - \frac{9}{16}\alpha + \frac{1}{8}\alpha^3 - \frac{45}{256}\alpha^4 - \frac{1}{16}\alpha^5} (I - P(\mathbf{n})) + \frac{1}{1 - \frac{9}{8}\alpha + \frac{1}{2}\alpha^3} P(\mathbf{n}) \\
 \alpha &= \frac{r_p}{L}
 \end{aligned} \tag{12}$$

Onde L, é a distância até a parede mais próxima e, P(n) é a projeção sobre o vetor normal até a parede.

Para o cálculo de partículas, considera-se a equação 13:

$$\begin{aligned}
 f(t_r) &= \frac{1}{\sigma t_r \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\log t_r - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \\
 \mathbf{q} &= \mathbf{q}_0 \\
 \mathbf{v} &= \mathbf{v}_0
 \end{aligned} \tag{13}$$

Considerando a barreira de proteção, utilizou-se a equação 14:

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}_c - 2(\mathbf{n} \cdot \mathbf{v}_c)\mathbf{n} \tag{14}$$

Onde $\mathbf{v}_c$ é a velocidade da partícula quando atinge a barreira de proteção.

Para as saídas do ambiente, foi considera-se a equação 15, abaixo apresentada:

$$\mathbf{q} = \text{NaN} \tag{15}$$

Para o COMSOL, NaN está ligado a um fator de perda, nesse caso, as partículas que saem do ambiente.

E, finalmente para interação fluido-partícula, temos a equação 16:

$$\mathbf{F}_{V,new} = \mathbf{F}_V - \frac{\mathbf{F}_D}{\text{meshvol}} \quad (16)$$

Que é utilizada quando uma partícula entra num elemento da malha de domínio e a equação 17:

$$\mathbf{F}_{V,new} = \mathbf{F}_V + \frac{\mathbf{F}_D}{\text{meshvol}} \quad (17)$$

Que é utilizada quando uma partícula sai de um elemento da malha de domínio.

4 Resultados e discussão

Ao considerar a propagação de aerossóis em um ambiente interno e, como as condições de ventilação determinadas previamente, influenciaram na disseminação das partículas em uma sala de aula, utilizamos, com dados reais, encontrados nas bibliografias utilizadas, referências de temperatura, velocidade do ar, viscosidade, entre outros.

A expiração humana tem em média, a velocidade inicial de 1 ms^{-1} , no entanto, segundo o médico Dráuzio Varella, ao espirrar as partículas expelidas podem atingir até 160 kmh^{-1} (o que aponta cerca de $44,4 \text{ ms}^{-1}$). (Varella, 2013). Com base nesses dados obtidos através de busca na literatura, para as simulações desenvolvidas neste estudo, adotou-se que, a velocidade do espirro, é de 45 ms^{-1} .

Para comprovar que a simulação e as condições de contorno impostas nela, representam o mundo real, foram considerados três cenários distintos, modelados com um único aluno e um professor dentro da sala de aula.

As características humanas, foram desconsideradas, em favor de um corpo com geometria simplificada, com aproximadamente a mesma área de superfície de uma pessoa de estatura média, para imitar um professor e um aluno, em pé. Os manequins foram detalhados, dividindo as superfícies do corpo, nariz e da boca. O objetivo da simulação foi a dispersão das partículas, expelidas através do espirro e tosse humana e disseminadas no ambiente, através do transporte aéreo das partículas.

Assim, foram realizados estudos, onde o objetivo foi verificar as plumas criadas pela movimentação das partículas e aerossóis, ao se dissiparem por todo ambiente, por um período de 2 minutos.

A seguir são apresentados cada um dos cenários e os resultados obtidos através da simulação destes.

4.1

Simulação do Cenário 01

Este cenário considera a ventilação natural no ambiente e, fluxo constante de entrada e saída de ar, através da porta e das janelas, onde, é possível observar

através da Figura 15, que o ar percorreu toda a sala de aula, transportando as partículas.

É possível identificar que, neste caso, a maior concentração dos aerossóis fica na área, onde se encontra o professor e, nesse sentido, os riscos de contaminação seriam altíssimos, pois não há nenhuma proteção, impedindo que essas partículas circulem livremente por todo o ambiente. A velocidade da ventilação identificada na parte esquerda da sala de aula, considerando a vista superior, apresenta mais de 4 ms^{-1} , provavelmente pelo fato de que, nessa parede existem grandes janelas, facilitando o fluxo de saída do ar. A seguir é disponibilizado um link, possibilitando acesso ao arquivo que exibe em animação, a trajetória das partículas nesta simulação para o Cenário 01.

https://drive.google.com/file/d/15R6pbZ5XqUliiz4E0pjSmcc6k37XT4fC/view?usp=drive_link

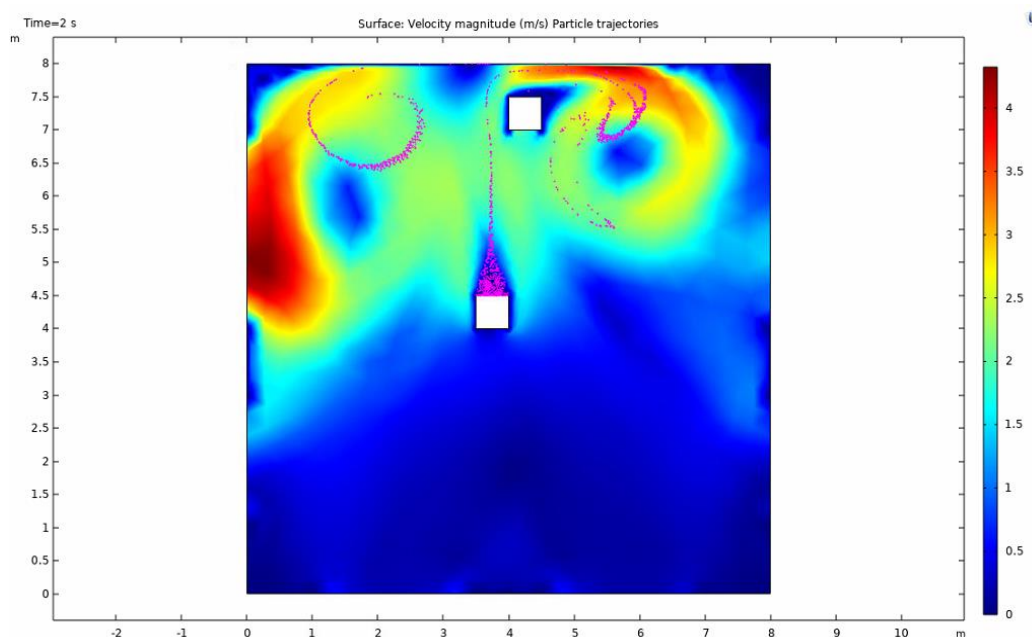


Figura 15: Distribuição de velocidade dos aerossóis exaladas (m/s), Cenário 01.

A Figura 16, apresenta a trajetória das gotículas e aerossóis, ao serem expelidas pela boca e nariz. As partículas foram coloridas de acordo com a velocidade apresentada, no momento em que são expulsas através do espirro. É possível, também, observar a trajetória.

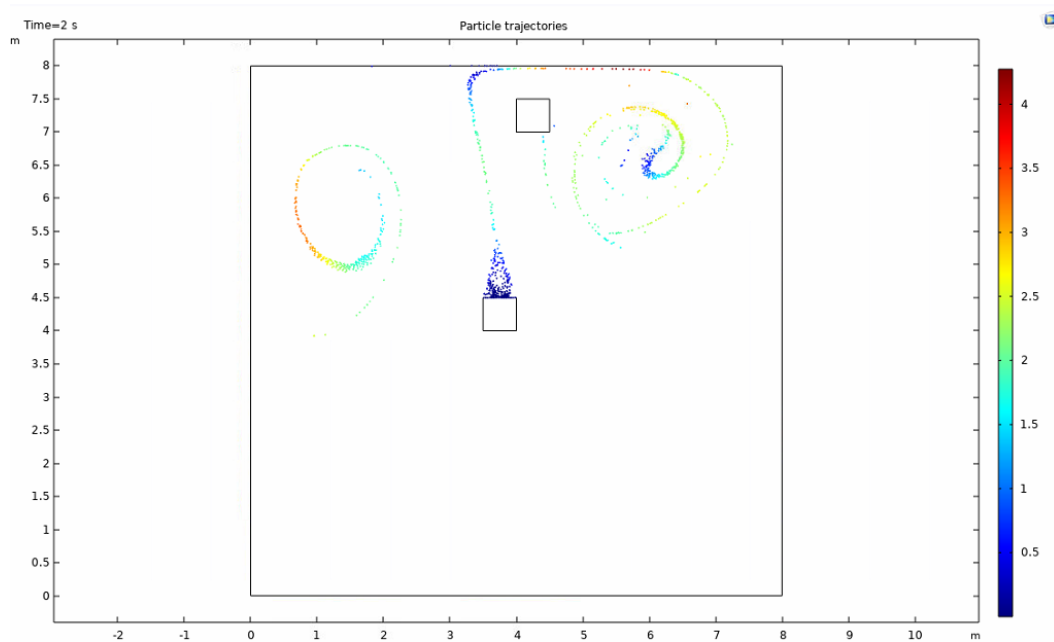


Figura 16: Trajetória das partículas e aerossóis dentro do ambiente, Cenário 01.

A Figura 17, abaixo apresentada, traz resultados da variação da pressão, através da vazão de ar, dentro da sala de aula.

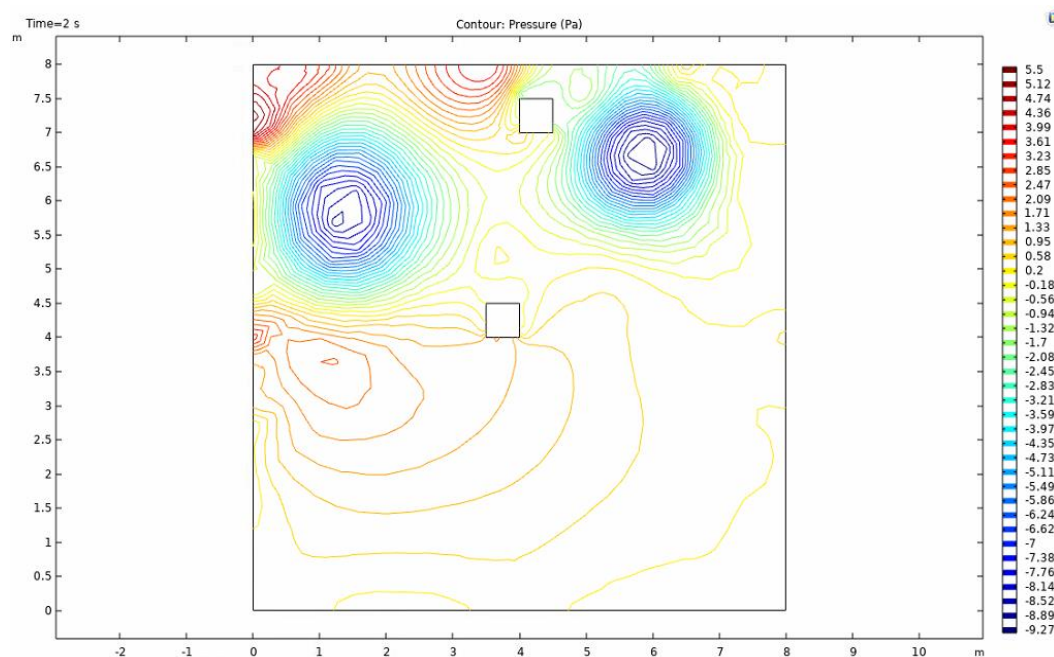


Figura 17: Pressão dentro do ambiente, Cenário 01.

4.2 Simulação do Cenário 02

Neste cenário, foi realizada uma simulação considerando os mesmos dados do cenário 01, (as janelas e porta, abertas), porém, nessa simulação, foi inserida uma barreira de proteção, entre o professor e o aluno, com altura de 2,5 m. Considerando a ventilação natural no ambiente e, fluxo constante de entrada e saída de ar, os resultados obtidos nesse cenário, indicam que, com a barreira de proteção, as partículas não se espalharam por todo o ambiente, como no estudo anterior, apresentando uma trajetória de diferente, com menos dispersão das partículas no ambiente.

A velocidade da ventilação identificada na parte esquerda da sala de aula, destaca-se, pois, apresenta mais de 6 ms^{-1} , facilitando o fluxo de saída do ar. É possível observar, inclusive, que as partículas não chegam até o lado direito da sala de aula. Nesse sentido, pode-se inferir que, a simulação do cenário 02, está mais adequada, no sentido de controlar as taxas de contaminação por vírus, transmitidos pelo ar. Abaixo é disponibilizado um link, que permite acesso ao arquivo .GIF, que possibilita a visualização da trajetória das partículas nesta simulação para o Cenário 02.

https://drive.google.com/file/d/1Q_TNyrGuVgg0G5vekRBokxLdNubn449N/view?usp=drive_link

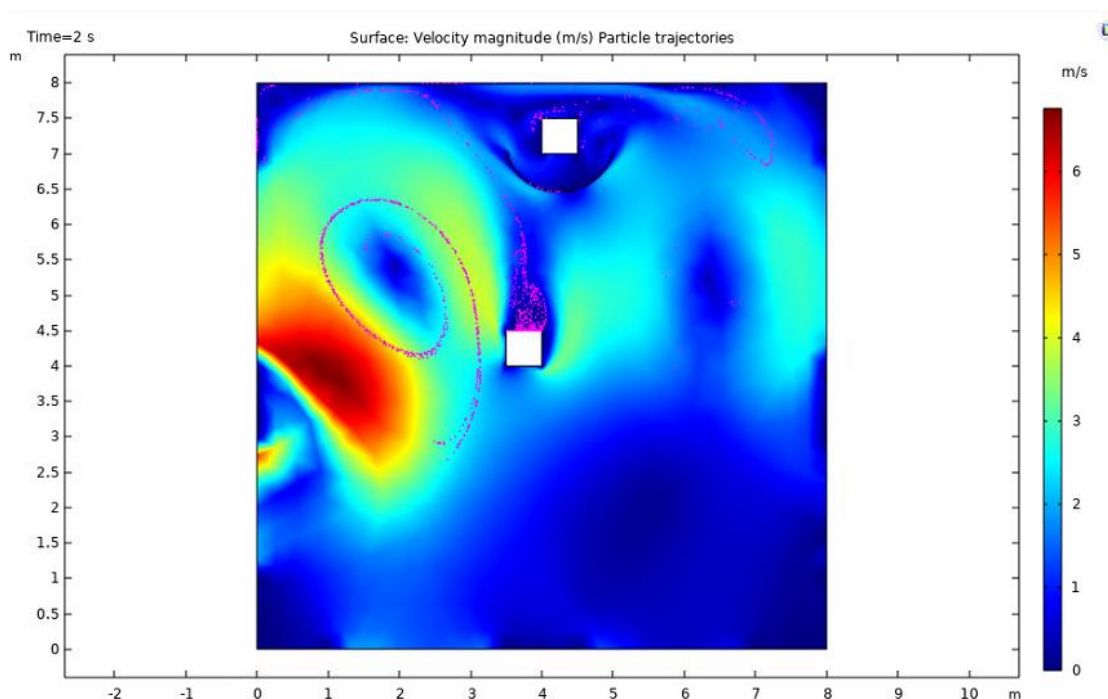


Figura 18: Distribuição de velocidade dos aerossóis exaladas (m/s), Cenário 02.

Portanto, a simulação em que os aerossóis exalados em torno de uma barreira de proteção, apresentaram como resultados, uma trajetória de pluma flutuante, diferente do cenário 01.

Nesta simulação (Cenário 02), os aerossóis expelidos, apresentam uma velocidade de circulação menor, resultando em uma concentração e trajetória de partículas muito inferior que na simulação do cenário anterior, levando os aerossóis para fora da pluma humana, seja através de dispersão ou deposição das gotículas.

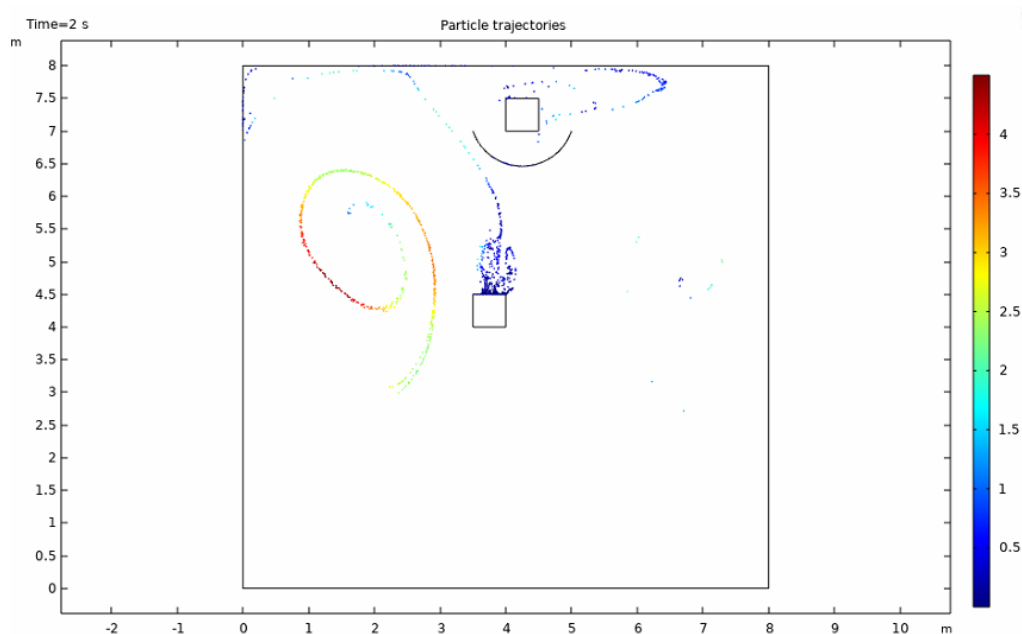


Figura 19: Trajetória das partículas e aerossóis dentro do ambiente, Cenário 02.

Na figura 19, assim como no cenário anterior, apresenta a trajetória das gotículas e aerossóis, ao serem expelidas pela boca e nariz. As partículas foram coloridas de acordo com a velocidade apresentada, no momento em que, são expulsas através do espirro. É possível, também, observar a trajetória.

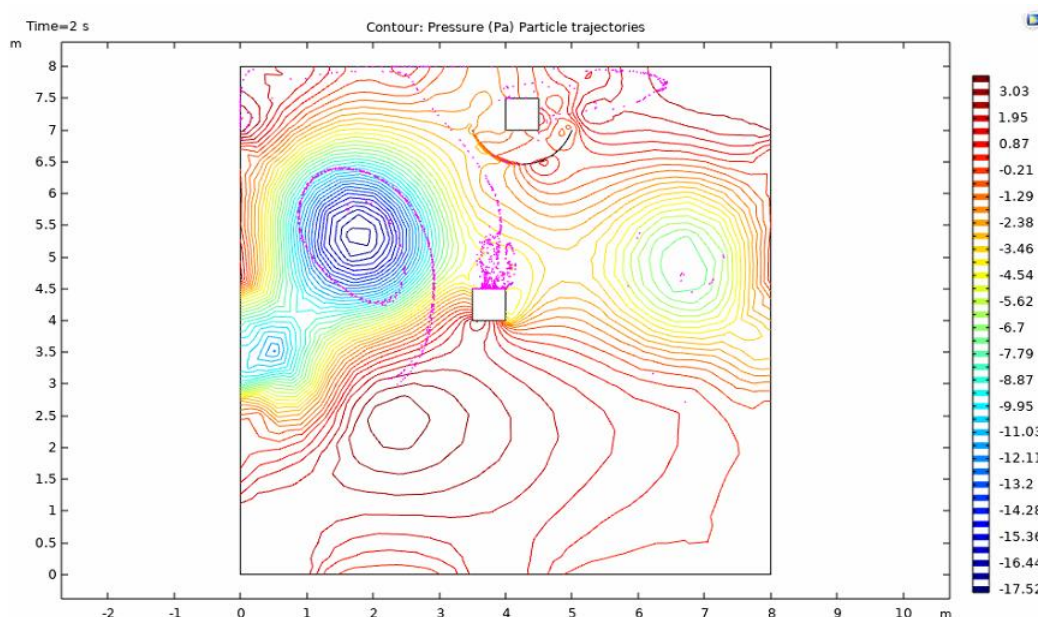


Figura 20: Pressão dentro do ambiente, Cenário 02.

4.3 Simulação do Cenário 03

Diferentemente das simulações anteriores, onde foram consideradas porta e janelas abertas, neste cenário foi realizada uma simulação, considerando janelas e portas fechadas e, apenas o fluxo de ventilação do ambiente, sem entrada, nem saída de ar.

Observa-se na Figura 21, que as partículas se espalham facilmente, por toda a sala de aula, elevando assim, exponencialmente os riscos de contaminação neste ambiente. A velocidade obtida nesse experimento está acima de 5ms^{-1} . Desta forma, facilmente os alunos seriam facilmente alcançados, mesmo estando a uma distância, inicialmente considerada segura.

A seguir é disponibilizado um link, que permite acesso ao arquivo .gif, que permite visualizar a trajetória das partículas nesta simulação para o Cenário 03.

https://drive.google.com/file/d/1N834A8y3kExVs_HXp7N8QR8c1ivkvxKB/view?usp=drive_link

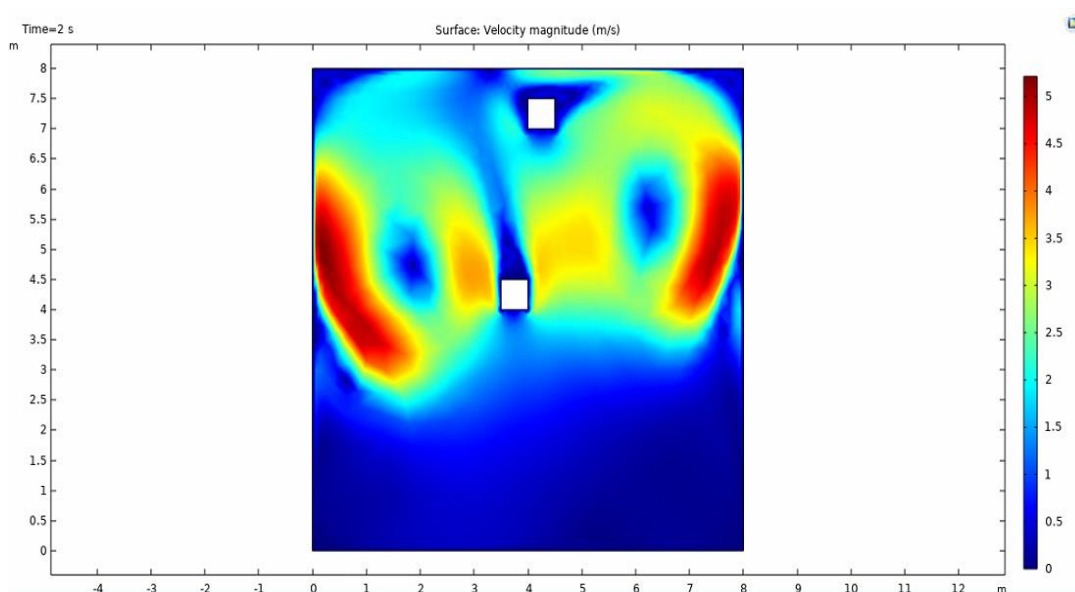


Figura 21: Distribuição de velocidade dos aerossóis exaladas (m/s), Cenário 03.

Na simulação do Cenário 03, os aerossóis expelidos, apresentam uma velocidade de circulação maior, do que as observadas anteriormente, o que resultaria em uma concentração e trajetória de partículas muito superior, pois, sem ventilação, os aerossóis permanecem por mais tempo suspensos e, como não há renovação de ar, dentro do ambiente, os níveis de infecção são potencializados.

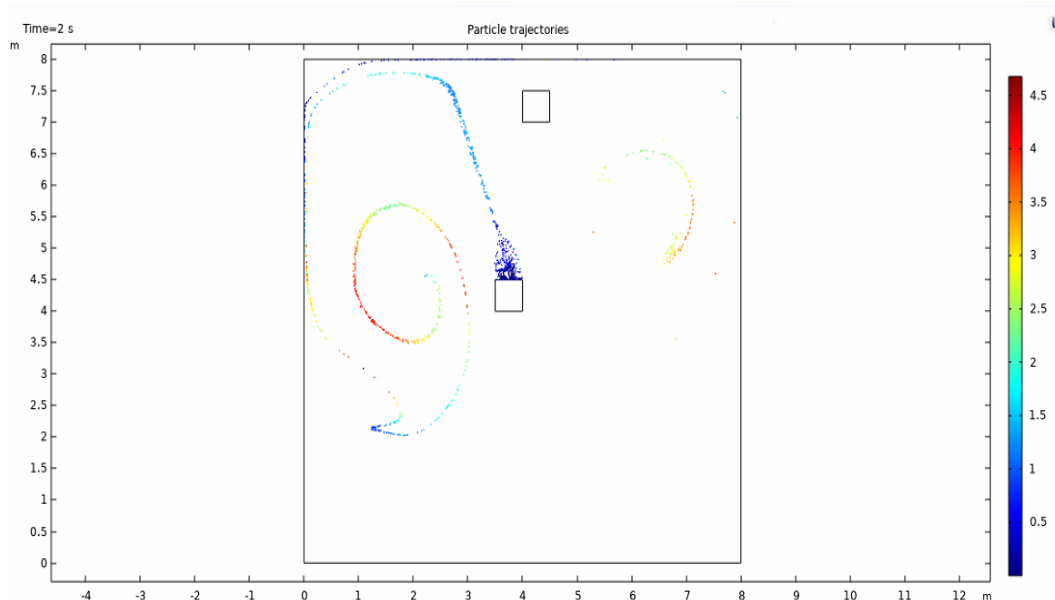


Figura 22: Trajetória das partículas e aerossóis dentro do ambiente

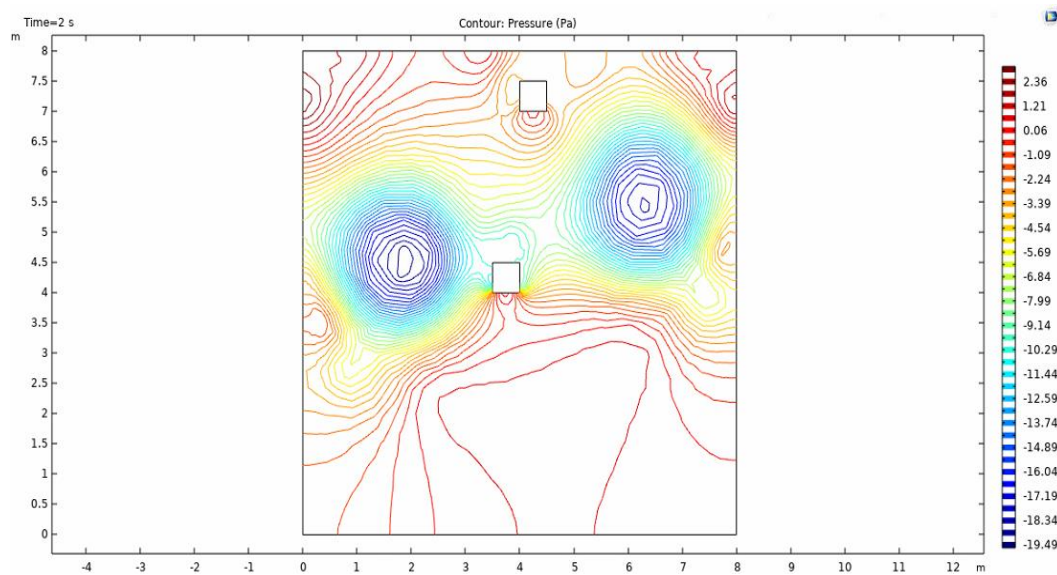


Figura 23: Pressão dentro do ambiente, Cenário 03.

5

Análise dos resultados

A transmissão por aerossóis é definida como a disseminação de um agente infeccioso causada pela dispersão de núcleos de gotículas (aerossóis) que continuam infecciosos quando suspensos no ar por longas distâncias e tempo. (OMS, 2020).

Diante dos resultados das simulações, nota-se que, a dispersão de partículas alcançou maiores níveis, quando considerado a ventilação no ambiente, com todas as janelas abertas. Todavia, quando observado o ambiente totalmente fechado, a dispersão de aerossóis foi severamente reduzida. Convém observar que, quando simulado uma barreira de proteção e janelas abertas, a concentração dos aerossóis diminuiu consideravelmente, nos locais próximos à área onde estava a barreira, dispersando os contaminantes para fora do ambiente, através da renovação ventilação.

Fazendo-se uma associação com uma situação real em sala de aula, considerando diversos alunos presentes, a possibilidade de um indivíduo inalar os aerossóis expirados pelo aluno contaminado, é maior, caso não haja um sistema de ventilação (natural ou mecânica) adequado, pois a renovação do ar no ambiente contribui significativamente na remoção dos aerossóis contaminados.

As simulações mostraram que, os aerossóis fazem um percurso no ar, e que, dependendo do seu tamanho, podem ficar suspensos por horas. Este trabalho não teve como foco de pesquisa expressar o tempo exato que as partículas permanecem o ar, mas observar sua trajetória e dispersão em diferentes cenários simulados. Para definir o tempo que as partículas permanecem suspensas, é necessário considerar diversos outros fatores, como quantidade de alunos/pessoas no local, nível de circulação do ar e tamanho das partículas exaladas, distância entre as pessoas ou se estas estão em pé ou sentadas, por exemplo.

Portanto, após as simulações, pode-se concluir que, uma pessoa vulnerável, especialmente as com baixa imunidade, pode inspirar esses aerossóis e se infectar, desde que, os aerossóis contenham o vírus em quantidade suficiente, para causar infecção no receptor.

5.1

Análise de convergência da malha

A análise de convergência da malha, trata-se de uma possibilidade para alcançar bons resultados, fazendo com que a malha seja subdividida até o resultado de interesse convergir para um determinado valor. Nas simulações apresentadas neste trabalho, foram testados dois tipos de malhas: extremamente grossa e extremamente fina, como mostram as figuras 25 e 26, respectivamente.

No caso deste estudo, as simulações onde a malha utilizada era muito grossa, não foram considerados resultados adequados, pois observou-se que, nesse caso, a trajetória das partículas não foi bem definida, como na simulação em que se utilizou a malha extremamente fina.

No primeiro caso (malha extremamente grossa), as partículas ao serem expelidas, percorrem uma curta distância e logo são depositadas nas superfícies do ambiente, o que não condiz com a realidade, onde as partículas expulsas através espirro e permanecem suspensas por longos períodos. Na segunda análise (malha extremamente fina), as partículas percorreram todo o ambiente, através da ventilação e condições pré-definidas, por esse motivo, após a análise, esta foi a malha escolhida para realizar as simulações deste estudo.

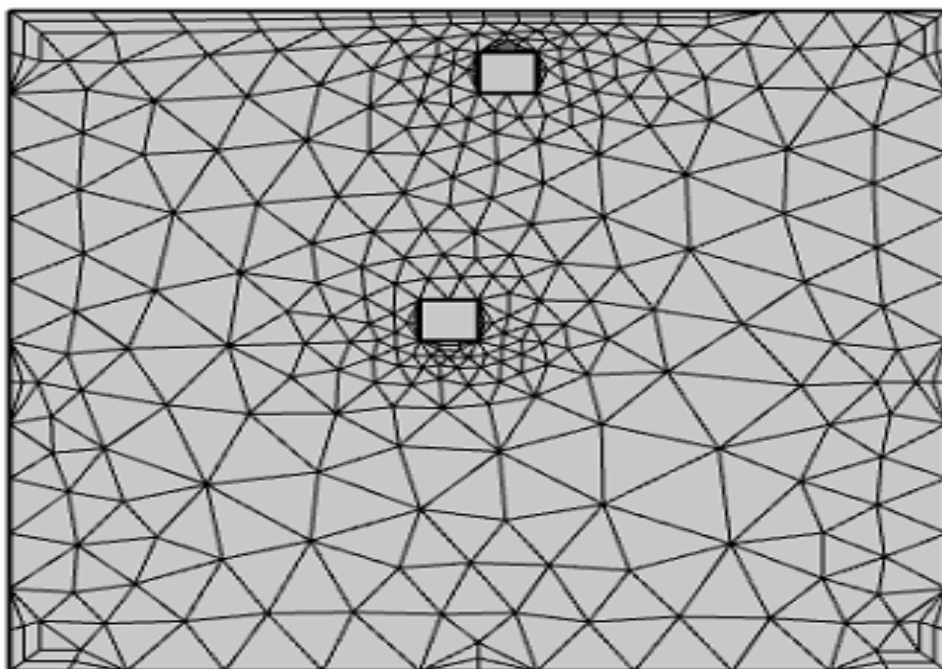


Figura 24: Malha extremamente grossa

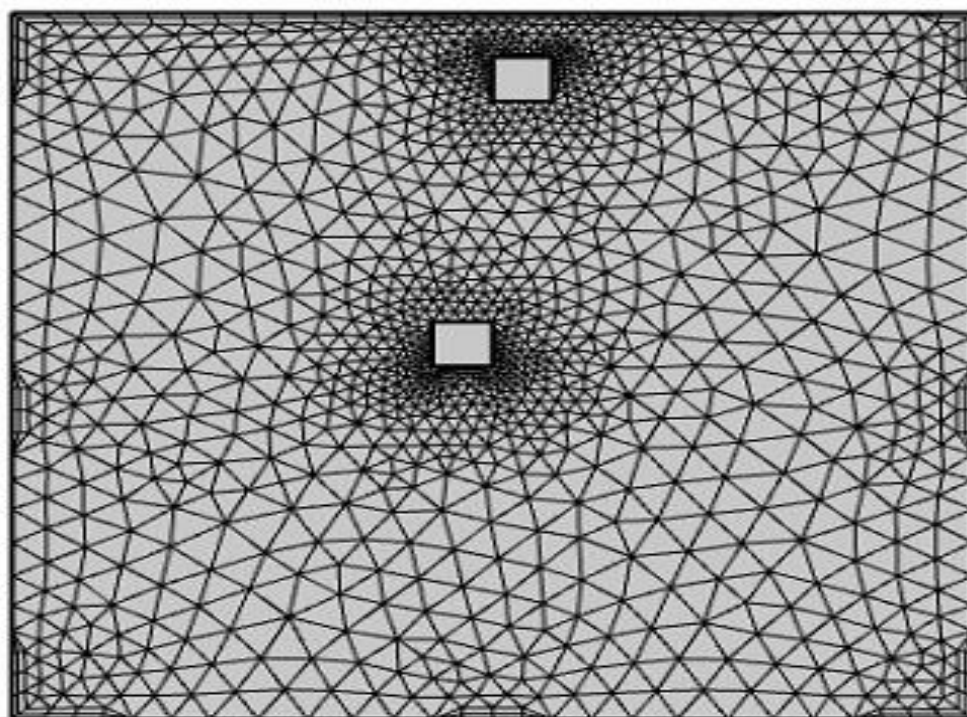


Figura 25: Malha extremamente fina

6 Conclusão

Após realizar diversos estudos, no intuito de compreender como o vírus se comporta, como se propaga e, de certa forma, definir como se prevenir das diversas formas de contaminação, não é possível definir um método completamente eficaz na prevenção da propagação do vírus em ambientes fechados. O estudo sobre este assunto ainda é de grande importância, não apenas no que diz respeito ao vírus SARS-Cov-2, mas, de qualquer vírus respiratório.

Embora, as campanhas de vacinação, tenham sido amplamente divulgadas, grande parte da população ainda não está completamente imunizada. Isto favorece o aparecimento de novas mutações do vírus, que se tornam cada vez mais resistentes, reduzindo a eficácia das vacinas e todo o progresso antes alcançado, diante da enorme variedade de sub-linhagens do vírus, se espalhando por todos os lugares.

Considerando as condições impostas às simulações deste estudo, pode-se afirmar que, dentre os cenários tratados, o mais adequado no sentido de diminuir os índices de contaminação através dos aerossóis, é permanecer no ambiente com porta e janelas abertas, com uma barreira de proteção entre o emissor e o receptor da pluma. Os resultados obtidos neste trabalho, indicaram que a ventilação do ambiente implica no transporte dos aerossóis e que, isso depende do padrão do fluxo de ar.

A simulação CFD, mostrou-se um método bem-sucedido, na tarefa de comparar diferentes cenários de transmissão de aerossóis e os resultados deste estudo foram eficientes, especialmente no sentido de execução apropriada, para medir a dispersão das partículas, em cenários de ambientes diversos.

Através dos resultados obtidos, comprova-se que o distanciamento entre as pessoas, em combinação com um ambiente ventilado e barreiras de proteção entre os envolvidos, diminui consideravelmente, os riscos de exposição e contaminação pelo vírus, pois, permite que as partículas de aerossóis expelidas através da fala, espirro ou tosse, se dispersem para fora do ambiente e/ou se depositem com maior facilidade.

Embora tenha sido um grande desafio, especialmente entender o funcionamento das ferramentas disponibilizadas no software, como elas poderiam auxiliar no desenvolvimento da simulação, bem como, interpretar os resultados

obtidos nas simulações dos cenários, considera-se que este trabalho possa servir como base para outros projetos e modelagens, no sentido de entender como o vírus se espalha nos ambientes e, como é possível diminuir os índices de infecções nesses locais.

Sendo assim, a seguir são apresentadas possíveis considerações para estudos posteriores. Acredita-se os seguintes cenários são interessantes de serem explorados/simulados:

- Ambiente com pessoas tossindo e espirrando simultaneamente;
- Pessoas com e sem máscaras;
- Ambiente com ar-condicionado ligado/desligado, com filtro e sem filtro HEPA;
- Simulações considerando períodos maiores, observando quanto tempo as partículas permanecem suspensas e distâncias percorridas pelas partículas;
- Arranjos de cadeiras e distanciamento adequado, considerando a sala cheia.

Referências Bibliográficas

- 1 ABUHEGAZY, M. et al. Numerical investigation of aerosol transport in a classroom with relevance to COVID-19. *Physics of Fluids*, v. 32, n. 10, p. 1–13, 2020.
- 2 AHMADZADEH, M.; FAROKHI, E.; SHAMS, M. Investigating the effect of air conditioning on the distribution and transmission of COVID-19 virus particles. *Journal of Cleaner Production*, v. 316, n. June, p. 128147, 2021.
- 3 ALVES, G. et al. The use of technology in the combat of covid-19: a documentary research, 2020.
- 4 AUGUSTO, L. DE L. X. Aplicação da fluidodinâmica computacional (CFD) no estudo do escoamento de ar e deposição de partículas em vias aéreas pulmonares. Universidade Federal de São Carlos, Departamento de Engenharia Química, 2014.
- 5 BALACHANDAR, S. et al. International Journal of Multiphase Flow Host-to-host airborne transmission as a multiphase flow problem for science-based social distance guidelines. *International Journal of Multiphase Flow*, v. 132, p. 103439, 2020.
- 6 BENETTI, S. A. W. et al. Coping strategies for cCOVID-19 in prison: a report on experience. *Revista Brasileira de Saúde Ocupacional*, v. 46, p. 1–8, 2021.
- 7 BARROS, R. S.; JUNIOR. Modelagem através do software COMSOL Multiphysics de dados do método eletromagnético multi-frequência. [s.l.] Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, 2015.
- 8 BASAROVÁ, P. et al. Comparação de Dois Solvers para Simulação da Dinâmica de Elevação de Bolhas Únicas: COMSOL vs. Fluent. *Minerals*, p. 15, 2021.
- 9 BHATTACHARYYA, S. et al. A novel CFD analysis to minimize the spread of COVID-19 virus in hospital isolation room. *Chaos, Solitons and Fractals*, v. 139, p. 110294, 2020.
- 10 BORAK, J. Airborne Transmission of COVID-19. *Occupational Medicine*, v. 70, n. 5, p. 297–299, 17 jul. 2020.

- 11 BOUROUBA, L. The Fluid Dynamics of Disease Transmission. Annual Review of Fluid Mechanics, v. 53, p. 473–508, 2021.
- 12 CAMPOS, E. C.; GUEDES, B. A. M. Impactos da Pandemia de COVID-19 sobre Sistemas de Ar-Condicionado e Climatização. p. 1–17, 2020.
- 13 CARREIRA, F. et al. Fluidodinâmica Computacional Aplicada à Simulação do Processo de Moldagem por Transferência de Resina Projeto Final de Curso. 2012.
- 14 CHANDRA SHEKAR, N. V. et al. Controlling virus droplets diffusion in an isolated room using CFD. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, v. 1128, n. 1, p. 012003, 2021.
- 15 CHE, W.; DING, J.; LI, L. Airflow deflectors of external windowsto induce ventilation : Towards COVID-19 prevention and control. Sustainable Cities and Society, v. 77, n. November 2021, p. 103548, 2022.
- 16 CHEN, T.; FENG, Z. The effect of vent inlet aspect ratio and its location on ventilation efficiency. Indoor and Built Environment, v. 29, (2), p. 180–195, 2020.
- 17 CHEN, L. DER. Effects of ambient temperature and humidity on droplet lifetime – A perspective of exhalation sneeze droplets with COVID-19 virus transmission. International Journal of Hygiene and Environmental Health, v. 229, 2020.
- 18 DING, J.; YU, C. W.; CAO, S. Indoor and Built HVAC systems for environmental control to minimize the COVID-19 infection. v. 29, n. 9, p. 1195–1201, 2020.
- 19 ESTRADA, C. Nota Técnica avalia flexibilização do uso de máscaras nas escolas. [s.l: s.n.].
- 20 FAWWAZ ALREBI, O. et al. Airflow dynamics in an emergency department: A CFD simulation study to analyse COVID-19 dispersion. Alexandria Engineering Journal, v. 61, n. 5, p. 3435–3445, 2022.
- 21 FEARS, A. C. et al. Persistence of Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus 2 in Aerosol Suspensions. v. 26, n. 9, 2020.
- 22 FENNELLY, K. P. Viewpoint Particle sizes of infectious aerosols : implications for infection control. The Lancet Respiratory, v. 8, n. 9, p. 914–924, 2020.

- 23 FENG, G. et al. Study on the motion law of aerosols produced by human respiration under the action of thermal plume of different intensities. *Sustainable Cities and Society*, v. 54, p. 101935, 2020a.
- 24 FENG, Y. et al. Influence of wind and relative humidity on the social distancing effectiveness to prevent COVID-19 airborne transmission: A numerical study. *Journal of Aerosol Science*, v. 147, n. April, p. 105585, 2020b.
- 25 FIOCRUZ. Até quando surgirão novas variantes do coronavírus? Disponível em: <<https://www.rondonia.fiocruz.br/entrevista-ate-quando-surgirao-novas-variantes-do-coronavirus/>>, 2023. Acesso em: 19 abril 2023.
- 26 GAO, N.; NIU, J. Transient CFD simulation of the respiration process and inter-person exposure assessment. *Building and Environment*, v. 41, n. 9, p. 1214–1222, 2006.
- 27 GARCIA, L. P. Uso de máscara facial para limitar a transmissão da COVID-19. *Epidemiologia e serviços de saúde : revista do Sistema Único de Saúde do Brasil*, v. 29, n. 2, p. e2020023, 2020.
- 28 GODRI POLLITT, K. J. et al. COVID-19 vulnerability: The potential impact of genetic susceptibility and airborne transmission. *Human Genomics*, v. 14, n. 1, p. 1–7, 2020.
- 29 HEALTH, W. H. O. et al. Transmission of SARS-CoV-2 : implications for infection prevention precautions. n. July, p. 1–10, 2020.
- 30 Infection Prevention and Control of Epidemic-and Pandemic-prone Acute Respiratory Infections in Health Care. Geneva: World Health Organization; 2014 [Prevenção e Controle de Infecção para Infecções Respiratórias Agudas Sujeitas a causar Epidemias e Pandemias. Genebra: Organização Mundial da Saúde; 2020]
- 31 JAYAWEERA, M. et al. Transmission of COVID-19 virus by droplets and aerosols: A critical review on the unresolved dichotomy. *Environmental Research*, v. 188, p. 109819, 2020.
- 32 KOHANSKI, M. A.; LO, L. J.; WARING, M. S. Review of indoor aerosol generation, transport, and control in the context of COVID-19. *International Forum of Allergy and Rhinology*, v. 10, n. 10, p. 1173–1179, 2020.

- 33 KOTB, H.; KHALIL, E. Sneeze and Cough Pathogens Migration Inside Aircraft Cabins. *Rehva*, v. 57, n. 2, p. 36–45, 2020.
- 34 LAWTON, G. The coronavirus evolves. *New Scientist*, v. 249, n. 3318, p. 8–9, 2021.
- 35 MAGNA, J.; MORAIS, C. CFD como ferramenta para simular ventilação natural interna por ação dos ventos: estudos de caso em tipologias verticais do “Programa Minha Casa, Minha Vida”. p. 223–244, 2017.
- 36 MAITELLI, C. D. P. Simulação do escoamento monofásico em um estágio de uma bomba centrífuga utilizando técnicas de fluidodinâmica computacional. p. 182, 2010.
- 37 MATHIEU, H. R. E. et al. Coronavirus (COVID-19) Cases. Disponível em: <<https://ourworldindata.org/coronavirus>>. Acesso em: 28 jan 2023.
- 38 MATHIEU, E.; RITCHIE, H.; ORTIZ-OSPINA, E. A global database of COVID-19 vaccinations. Disponível em: <<https://ourworldindata.org/covid-vaccinations?country=BRA>>. Acesso em: 22 fev 2023.
- 39 MESSIAS, M. V. A. Fluidodinâmica computacional aplicada à geração e propagação de ondas em um reservatório. v. 147, n. March, p. 11–40, 2016.
- 40 MICHELON, C. M. Main SARS-CoV-2 variants notified in Brazil. *Revista Brasileira de Análises Clínicas*, v. 53, n. 2, 2021.
- 41 MIRZAEI, M. et al. COVID-19 spread in a classroom equipped with partition – A CFD approach. *Journal of Hazardous Materials*, v. 420, n. June, 2021.
- 42 MOHAMADI, F.; FAZELI, A. A Review on Applications of CFD Modeling in COVID-19 Pandemic. *Archives of Computational Methods in Engineering*, v. 29, n. 6, p. 3567–3586, 1 out. 2022.
- 43 MOTAMEDI, H. et al. CFD modeling of airborne pathogen transmission of COVID-19 in confined spaces under different ventilation strategies. *Sustainable Cities and Society*, v. 76, n. September 2021, p. 103397, 2022a.
- 44 MORAWSKA, L. et al. How can airborne transmission of COVID-19 indoors be minimised? *Environment International*, v. 142, n. May, 2020.

- 45 MORAWSKA, L.; MILTON, D. K. It Is Time to Address Airborne Transmission of Coronavirus Disease 2019 (COVID-19). *Clinical Infectious Diseases*, v. 71, n. 9, p. 2311–2313, 2020.
- 46 NARAYANAN, S. R.; YANG, S. Airborne transmission of virus-laden aerosols inside a music classroom: Effects of portable purifiers and aerosol injection rates. *Physics of Fluids*, v. 33, n. 3, 2021.
- 47 OMS. Pandemia da doença de coronavírus (COVID-19).
- 48 OMS, W. H. O. Modes of transmission of virus causing COVID-19: implications for IPC precaution recommendations. 2020.
- 49 OMS: Europa pode registrar 2 milhões de mortes por Covid-19 até março de 2022. 2021a.
- 50 OMS. Omicron é o nome da nova variante da Covid-19, que tem grande número de mutações. 2021b.
- 51 OMS. Pandemia da doença de coronavírus (COVID-19).
- 52 OPAS. Vacinas contra a COVID-19. Disponível em: <<https://www.paho.org/pt/vacinas-contracovid-19>>.
- 53 OPAS. Histórico da pandemia de COVID-19. 2022.
- 54 ORTELAN, N. et al. Cloth masks in public places: an essential intervention to prevent COVID-19 in Brazil. *Nature*, 2020.
- 55 OUR WORLD IN DATA. Daily new confirmed COVID-19 cases per million people. Disponível em: <<https://ourworldindata.org/explorers/coronavirus-data-explorer>>. Acesso em: 15 jan 2023.
- 56 PADILLA, R.; BEARD, S. J. Seating in outdoor structures isn't always safer than indoor dining. Here's why. *USA Today*, 2021.
- 57 PAHO, P. A. H. O. Atualização sobre a emergência de sublinhagens deômicron de SARS-CoV-2 eventos de recombinação. p. 1–4, 2022.
- 58 PASSOS, R. G. Avaliação de desempenho de lagoas de estabilização por meio de dados de monitoramento e modelagem em fluidodinâmica computacional (CFD). p. 278, 2012.
- 59 PERES, D.; BOLÉO-TOMÉ, J. P.; SANTOS, G. Respiratory and facial protection: Current perspectives in the context of the COVID-19 pandemic. *Acta Medica Portuguesa*, v. 33, n. 13, p. 583–592, 2020.

- 60 RAYEGAN, S. et al. A review on indoor airborne transmission of COVID-19– modelling and mitigation approaches. *Journal of Building Engineering*, v. 64, n. September 2022, p. 105599, 2022.
- 61 REINHARDT, É. L. Transmissão da COVID-19: um breve reexame das vias de transmissão por gotículas e aerossóis. *Revista Brasileira de Saúde Ocupacional*, v. 47, p. 1–9, 2022.
- 62 REN, J. et al. Numerical Study of Three Ventilation Strategies in a prefabricated COVID-19 inpatient ward. *Building and Environment*, v. 188, n. November 2020, p. 107467, 2021.
- 63 RENCKEN, G. K. et al. Patterns of SARS-CoV-2 aerosol spread in typical classrooms. *Building and Environment*, v. 204, n. July, p. 108167, 2021.
- 64 ROGER W. PRYOR, P. *Multiphysics Modeling Using COMSOL®: A First Principles Approach*. [s.l.: s.n.].
- 65 SHAFAGHI, A. H. et al. on the effect of the respiratory droplet generation condition on COVID-19 transmission. *Fluids*, 2020.
- 66 SILVA, L. D. T. *Investigação do uso e da aplicação das técnicas CFD para estudo e análise de de ventilação natural por ação dos ventos em espaços urbanos*. 2015. Dissertação de mestrado.
- 67 SIMÕES, M. R. *Simulação computacional de escoamento turbulento em compressor axial utilizando ferramenta de CFD*. Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2009, p. 51. Dissertação de mestrado.
- 68 SOUZA, M.; FARIAS, R. Covid-19: Da (in) eficácia do uso de máscaras: uma breve revisão. *Mens Agitat*, v. 15, n. September, p. 142–144, 2020.
- 69 TANG, J. W. et al. Covid-19 has redefined airborne transmission. *The BMJ*, v. 373, n. April, p. 1–2, 2021.
- 70 VARELLA D. , 2013, Disponível em: <<https://drauziovarella.uol.com.br/doencas-e-sintomas/espiro/>> Acesso em: 22 abril 2023.
- 71 VIANNA, A. S. et al. CFD and chemical defense. *Revista Virtual de Química*, v. 6, n. 3, p. 815–832, 2014.

- 72 VILAIN, R. I. O. Análise experimental e numérica da concentração e dinâmica de partículas em sala cirúrgica e quarto de isolamento hospitalar. 2016.
- 73 VITA, G. et al. A CFD-based framework to assess airborne infection risk in buildings. *Building and Environment*, v. 233, n. December 2022, p. 110099, 2023.
- 74 W. F. WELLS. ON AIR-BORNE INFECTION: STUDY II. DROPLETS AND DROPLET NUCLEI. *American Journal of Epidemiology*, v. 20, n. 3, p. 611–618, 1934.
- 75 WILSON, N.; CORBETT, S.; TOVEY, E. Airborne transmission of covid-19. *The BMJ*, 2020.
- 76 WILSON, N. M. et al. Airborne transmission of severe acute respiratory syndrome coronavirus-2 to healthcare workers_ a narrative review. 2020.
- 77 XIE, X. et al. How far droplets can move in indoor environments - revisiting the Wells evaporation-falling curve. *Indoor Air*, v. 17, n. 3, p. 211–225, 2007.
- 78 ZHANG, Z. et al. Disease transmission through expiratory aerosols on an urban bus. *Physics of Fluids*, v. 33, n. 1, p. 015116, 1 jan. 2021.