

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

ANNA CLAUDIA MACACHERO VICTOR RODRIGUES

**QUALIDADE DO AR INTERIOR EM SALA DE AULA: ANÁLISE
COMPUTACIONAL SOBRE A EFICIÊNCIA DE VENTILAÇÃO E CONFORTO
TÉRMICO**

VITÓRIA

2022

ANNA CLAUDIA MACACHERO VICTOR RODRIGUES

**QUALIDADE DO AR INTERIOR EM SALA DE AULA: ANÁLISE
COMPUTACIONAL SOBRE A EFICIÊNCIA DE VENTILAÇÃO E CONFORTO
TÉRMICO**

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Ambiental do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr Bruno Furieri

VITÓRIA

2022

ANNA CLAUDIA MACACHERO VICTOR RODRIGUES

**QUALIDADE DO AR INTERIOR EM SALA DE AULA: ANÁLISE
COMPUTACIONAL SOBRE A EFICIÊNCIA DE VENTILAÇÃO E CONFORTO
TÉRMICO**

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Ambiental do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Ambiental.

Aprovado em 16 de agosto de 2022.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Bruno Furieri

Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador

Prof^a. Dr^a. Elisa Valentim Goulart

Universidade Federal do Espírito Santo
Examinadora Interna

Prof^a. Dr^a. Fernanda Capucho Cezana

Instituto Federal do Espírito Santo
Examinadora Externa

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, a Deus, por permitir que chegasse até aqui, me dando sabedoria e resiliência para que pudesse concluir este trabalho e atingir meu objetivo profissional.

À toda a minha família, em especial aos meus pais, Luiz Claudio e Fernanda, por todo apoio e incentivo, as minhas irmãs, Anna Luiza e Maria Fernanda, por me orientar nos momentos em que me sentia perdida, aos meus avós Vanda, Edyl (*in memoriam*), Vera e Euler pelos ensinamentos da vida e ao meu namorado Lucio Sarmiento, por toda a complacência e suporte durante este momento. Sou grata a todo o carinho e amor recebido de vocês.

A compreensão das minhas amigas, em especial da Giovanna, Maria Clara e Izadora, nos momentos de ausência. Me apoiaram durante toda a minha trajetória acadêmica e vão continuar presentes na minha vida.

Ao meu querido orientador Prof. Dr. Bruno Furieri, por acompanhar minha trajetória desde o 4º período, incentivando a realização do meu intercâmbio acadêmico e por ser o guia fundamental para a minha iniciação ao CFD.

Ao Núcleo de Pesquisa em Qualidade do Ar (NQualiAr) da UFES, pelo acesso aos computadores com licença acadêmica do Ansys Fluent.

À UFES, seu corpo docente, principalmente àqueles professores da Engenharia Ambiental, e a direção/administração que oportunizaram a conclusão deste objetivo.

“Todas as conquistas começam com o simples ato de acreditar que elas são possíveis”

Frida Kahlo

RESUMO

A qualidade do ambiente interior está intimamente ligada com a saúde e bem-estar de seus ocupantes. Estima-se que passamos cerca 80% do tempo em ambientes fechados e muitas vezes, a qualidade do ar nestes é negligenciada. Altos níveis de concentração de poluentes, como o CO₂ emitido pelo metabolismo humano, pode causar efeitos cognitivos e à concentração dos ocupantes. Em ambientes educacionais, tal fato também se mostra intimamente ligado à frequência dos alunos e rendimento escolar. Sendo assim, verifica-se a importância de tratamento deste assunto para ambientes como salas de aula. Este estudo possui como principal objetivo a avaliação, do escoamento do ar em uma sala de aula típica com diferentes cenários de ventilação por meio da dinâmica dos fluidos computacional, buscando identificar possíveis pontos de acúmulos de poluentes e propor melhorias efetivas para aprimorar a ventilação do ambiente e aumentar o conforto dos ocupantes. Primeiramente foi realizado uma campanha experimental para determinação do cenário base da modelagem bem como para proporcionar uma comparação direta dos resultados. Ao total, foram modelados 6 cenários sendo modificadas a geometria, a direção (45° e 90°) e velocidade de entrada do ar no domínio (3,8 m/s e 1,0 m/s). Foi constatado que para os casos cuja entrada de ar se dava a 45°, os resultados de dispersão de CO₂ foram piores quando comparados ao caso de 90° e que a melhor dispersão se deu nos casos em que a velocidade era maior. Visto isso, foram propostos 3 cenários de melhoria, nos quais foram alteradas as entradas e saídas de ar e a geometria do problema. O cenário em que foram adicionadas uma entrada e uma saída de ar e modificado o local da saída de ar foi o que melhor apresentou melhorias, visto que foi capaz de alinhar menores concentrações de CO₂ e conforto térmico.

Palavras-chave: Ambientes Interiores; Ventilação; CFD; Simulação

ABSTRACT

The quality of the indoor environment is closely linked with the health and well-being of its occupants. It is estimated that we spend about 80% of our time in closed spaces, and often the air quality in these environments is neglected. High concentration levels of pollutants, such as CO₂ emitted by human metabolism, may cause cognitive and concentration effects on the occupants. In educational environments, this is also closely linked to student attendance and school performance. Thus, we can clearly note the importance of this issue in environments such as classrooms. The main objective of this study is to evaluate the air flow in a typical classroom with different ventilation scenarios by means of computational fluid dynamics, seeking to identify possible points of pollutants accumulation and propose effective improvements to increase the classroom ventilation occupant's comfort. First, an experimental campaign was conducted to determine the modeling base scenario as well as to provide a direct comparison of the results. In total, 6 scenarios were modeled with changes in geometry, direction (45° and 90°) and air velocity entering the domain (3.8 m/s and 1.0 m/s). It was found that for the cases where the air entrance was at 45°, the CO₂ dispersion results were worse when compared to the 90° cases, and that the best dispersion occurred in the cases where the velocity was higher. Given this, 3 improvement scenarios were proposed, in which the air inlets and outlets and the geometry of the problem were changed. The scenario in which one air inlet and one air outlet were added and the location of the air outlet was modified was the one that presented the best improvement, since it was able to align lower CO₂ concentrations and thermal comfort.

Keywords: Indoor; Air quality; Ventilation; CFD; Simulation

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Efeitos adversos dos poluentes atmosféricos à saúde humana	20
Figura 2: Classificação dos sistemas de ventilação	23
Figura 3: Exemplificação dos tipos de ventilação natural (a) cruzada (b) lado único.....	24
Figura 4: Range de valores de qualidade ortogonal da malha e qualidade da malha associada	50
Figura 5: Range de valores de assimetria e qualidade da malha associada	51
Figura 6: Hierarquia dos modelos de turbulência	55
Figura 7: Medidas pontuais de velocidade típicas de um escoamento turbulento	57
Figura 8: Figura esquemática da cabine do experimento que foi reproduzido computacionalmente ..	62
Figura 9: Sensor Aeroqual Serie 500.....	65
Figura 10: Sensor Aeroqual Serie 500 instalado no ambiente estudado	66
Figura 11: Sensor TAFR-190 Anemômetro de fio quente	67
Figura 12: Diferença de representação de geometria dos ocupantes	68
Figura 13: Distribuição dos ocupantes na sala de aula avaliada no estudo de caso.	69
Figura 14: Domínio experimental de Zheng et al (2022) reproduzido computacionalmente	72
Figura 15: Vista (a) Superior, (b) Lateral e (c) Frontal da malha gerada para o Caso Validação	73
Figura 16: Contornos de concentração de CO ₂ para o caso MVR17 a cada 5 minutos de escoamento	76
Figura 17: Contornos de velocidade para o caso validação no plano XY em z = 1,5 m para as estratégias de ventilação (a) MVR12, (b) MVR17 e (c) MVR25	78
Figura 18: Vetores coloridos pela velocidade para o caso validação no plano XY em z = 1,5 m para as estratégias de ventilação (a) MVR12, (b) MVR17 e (c) MVR25	78
Figura 19: Contornos de concentração de CO ₂ do caso validação nos planos verticais de referência para as estratégias de ventilação (a) MVR12, (b) MVR17 e (c) MVR25	79
Figura 20: Contornos de concentração de CO ₂ do caso validação nos planos horizontais de referência para as estratégias de ventilação (a) MVR12, (b) MVR17 e (c) MVR25	79
Figura 21: Contornos de energia cinética turbulenta para os cenários (a) MVR12, (b) MVR17 e (c) MVR25.....	80
Figura 22: Geometria I do estudo de caso: ocupantes como blocos maciços	83
Figura 23: Vista (a) Superior, (b) Lateral e (c) Frontal da malha gerada para a Geometria I.....	84
Figura 24: Geometria II do estudo de caso: ocupantes como blocos vazados	85
Figura 25: Vista (a) Superior, (b) Lateral e (c) Frontal da malha gerada para a Geometria II.....	86
Figura 26: Contornos de concentração de CO ₂ para os cenários 1, 2 e 3 nos planos (a) “Nariz-aluno” (b) “nariz-professor”	88
Figura 27: Contornos de velocidade para os cenários 1, 2 e 3 nos planos (a) “0.1-chao” (b) “nariz-aluno” e (c) “nariz-professor”	90
Figura 28: Contorno de energia cinética turbulenta para os cenários 1, 2 e 3 no plano “fileira-2”, destacando-se a posição 9	91
Figura 29: Trajetória das partículas de CO ₂ emitidas pelos ocupantes coloridas pelo tempo para os cenários 1, 2 e 3.....	92

Figura 30: Contorno de temperatura para os cenários 2 e 3 no plano "monitor"	93
Figura 31: Contorno de concentração de CO ₂ para os cenários 4, 5 e 6 nos planos (a) "nariz-alunos" (b) "nariz-professor"	95
Figura 32: Contorno de velocidades para os cenários 4, 5 e 6 nos planos (a) "0.1-chao", (b) "nariz-aluno" e (c) "nariz-professor"	96
Figura 33: Trajetória das partículas de CO ₂ emitidas pelos ocupantes coloridas pelo tempo	97
Figura 34: Contorno de energia cinética turbulenta para os cenários 4, 5 e 6 no plano "fileira-2"	97
Figura 35: Vetores coloridos pela velocidade para os cenários 4, 5 e 6 no plano "vertical-monitor" ...	98
Figura 36: Contorno de temperaturas para os cenários 5 e 6 no plano "monitor"	99
Figura 37: Contornos de concentração de CO ₂ para os cenários 5 e 7 nos planos (a) "nariz-aluno" e (b) "nariz-professor"	102
Figura 38: Contorno de velocidade para os cenários 5 e 7 nos planos (a) "0.1-chao", (b) "nariz-aluno" e (c) "nariz-professor"	103
Figura 39: Vetores coloridos com a velocidade para os cenários 5 e 7 nos planos (a) "fileira-1" e (b) "linha-1"	104
Figura 40: Contornos de energia cinética turbulenta para os cenários 5 e 7 nos planos (a) "fileira-2" e (b) "nariz-alunos"	105
Figura 41: Contornos de temperaturas para os cenários 5 e 7 no plano "monitor"	106
Figura 42: Geometria III com a porta alterada de local	107
Figura 43: Vista (a) Superior, (b) Lateral e (c) Frontal da malha gerada para a Geometria III	108
Figura 44: Contornos de concentração de CO ₂ para os cenários 5 e 8 nos planos (a) "nariz-alunos" e (b) "nariz-professor"	110
Figura 45: Vetores coloridos pela velocidade para os cenários 5 e 8 no plano (a) "nariz-aluno" e (b) "nariz professor"	111
Figura 46: Contornos de velocidade para os cenários 5 e 8 nos planos (a) "0.1-chao", (b) "nariz-alunos" e (c) "nariz-professor"	112
Figura 47: Contorno de energia cinética turbulenta para os cenários 5 e 8 no plano "monitor"	113
Figura 48: Contorno de temperaturas para os cenários 5 e 8 no plano "monitor"	114
Figura 49: Contornos de concentração de CO ₂ para os cenários 7 e 9 no plano (a) "nariz-aluno" e (b) "nariz-professor"	116
Figura 50: Contorno de velocidade para os cenários 7 e 9 nos planos (a) "0.1-chao", (b) "nariz-aluno" e (c) "nariz-professor"	117
Figura 51: Contorno de energia cinética turbulenta para os cenários 7 e 9 no plano (a) "fileira-2" e (b) "nariz-aluno"	118
Figura 52: Contorno de temperatura para os cenários 7 e 9 no plano "monitor"	119

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Valores máximos recomendáveis de diversos parâmetros físicos, químicos e biológicos estabelecidos na Resolução ANVISA nº 09/03.....	41
Tabela 2: Valores limites para as substâncias passíveis de monitoramento de acordo com a Lei francesa nº 2010-788	43
Tabela 3: Principais padrões de qualidade do ar interior.....	46
Tabela 4: Apresentação das exigências internacionais sobre a qualidade do ar em ambientes internos	47
Tabela 5: Modelos de turbulência baseados na metodologia RANS	58
Tabela 6: Constantes empíricas para o modelo k-e padrão	59
Tabela 7: Velocidades de entrada de ar no caso de validação	63
Tabela 8: Velocidades e temperaturas médias nas entradas do domínio estudado	66
Tabela 9: Cenários modelados no estudo de caso.....	70
Tabela 10: Planos auxiliares traçados para avaliação das variáveis do estudo de caso	71
Tabela 11: Características gerais da malha do caso validação.....	73
Tabela 12: Concentrações de CO ₂ [ppm] ao final de 1 hora obtidas pelo experimento e pelo modelo	75
Tabela 13: Número de Reynolds para as diferentes estratégias de ventilação do caso validação	80
Tabela 14: Intervenções ocorridas durante o monitoramento	82
Tabela 15: Características gerais da malha gerada para a Geometria I do estudo de caso	83
Tabela 16: Características gerais da malha gerada para a Geometria II do estudo de caso	85
Tabela 17: Comparação entre as concentrações de CO ₂ obtidas pelo modelo e pelo experimento para os cenários 1, 2 e 3	87
Tabela 18: Comparação entre as concentrações de CO ₂ obtidas pelo modelo e pelo experimento para os cenários 4, 5 e 6	94
Tabela 19: Características gerais da malha gerada para a Geometria III	107

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Fatores que afetam a qualidade do ar interior	19
Quadro 2: Concentrações de CO ₂ em ambientes internos e principais efeitos observados à saúde/bem-estar dos ocupantes	22
Quadro 3: Características principais dos estudos envolvendo modelagens CFD citados no capítulo	36
Quadro 4: Especificações técnicas do anemômetro de fio quente utilizado	67

LISTA DE ABREVIATURAS

QAI	Qualidade do Ar Interior
SED	Síndrome dos Edifícios Doentes
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i> / Dinâmica dos Fluidos Computacional
CMR	Concentrações Máximas de Referência
OMS	Organização Mundial da Saúde
IEMA	Instituto Estadual de Meio Ambiente
ANSES	<i>Agence Nationale de Sécurité Sanitaire de l'Alimentation, de l'Environnement et du Travail</i> / Agência Nacional de Segurança Sanitária da Alimentação, do Meio Ambiente e do Trabalho
ERP	<i>Établissements Recevant du Public</i> / Estabelecimentos Recebedores de Público
Brasindoor	Sociedade Brasileira de Meio Ambiente e Controle de Qualidade do Ar de Interiores

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	OBJETIVOS	17
2.1	GERAL.....	17
2.2	ESPECÍFICOS.....	17
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
3.1	QUALIDADE DO AMBIENTE INTERNO.....	18
3.1.1	Qualidade do ar interior	18
3.1.2	Poluentes em ambientes interiores	20
3.1.3	Ventilação em ambientes interiores	22
3.1.4	Temperatura e velocidade do ar	25
3.2	MODELAGEM CFD.....	26
3.3	ESTUDOS CORRELATOS.....	29
3.4	QUADRO REGULATÓRIO DA QUALIDADE DO AR INTERIOR.....	40
4	METODOLOGIA	49
4.1	CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS MODELOS CFD PROPOSTOS.....	49
4.1.1	Software	49
4.1.2	Malha	49
4.1.3	Equações governantes	51
4.1.4	Turbulência	54
4.1.1	Condições iniciais e condições de contorno	59
4.2	VALIDAÇÃO DO MODELO.....	59
4.3	ESTUDO DE CASO.....	63
4.3.1	Seleção do ambiente	63
4.3.2	Campanha experimental	64
4.3.3	Modelagens	68
4.3.3.1	Geometria e Malha	68

4.3.3.2 Cenários modelados, Condições Iniciais e Condições de Contorno

69

5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	72
5.1	VALIDAÇÃO DO MODELO	72
5.2	ESTUDO DE CASO	81
5.2.1	Campanha experimental	81
5.2.2	Modelagens	82
5.2.2.1	Geometrias e Malhas	82
5.2.2.2	Cenários 1, 2 e 3: velocidade de entrada de 3,8 m/s	86
5.2.2.3	Cenários 4, 5 e 6: velocidade de entrada de 1,0 m/s	93
5.3	PROPOSTA DE MELHORIA	100
5.3.1	PORTA E JANELAS ABERTAS	100
5.3.2	PORTA EM OUTRA POSIÇÃO	106
5.3.2.1	Cenário 8: Porta em outra posição e mantida fechada, juntamente com as janelas	108
5.3.2.2	Cenário 9: Porta em outra posição e mantida aberta, juntamente com as janelas	114
6	CONCLUSÃO	120
	REFERÊNCIAS	123

1 INTRODUÇÃO

Desde a Revolução Industrial, ocorrida no século XIX, houve um grande crescimento populacional e conseqüente aumento das atividades industriais e de comércio, principalmente para suprir as necessidades humanas. Além disso, junto ao desenvolvimento social e econômico, houve ainda uma modificação do padrão de consumo da população, contribuindo para a degradação do meio ambiente em diversos aspectos, sendo a qualidade do ar um deles.

O incremento gradativo da emissão de poluentes atmosféricos e conseqüente redução da qualidade do ar, causam inúmeros prejuízos a saúde da população e a sua qualidade de vida sendo, de acordo com Ferreira (2014), um dos maiores problemas de saúde pública e redução da qualidade de vida a serem enfrentados. Em 2006, a Organização Mundial da Saúde relatou que mais de 2 milhões de mortes prematuras podem ser atribuídas aos efeitos da poluição do ar (WHO, 2006) se tornando um fator ambiental importante para a saúde da população.

Como observado por Ferreira e Cardoso (2013) a qualidade do ar interior pode ser igual ou pior do que aquelas encontradas em ambientes externos, podendo atingir valores de duas a cinco vezes superiores ao nível de poluição externa. Entretanto, esse nível de poluição pode variar uma vez que a qualidade do ar interior depende de diversos fatores inerentes ao imóvel e as atividades neles realizadas (FERREIRA, 2014).

Considerando que a população passa cerca de 80% do tempo em espaços fechados, seja no ambiente de trabalho ou em casa (HEINRICH, 2011), é notória a importância da manutenção de um ambiente interior de qualidade.

Os efeitos de uma má qualidade do ar interior sobre a população são bem conhecidos atualmente. Segundo Shaughnessy *et al.* (2006), uma má qualidade do ar interior pode levar a redução da capacidade de realização de atividades mentais, como memória, cálculo ou ainda concentração, afetando o potencial de aprendizado.

Em ambientes educacionais, principalmente aqueles voltados para crianças, os problemas relacionados à poluição interior se tornam ainda mais delicados, uma vez que as crianças são mais suscetíveis aos efeitos da poluição, causando efeitos negativos no aprendizado e conseqüentemente na performance dos estudantes (MENDELL; HEATH, 2004).

Sendo assim, pode-se notar a importância da adequação da qualidade do ar interior nos ambientes educacionais, visto que é possível obter melhores resultados, aumentando a frequência dos alunos em sala de aula e melhorando o desempenho dos mesmos (EPA, 2014).

O Brasil apresenta poucas legislações relacionadas a qualidade do ar interior. Em comparação com a legislações de outros países, como Finlândia, Portugal, França e Alemanha, a legislação brasileira é aquela que menor engloba exigências internacionais sobre a qualidade do ar interior. Na França, por exemplo, já é obrigatório, desde 2010 o monitoramento da qualidade do ar interior em estabelecimentos que recebem grandes públicos, o que inclui escolas maternas, elementares e colégios.

Dessa forma, é possível perceber que o quadro regulatório brasileiro relacionado ao assunto ainda é precário. Isso favorece a manutenção da má qualidade desses ambientes, visto que há poucos investimentos e um esquecimento geral da importância do tema.

Nos ambientes educacionais brasileiros, em especial as observadas na Grande Vitória, é incomum verificar planos de ação para melhoria da qualidade do ar interior ou uma operação adequada das instalações, o que afeta drasticamente a qualidade do ar nesses ambientes. Além disso, muitas vezes a falta de recursos impede a manutenção dos aparelhos que auxiliam na ventilação das salas, principalmente dos sistemas de ar-condicionado, afetando a qualidade da renovação do ar e, conseqüentemente, a qualidade do ar nesses ambientes.

Uma maneira de se buscar uma melhor qualidade do ar em ambientes interiores é por meio da inclusão de conceitos bioclimáticos a projetos arquitetônicos, como por exemplo a priorização de ventilação natural. Essa ação traz benefícios notórios, levando a economia de energia e uma menor demanda por sistemas de ventilação mecânicos (BEVILAQUA *et al.*, 2019).

A ventilação é responsável pela introdução de ar novo e expulsão do ar já contaminado. A análise de sua eficiência pode ser realizada por meio de procedimentos empíricos/experimentais ou por meio de modelos computacionais (MORAIS; LABAKI, 2017). Atualmente, uma das metodologias difundidas para a realização desta análise é por meio da modelagem CFD.

A modelagem CFD (Dinâmica dos Fluidos Computacional, do inglês, Computational Fluid Dynamics) é uma técnica de simulação para prever campos espaciais e temporais (BEVILAQUA *et al.*, 2019) de uma problemática associada a escoamento de fluidos. Isso, por sua vez, é alcançado a partir de algoritmos numéricos que solucionam as principais equações regentes da dinâmica dos fluidos (MALALASEKERA; VERSTEEG, 2007).

Segundo Malalasekera e Versteeg (2007) a modelagem CFD passou a ser amplamente difundida a partir da década de 1990, uma vez que houve significativas melhoras nas capacidades computacionais e os *softwares* adquiriram interfaces mais amigáveis. Além disso, quando comparada a estudos experimentais, as modelagens podem trazer resultados mais precisos e representativos sobre a distribuição dos campos de velocidade e concentração dos fluidos, uma vez que analisam o domínio como um todo em vez de apenas áreas específicas e previamente selecionadas. Apesar disso, a análise CFD não substitui as análises experimentais e teóricas, mas sim constitui um importante complemento para tais estudos (LIU *et al.*, 2019).

Foi observado uma lacuna quanto a realização de estudos de modelagem CFD para ambientes interiores não-ocupacionais, principalmente ambientes educacionais, mesmo sendo um assunto de alta sensibilidade. Dessa forma, o presente projeto busca, de certa forma, colaborar para o preenchimento deste vão ao realizar uma análise computacional sobre a qualidade de uma sala de aula típica a fim de atuar na melhoria desses ambientes em geral e visando reduzir a exposição constante dos alunos a níveis de poluição do ar indesejáveis.

Para isso, utilizou-se do CFD para simular casos distintos de ventilação mecânica e ventilação mista a fim de obter os campos de velocidade de escoamento do ar e o campo de concentrações de CO₂, um gás considerado como indicador de confinamento.

Esse tipo de análise se faz importante tanto na etapa pós projeto, para buscar ações de melhorias eficientes, quanto no pré-projeto, pois permite visualizar as alternativas de ambientes economicamente viáveis e ambientalmente mais saudáveis.

2 OBJETIVOS

2.1 GERAL

Estudar a dinâmica do escoamento do ar e de poluentes gasosos em uma sala de aula típica com diferentes cenários de ventilação e propor melhorias para aumentar o conforto dos ocupantes e melhorar a dispersão dos poluentes nesses ambientes.

2.2 ESPECÍFICOS

- Validar o modelo utilizado reproduzindo computacionalmente o estudo experimental de Zheng *et al* (2022);
- Estudar o escoamento do ar numa sala de aula típica por meio de dinâmica dos fluidos computacional;
- Verificar a influência da simplificação da geometria na qualidade e acurácia dos resultados de estudos de ventilação de ambientes interiores;
- Investigar a influência das diferentes estratégias de ventilação sobre a qualidade do ambiente interior;

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 QUALIDADE DO AMBIENTE INTERNO

3.1.1 Qualidade do ar interior

A qualidade do ar interior refere-se à qualidade do ar em ambientes fechados e não industriais, como escolas, escritórios, residências, hospitais entre outros (SCHIRMER *et al.*, 2011). Apesar de parecer um conceito simples, na verdade é bastante complexo e abrangente uma vez que a qualidade do ar nesses ambientes depende de diversos fatores ambientais (localização do imóvel, o clima da região, o sistema de ventilação utilizado, as possíveis fontes de emissão internas, proximidade de fontes externas entre outros) e ocupacionais (quantidade de ocupantes, a taxa de realização de atividades, o tipo de atividade realizada, materiais ou produtos armazenados no local etc.) (APA, 2009).

Na década de 1970, devido à crise energética, buscou-se construir edifícios selados a fim de evitar a transferência de calor entre o meio interno e externo. Com isso, as trocas de ar também passaram a ser prejudicadas, proporcionando um acúmulo de poluentes no ambiente e consequentes efeitos à saúde de quem era constantemente exposto (SCHIRMER *et al.*, 2011).

Nessa época, os materiais de construção também foram alterados para atender os requisitos necessários de eficiência energética e conforto interno. Contudo, esses novos materiais eram responsáveis por emitir maior quantidade de COVs e outros poluentes químicos (DUKE, 2007). Dessa forma, a qualidade do ar nesses ambientes passou a ser ainda mais prejudicada uma vez que se reduziu as trocas de ar e aumentou-se as emissões provenientes de fontes internas.

Nesse mesmo período, começou-se a constatar relatos de problemas de saúde por parte de trabalhadores, principalmente aqueles que passavam toda a jornada de trabalho em ambientes internos em edifícios selados, tomando-se consciência da problemática da qualidade do ar interior. Este tema, por sua vez, repercutiu e começou a ser discutido por organismos internacionais e ficou conhecido como Síndrome dos Edifícios Doentes (SED).

Atualmente, o termo SED é utilizado para descrever situações em que mais de 20% dos ocupantes de um ambiente fechado passam por efeitos adversos à saúde ou ao

conforto e que são ligados ao tempo que essas pessoas permanecem nesses ambientes (FAKHOURY, 2017). Já se sabe também que a SED pode resultar em uma redução significativa do desempenho no trabalho e produtividade, bem como nas relações interpessoais (QUADROS, 2008).

Devido ao modo de vida atual, a população passa a maior parte do tempo, mais de 80%, em espaços fechados, seja no ambiente de trabalho ou em casa (HEINRICH, 2011). Porém, grande parte da população ainda não se preocupa com a qualidade do ar nesses ambientes uma vez que o senso comum leva a crer que a qualidade do ar em ambientes fechados tende a ser melhor do que do ar exterior. Entretanto, sabe-se que essa pode ser igual ou pior do que aquelas encontradas em ambientes externos, atingindo, em alguns casos, valores de duas a cinco vezes superiores ao nível de poluição externa (FERREIRA; CARDOSO, 2013).

Sendo assim, é notório que manter uma boa qualidade do ar interior é de extrema importância para a manutenção da saúde e bem-estar dos ocupantes.

Entretanto vale ressaltar que a qualidade do ar interior não é caracterizada observando-se apenas as concentrações de poluentes presentes no ambiente, mas também os níveis de conforto (umidade relativa, temperatura do ar, velocidade e direção das correntes de ar) que este apresenta bem como da percepção de cada pessoa presente no ambiente (FERREIRA, 2014).

Sendo assim, a qualidade do ar interior pode ser afetada por uma pluralidade de fatores, principalmente biológicos, físicos e químicos. O Quadro 1 apresenta os principais fatores que podem contribuir para a percepção de uma má qualidade do ar interior.

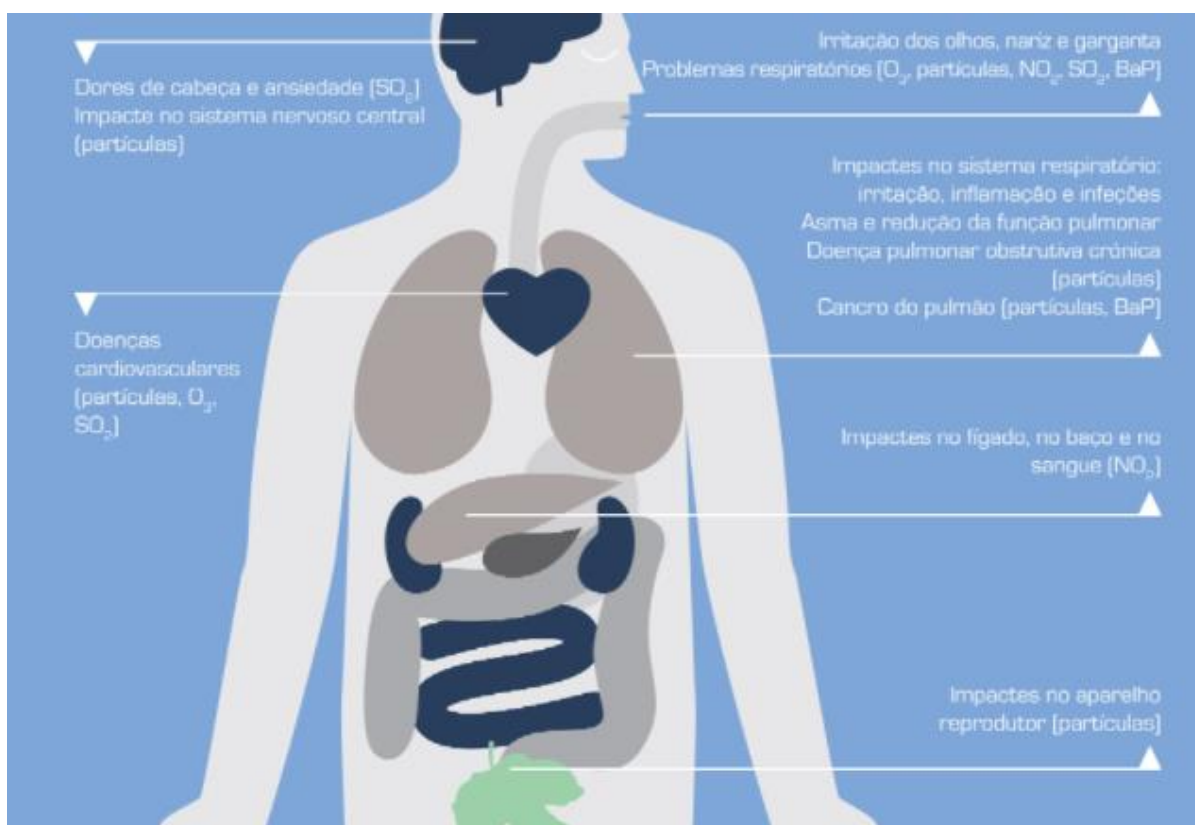
Quadro 1: Fatores que afetam a qualidade do ar interior

Fatores Biológicos	Fatores Químicos	Fatores Físicos
Bactérias	Monóxido de carbono	Temperatura
Fungos	Compostos orgânicos voláteis (COVs)	Umidade relativa
Ácaros	Dióxido de enxofre	Ventilação
Vírus	Ozônio	Taxa de renovação do ar
	Gases	Iluminação
	Odores	Campo eletromagnético
		Campo elétrico alternado
		Eletricidade estática

Fonte: adaptado de Higuero (2016)

A poluição atmosférica, tanto do ar ambiente quanto do ar interior, está associada a diversos efeitos adversos a saúde humana. A Figura 1 mostra os principais poluentes e os respectivos efeitos sobre as diferentes partes do corpo humano.

Figura 1: Efeitos adversos dos poluentes atmosféricos à saúde humana



Fonte: APA, 2014

Além desses efeitos, a exposição a um ambiente interno com má qualidade do ar pode levar ainda a sintomas como dor de cabeça, fadiga, ardor nos olhos, irritação de nariz e garganta bem como afetar a concentração e a capacidade de realização de tarefas mentais (SANTOS, U. P. *et al.*, 1992; SHAUGHNESSY *et al.*, 2006).

3.1.2 Poluentes em ambientes interiores

De acordo com a Resolução CONAMA n° 436 de 2011, o termo “emissão” é definido como o lançamento na atmosfera qualquer forma de matéria sólida, líquida ou gasosa (CONAMA, 2011). Então, fontes de emissão são todas aquelas atividades ou situações que levam ao lançamento de matéria na atmosfera que, por sua vez, podem levar a uma deterioração da qualidade do ar.

A qualidade do ar interior pode ser afetada por uma pluralidade de fontes de emissão, presentes tanto no próprio ambiente (fontes internas) quanto provenientes do ambiente externo e que são capazes de adentrar o ambiente interno (fontes externas). De acordo com (COSTA; COSTA, 2006) a má qualidade do ar interior pode decorrer de uma má ventilação, de fontes de contaminação interiores (por exemplo emissões químicas dos móveis, equipamentos e materiais de limpeza utilizados entre outros), contaminação microbiológica, contaminação proveniente do exterior (emissões veiculares, industriais etc.) e ainda pelos materiais de construção utilizados.

Os principais poluentes que são encontrados em ambientes internos e que são normalmente avaliados em estudos experimentais são: material particulado (MP), dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrogênio (NO_2), dióxido de enxofre (SO_2), ozônio (O_3), radônio, metais pesados, em especial o chumbo, compostos orgânicos voláteis (COV), principalmente benzeno e formaldeído, e contaminantes microbiológicos (fungos, bactérias, ácaros e outros) (COSTA; COSTA, 2006; VELASCO, 2020).

O dióxido de carbono é um gás incolor e inodoro gerado principalmente a partir de processos de combustão, decomposição orgânica e do metabolismo dos seres vivos (ANNESI-MAESANO *et al.*, 2013). É considerado um composto de grande relevância ambiental uma vez que seu poder calorífico é alto, sendo assim, o aumento de sua concentração na atmosfera promove o agravamento do efeito estufa (AZUMA *et al.*, 2018).

Ele ocorre naturalmente na atmosfera em baixas concentrações variando entre 300 ppm a 500 ppm dependendo da hora, da estação do ano, das condições climáticas locais e ainda das características físicas da região ao redor (PERSILY, 1997).

Em ambientes internos, este composto é utilizado como marcador de confinamento ou qualidade de ventilação visto que a concentração de CO_2 nesses ambientes é principalmente definida pela taxa com que é emitido pelas atividades humanas, essas que dependem da duração e do nível de atividade (PERSILY, 1997).

Dessa forma, caso altas concentrações de CO_2 sejam encontradas, incorre que há uma carência no fornecimento de ar fresco possivelmente associado ainda ao uso intenso do espaço e a baixa manutenção nos sistemas de refrigeração de ar (FERREIRA, 2014). As concentrações típicas de CO_2 encontradas em ambientes

interiores e que não são observados efeitos diretos à saúde e bem-estar dos ocupantes são da faixa de 800 ppm a 1000 ppm (AZUMA *et al.*, 2018).

Ainda de acordo com Azuma *et al.* (2018), alguns estudos demonstraram que à medida que a concentração de CO₂ aumenta, as taxas de respiração aumentam acima de um nível necessário para as trocas gasosas, causando uma carga adicional no sistema respiratório. Além disso, os níveis de CO₂ num ambiente interior pode estar relacionado com crises de asma e rinite e, além de tosse seca a noite (KIM *et al.*, 2005). Sabe-se também que concentrações mais elevadas podem gerar efeitos sobre a atenção e o desempenho psicomotor dos ocupantes (MENDELL; HEATH, 2004).

O Quadro 2 apresenta algumas faixas de concentração e os principais efeitos à saúde e bem-estar dos ocupantes.

Quadro 2: Concentrações de CO₂ em ambientes internos e principais efeitos observados à saúde/bem-estar dos ocupantes

Faixa de concentração [ppm]	Principais efeitos à saúde/bem-estar dos ocupantes
400 – 1.000	Faixa de concentrações normalmente encontradas em ambientes anteriores sem observância de efeitos diretos à saúde
1.000 – 2.000	Associado a sonolência e percepção de baixa qualidade do ar
2.000 – 5.000	Associado a dores de cabeça, sonolência, dificuldade de concentração ou perda de atenção, aumento do ritmo cardíaco e leves náuseas
Acima de 5.000	Pode estar associado a presença de outros gases em altas concentrações, o que pode levar a uma deficiência de fornecimento de oxigênio ou toxicidade.
Acima de 40.000	Imediatamente prejudicial devido a privação de oxigênio

Fonte: Wisconsin DHS, 2022

3.1.3 Ventilação em ambientes interiores

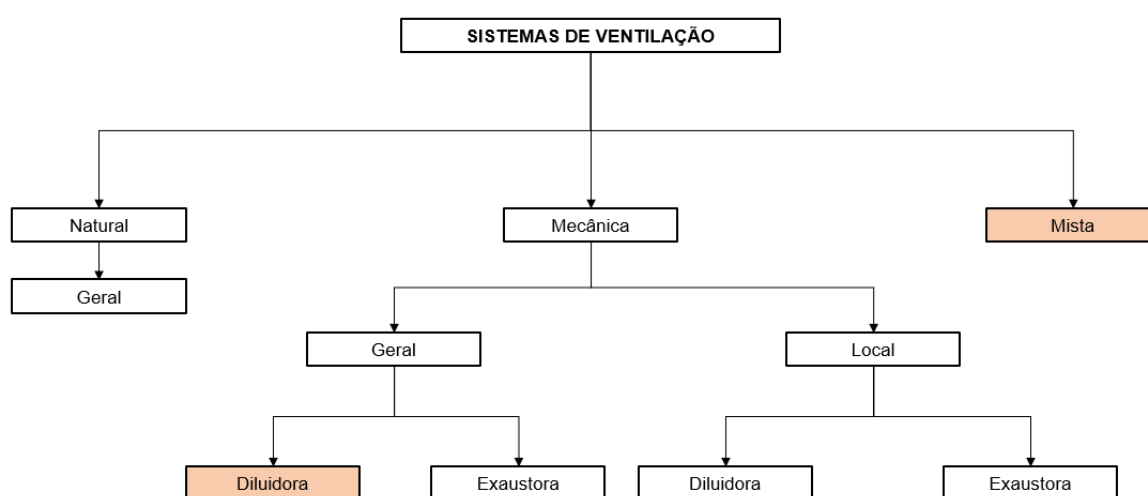
De maneira geral, ventilar significa deslocar o ar. Dessa forma, os sistemas de ventilação possuem como principal finalidade a retirada ou fornecimento de ar a um ambiente, proporcionando a renovação do ar no mesmo. Além de controlar as concentrações de certas substâncias, a ventilação ainda tem como resultado o controle de alguns parâmetros de conforto, como por exemplo a temperatura e a umidade no local (MACINTYRE, 1990).

Basicamente, os sistemas de ventilação são classificados entre sistemas naturais, mecânicos ou mistos. A ventilação natural utiliza energia natural para a promoção de correntes de ar. Já a ventilação mecânica emprega meios mecânicos para criar uma diferença de pressão e então gerar uma corrente de ar. Normalmente são utilizadas

máquinas como ventiladores, sopradores entre outras (BASTURK; DANCER; MCNALLY, 2021). Por fim, o sistema de ventilação misto utiliza processos naturais e mecânicos.

A Figura 2 mostra a classificação dos sistemas de ventilação normalmente praticada. No presente trabalho, discutiremos apenas o efeito da ventilação mista, devido ao funcionamento do ar-condicionado e abertura de portas e janelas, e da ventilação mecânica diluidora, quando a ventilação se dá exclusivamente pelos aparelhos de ar-condicionado (portas e janelas fechadas).

Figura 2: Classificação dos sistemas de ventilação



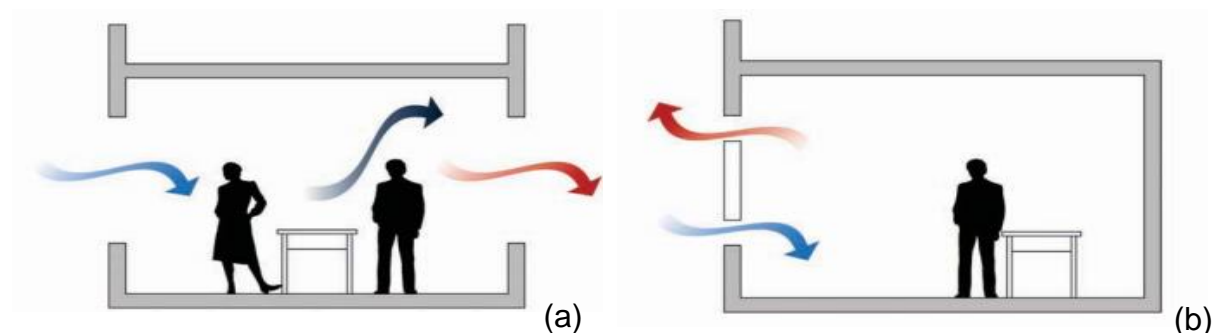
Fonte: O autor

A ventilação geral consiste na movimentação de grandes massas de ar através de espaços interiores a fim de melhorar as condições deste ambiente com um melhor controle da temperatura, da concentração de poluentes e ainda da umidade. Dessa forma, ela é capaz de reestabelecer as condições desejáveis que foram alteradas pela presença de atividade humana no ambiente (MACINTYRE, 1990), como a expulsão do CO₂ e fornecimento de oxigênio, remoção do excesso de calor, diluição de odores ou demais contaminantes que podem estar presentes (HSE, 2000).

Existem diferentes tipos de rotas para o escoamento do ar em ambientes internos com presença de aberturas. As duas principais são a ventilação cruzada (*cross ventilation*) e a ventilação de lado único (*single-sided ventilation*), que são dependentes do número de aberturas presentes no ambiente e a localização de cada. A ventilação cruzada ocorre quando há duas ou mais aberturas para o exterior, fazendo com que

o escoamento se dê de forma a atravessar o ambiente. Já a ventilação de lado único ocorre quando há apenas aberturas em uma única parede (BARRADAS, 2016). A Figura 3 exemplifica os tipos de ventilação natural citados.

Figura 3: Exemplificação dos tipos de ventilação natural (a) cruzada (b) lado único



Fonte: BSRIA, 2009

Em alguns casos, principalmente durante o inverno ou quando a concentração de poluentes no meio externo é alta, a ventilação natural pode não ser a melhor opção por não proporcionar as condições de conforto térmico necessárias ou por introduzir altas concentrações de poluentes no ambiente interior (BASTURK; DANCER; MCNALLY, 2021). Dessa forma, adota-se, em muitos casos, sistemas de ventilação mecânica com filtros, como por exemplo os sistemas AVAC (aquecimento, ventilação e ar-condicionado).

Os sistemas AVAC possuem um papel importante na sociedade atual. A não dependência dos fatores externos e a possibilidade de controlar o ambiente interno é considerado um marco para os sistemas mecânicos de construção, pois proporcionam conforto aos ocupantes bem como qualidade do ar no ambiente (SEYAM, 2018). Basicamente, esse sistema possui como principal objetivo alterar as condições do ar externo antes de enviá-lo ao ambiente interno.

A seleção do tipo de sistema a ser instalado depende basicamente de 3 fatores: das configurações da construção, as condições climáticas da região e a necessidade dos usuários do sistema (ASHRAE, 2016). Existem sistemas centralizados e descentralizados, que são diferenciados pelo local onde o equipamento primário está localizado. No caso de sistemas descentralizados, cada zona específica da edificação é condicionada separadamente, enquanto no centralizado, o condicionamento ocorre na unidade construtiva inteira no mesmo período (SEYAM, 2018).

De acordo com Shaughnessy *et al.* (2006), a ventilação inadequada foi apontada como um dos principais problemas construtivos identificados em diversas investigações relacionadas a má qualidade do ar interior. Vale ressaltar ainda que o próprio sistema de ventilação pode ser uma fonte de contaminação (MENDELL; SMITH, 1990). Por exemplo, em caso de baixa manutenção em aparelhos de ar-condicionado, pode haver a proliferação de contaminantes biológicos, como fungos e bactérias, nos dutos do sistema e na água da bandeja de condensação e conseqüentemente atingem o ambiente interno, oferecendo ameaça à saúde dos ocupantes (COSTA; COSTA, 2006).

A ventilação e a conseqüente renovação de ar em ambientes interiores são de extrema importância, especialmente em ambientes educacionais. As crianças, por exemplo, são mais suscetíveis aos efeitos de uma baixa qualidade do ar interior pois respiram um maior volume de ar em comparação ao peso corporal. Além disso, as vias aéreas são mais estreitas e os pulmões ainda estão em desenvolvimento (FERREIRA, 2014). Sendo assim, a ventilação para reduzir a concentração de poluentes na sala de aula apresenta notável importância.

De acordo com Mendell e Heath (2004), a qualidade do ambiente de sala de aula não influencia apenas na saúde e conforto dos estudantes. Há evidências que uma má ventilação e condições térmicas inadequadas em salas de aula podem promover o aumento do absenteísmo e o comprometimento do aprendizado dos alunos.

Em ambientes educacionais brasileiros, normalmente são verificados sistemas de ventilação mistos, com a presença de ventilação natural, entrada de ar pelas portas e janelas, e sistemas AVAC descentralizados, com a instalação de aparelhos de condicionamento de ar nas salas de aula.

3.1.4 Temperatura e velocidade do ar

A temperatura e a velocidade do vento são outros parâmetros que influenciam na percepção da qualidade do ambiente interior e estão associados ao conceito de conforto térmico. Este, por sua vez, pode ser definido como a condição em que a mente de uma pessoa expressa satisfação com o ambiente térmico.

Além desses dois fatores, existem outros fatores primários que influenciam no conforto térmico, por exemplo a taxa metabólica dos ocupantes, umidade relativa do ar, aquecimento proporcionado pelas roupas e temperatura radiante (ASHRAE, 2010).

Em sua dissertação, De Vecchi (2011) realizou um experimento visando investigar as condições de conforto térmico e aceitabilidade de velocidades do ar em salas de aula equipadas com ventiladores de teto. As variáveis de temperatura do ar e velocidade foram monitoradas constantemente e os ocupantes responderam formulários de aceitabilidade térmica. Os resultados indicaram que os ocupantes aceitaram ambientes com temperaturas entre 19 °C e 23 °C e que a velocidade do ar apresentou papel importante na aceitabilidade, visto que os cenários de inaceitabilidade ocorreram quando a velocidade do ar era mais baixa. Também foram observadas grandes divergências entre a aceitabilidade térmica dos ocupantes que haviam sido expostos previamente a ambientes climatizados.

Dessa forma, observa-se que o conceito de conforto térmico apresenta certa subjetividade, pois está atrelado às condições fisiológicas e psicológicas de cada pessoa. Em ambientes educacionais, como salas de aula, e em demais ambientes onde capacidades intelectuais altas são requeridas, esses parâmetros são especialmente relevantes visto que podem atuar como fatores de estresse ambiental, o que afeta, de forma reconhecida, o desempenho, capacidade de concentração e saúde mental dos ocupantes (KONSTANTINO *et al.*, 2022).

No Brasil, existem recomendações para os valores máximos de temperatura interna e velocidade do ar. A Resolução ANVISA nº 09, de 16 de janeiro de 2003 estabelece que a faixa recomendável de temperaturas para tais ambientes no verão deve estar entre 23°C e 26°C e no inverno, de 20°C a 22°C. Já quanto ao limite para a velocidade do vento, é determinado um valor máximo recomendável de 0,25 m/s a uma altura de 1,5 m do piso (ANVISA, 2003).

3.2 MODELAGEM CFD

A modelagem CFD (Dinâmica dos Fluidos Computacional, do inglês, *Computational Fluid Dynamics*) é uma técnica de simulação para prever campos espaciais e temporais (BEVILAQUA *et al.*, 2019) de uma problemática associada a escoamento de fluidos, transferência de calor ou demais fenômenos associados, como por exemplo reações químicas. Isso, por sua vez, é alcançado a partir de algoritmos

numéricos que solucionam as principais equações regentes da dinâmica dos fluidos, as equações de conservação (MALALASEKERA; VERSTEEG, 2007).

Conforme discutido anteriormente, apenas a partir da década de 1990 a modelagem CFD passou a ser amplamente difundida principalmente devido ao desenvolvimento das interfaces dos *softwares* e melhorias nas capacidades computacionais. Atualmente, essa técnica é considerada muito versátil e aplicável a uma grande variedade de situações em áreas industriais e não industriais, como a avaliação de ambientes internos para a caracterização da ventilação ou ainda para a análise da dinâmica de dispersão de poluentes.

Ainda, quando comparada a estudos experimentais, as modelagens podem trazer resultados mais precisos e representativos sobre a distribuição dos campos de velocidade e concentração dos fluidos, uma vez que analisam o domínio como um todo em vez de apenas áreas específicas e previamente selecionadas. Apesar disso, a análise CFD não substitui as análises experimentais e teóricas, mas sim constitui um importante complemento para tais estudos (LIU *et al.*, 2019).

Um código CFD é estruturado em torno de algoritmos numéricos. Os principais *softwares* comerciais disponíveis hoje no mercado possuem uma interface de modo a facilitar a caracterização do problema e a inserção dos dados iniciais da modelagem no programa. Os códigos, por sua vez, são divididos em etapas, contendo três elementos principais, o pré-processador, o solver e o pós-processador (MALALASEKERA; VERSTEEG, 2007).

Pré-processador

O pré-processador é a primeira etapa de uma modelagem CFD, consistindo, basicamente, na introdução dos parâmetros de um problema de escoamento no modelo. As principais atividades a serem realizadas são:

- Definição da geometria e da região de estudo para a criação de um domínio computacional;
- Geração da malha computacional, dividindo o domínio de estudo em pequenos volumes de controle que são chamadas de células;
- Identificação e seleção do fenômeno físico ou químico que governa o caso a ser estudado;
- Identificação das propriedades do fluido;

- Especificação das condições de contorno apropriadas para as células que fazem fronteira com o domínio.
- Definição do método de discretização que será utilizado e escolha do critério de convergência.

A etapa do pré-processamento é uma das mais delicadas e a que demanda maior tempo dos modeladores pois irá influenciar na acurácia do modelo e no tempo de modelagem necessário. A precisão da solução é determinada pelo número de elementos da malha. Normalmente, quanto maior a discretização do domínio, ou seja, quanto maior o número de células geradas na malha, melhor será a precisão da solução. Entretanto, aumentar demais o número de células pode levar a um grande aumento no tempo de simulação com ganho marginal baixo na precisão dos resultados. Dessa forma, a complexidade dessa etapa consiste justamente em encontrar uma quantidade de células de tal forma que otimize o tempo de simulação e resulte dados consistentes.

Solver

Após a definição dos parâmetros na etapa de pré-processamento, o solver irá transformar tais informações em códigos para então resolver as equações governantes por meio de métodos numéricos. De maneira geral, o algoritmo de resolução segue as seguintes etapas:

- Integrar as equações governantes de fluxo de fluido sobre todos os volumes de controle presentes no domínio;
- Converter as equações integrais resultantes em um sistema de equações algébricas;
- Solucionar as equações algébricas por meio de um método iterativo.

O método normalmente utilizado por *softwares* comerciais para a solução das equações algébricas é o Método dos Volumes Finitos (MVF).

Uma modelagem bem-sucedida é caracterizada a partir de dois aspectos principais: a convergência da solução e a independência da malha. A convergência da solução é considerada atingida quando os valores residuais entre uma iteração e outra são pequenos, normalmente da ordem 10^{-6} , indicando que as equações de conservação estão sendo atendidas. Quanto a independência da malha, essa condição é alcançada a partir de estudos de dependência da malha nos quais são realizados procedimentos

de refinamento sucessivos em uma malha grosseira até que se atinja uma determinada malha cujos resultados principais não são alterados, indicando a independência desta.

Pós-processador

Por fim, buscando visualizar e interpretar os resultados obtidos pelas etapas anteriores, chega-se à fase do pós-processamento. Nessa etapa, os resultados da modelagem serão tratados e avaliados por meio de uma interface gráfica que permite a visualização do domínio e as células da malha, campos vetoriais, linhas e planos sombreados, superfícies em 2D ou 3D, trajetória de partículas entre outros.

Os resultados obtidos devem ser analisados pelo engenheiro de forma a validar sua veracidade. Sendo assim, normalmente realiza-se comparações a estudos correlatos, medições experimentais que caracterizam o fenômeno que foi modelado, ou ainda, em casos mais restritos e menos aplicáveis, a resolução analítica do problema.

3.3 ESTUDOS CORRELATOS

A qualidade do ar interior é um tema de estudo que tem despertado muito interesse nos pesquisadores. Desde 1970, após os primeiros relatos de síndrome do edifício doente (SED), diversos estudos visando avaliar a qualidade do ar nesses ambientes, principalmente escritórios, foram desenvolvidos. A partir dessa década, essa temática ganhou força e atualmente esses tipos de estudos são amplamente realizados, envolvendo técnicas mais complexas e com melhor acurácia de medição.

Alguns outros estudos demonstraram também que crianças são mais suscetíveis à poluição do ar interior, principalmente por respirarem um volume muito grande em comparação ao seu peso corporal (FERREIRA, 2014). Diante disso, diversos estudos avaliando os impactos da poluição do ar em ambientes internos e os efeitos a saúde das crianças foram desenvolvidos, especialmente avaliando a qualidade do ambiente educacional onde estão inseridas.

Visando analisar a qualidade do ar interior em escolas municipais de ensino fundamental na cidade de Vitória - ES, Velasco (2020) avaliou concentrações de material particulado, dióxido de nitrogênio e fungos em diferentes ambientes interiores escolares, sendo que estes envolviam salas de aula, laboratórios de informática,

biblioteca e refeitórios. O estudo ocorreu em duas escolas, com monitoramento durante quatro semanas na primavera.

A partir da análise dos resultados, Velasco (2020) concluiu que as escolas monitoradas não apresentaram problemas agudos relacionados a qualidade do ar interior, visto que as concentrações de NO₂ e fungos não ultrapassaram padrões e diretrizes organismos internacionais, como a OMS por exemplo. Contudo, observou-se concentrações de material particulado (particularmente PM₁₀ e PM_{2,5}) em alguns ambientes mais elevados do que diretrizes da OMS e CONAMA, bem como demais legislações internacionais.

Como foram realizados ensaios de especificação química nas amostras de material particulado, notou-se uma maior participação de elementos como Cloro e Cálcio, podendo ser atribuídos principalmente ao sal marinho característico da cidade além das atividades antropogênicas, notavelmente as atividades de siderurgia que são presentes em larga escala nas regiões próximas. A presença desses elementos, em especial na fração PM_{2,5}, apresentam grande importância sanitária visto sua alta penetrabilidade no trato respiratório bem como uma maior capacidade inflamatória.

Por fim, a autora considera importante a realização de estudos complementares para monitorar temperatura, umidade, velocidade e taxa de renovação de ar nos ambientes avaliados, bem como abordá-lo em uma perspectiva transdisciplinar a fim de avaliar os efeitos da qualidade do ar e as condições de conforto sobre o desempenho e a assiduidade dos estudantes.

Outro estudo experimental, agora realizado em escolas de ensino fundamental em Coimbra, Portugal é o desenvolvido por Ferreira e Cardoso (2013). O principal objetivo deste era analisar a qualidade do ar interior em escolas de ensino básico e realizar uma correlação com as condições estruturais e funcionais das mesmas. Dessa forma, foram observadas 51 escolas, compreendendo 81 ambientes monitorados. Foram realizadas medições de concentração de monóxido de carbono, dióxido de carbono, ozônio, dióxido de nitrogênio, dióxido de enxofre, compostos orgânicos voláteis, formaldeído e material particulado (PM₁₀). Além disso, parâmetros como temperatura e umidade relativa também foram monitorados. As intervenções ocorreram durante um ano, abrangendo as características de qualidade do ar interior dentre as quatro estações.

Foi observado pelos autores que 92% das escolas apresentaram concentrações de CO₂ acima do estabelecido pela CMR (concentração máxima de referência), que é de 984 ppm, chegando à concentração máxima de 5.320 ppm em uma das escolas. Esse cenário, por sua vez, é preocupante porque indica uma baixa taxa de renovação de ar no interior das salas. Os demais poluentes monitorados apresentaram valores inferiores aos respectivos limites estabelecidos pela CMR. Quanto as condições de temperatura, no outono/inverno, todas as escolas apresentaram temperaturas acima do valor limite de referência estabelecido no decreto DL n° 80/2006, que é de 20°C. Já nas estações primavera/verão, as temperaturas aferidas se mantiveram abaixo dos 25°C (limite estabelecido pelo mesmo decreto citado anteriormente) na maior parte das escolas.

Dessa forma, Ferreira e Cardoso (2013) concluíram que as concentrações de poluentes no ar interior das escolas analisadas são superiores aos observados em ambientes externos, o que indica a importância das fontes internas de emissão. Além disso, ressaltam que, a exposição a uma má qualidade do ar durante curtos períodos pode levar a incômodos e redução da atenção bem como da capacidade de aprendizagem, mas a exposição a longo termo pode ocasionar danos à saúde, como doenças respiratórias ou alergias.

Alguns outros estudos experimentais para a caracterização do ar interior em ambientes educacionais, tanto de ensino fundamental ou acadêmico, foram realizados, como aquele desenvolvido por Santos (2017), Fakhoury (2017), Ferreira (2014) e Nascimento (2008).

Apesar de muito relevante, a quantidade de estudos que abordam especificamente a qualidade do ar interior em ambientes educacionais ainda são menos frequentes quando comparado aos demais ambientes interiores (VELASCO, 2020). Normalmente estudos experimentais *in-situ* são mais empregados uma vez que facilitam a comparação dos resultados com os padrões de qualidade do ar (VENTURINI., 2020).

A avaliação da qualidade do ambiente interior empregando métodos numéricos pode ser satisfatória uma vez que reduz os gastos com a realização de experimentos de campo, além de proporcionar uma análise rápida sobre diferentes cenários, sendo satisfatória principalmente em situações em que o projeto ainda não foi implementado. Vale ressaltar que a inclusão de conceitos bioclimáticos a projetos arquitetônicos traz

benefícios notórios, levando a economia de energia e uma menor demanda por sistemas de ventilação mecânicos (BEVILAQUA *et al.*, 2019).

Apesar disso, diante da revisão bibliográfica realizada, observou-se uma lacuna quanto a realização de estudos de modelagem CFD especialmente para a avaliação de ambientes educacionais.

O estudo desenvolvido por Song e Meng (2015) buscou avaliar a performance dos sistemas de ventilação presentes em universidades chinesas. Adotou-se uma sala de aula com geometria típica, localizada na Tianjin Polytechnic University, e estudou-se quatro tipos diferentes de sistemas de ventilação. Os quatro casos analisados envolveram a ventilação natural (uma ou duas fileiras de janelas abertas) e sistemas de ventilação mistos (janelas abertas com associação de ventiladores de exaustão ou ventiladores de teto).

Foram observados o campo de temperaturas e o campo de velocidades para cada situação. Além disso, também foram realizadas investigações por meio da aplicação de questionários aos ocupantes da sala selecionada.

Os autores concluíram que a ventilação natural proporcionada por fileiras duplas de janelas pode auxiliar o alcance de situações de conforto térmico. Além disso, a utilização de ventiladores de teto e ventiladores de exaustão também é satisfatória, sendo o primeiro o caso com mais benefícios associados.

Comparado os cenários obtidos de campos de temperatura e velocidade para os casos de ventilação natural com duas fileiras de janelas abertas e os casos de ventilação mista com duas fileiras de janelas abertas e presença de ventiladores de exaustão ou ventiladores de teto, é possível notar uma pequena diferença no campo de temperaturas entre os três casos, mas diferenças significativas quanto a velocidade do ar nas salas. No caso do ventilador de teto, o campo de velocidades permanece próximo a uniforme, não havendo grandes diferenças de velocidade do ar para diferentes pontos na sala. Já para os ventiladores de exaustão, houve uma pequena alteração quando comparado ao caso de ventilação natural, aumentando um pouco a velocidade média. Apesar disso, todos os casos proporcionaram velocidades do ar dentro do limite esperado para as condições de conforto.

Por fim, os autores ainda apontaram boa correlação dos casos simulados com os resultados das investigações realizadas com os alunos. Em áreas das salas de aula

em que os estudantes relataram estarem bem e com facilidade de concentração, são predominantemente às áreas onde a ventilação é melhor. O mesmo não ocorre para as áreas onde a ventilação é ineficiente. Nessas, os alunos relataram maior dificuldade de concentração além de casos de congestão torácica.

Buscando avaliar a qualidade do ar interior e os parâmetros de conforto em escolas da Lituânia, bem como realizar uma análise do sistema de ventilação por meio de modelagem CFD, Jurelionis e Seduikyte (2008) desenvolveram um estudo experimental e computacional para embasar a proposição de um método mais adequado de ventilação para salas de aula típicas encontradas na região.

Quanto ao estudo experimental, dois métodos foram aplicados para a avaliação do microclima das salas de aula analisadas, sendo eles o método objetivo, com a medição direta dos parâmetros temperatura, umidade relativa e concentração de CO₂, e o método subjetivo, por meio da aplicação de questionários.

As medições diretas demonstraram que a maior parte das salas de aula investigadas (64%) apresentaram temperaturas inferiores a 22°C, limite requerido por padrões europeus. Já quanto a umidade relativa, a maioria das salas (58%) estavam de acordo com os limites recomendados pelos Códigos lituanos, entre 30% e 70%. Analisando os questionários, os autores verificaram que os principais sintomas relatados eram cansaço e pele seca. Por sua vez, esses podem ser associados à má qualidade do ar e locais não ventilados.

Em relação ao modelo numérico, foram modelados quatro casos envolvendo ventilação natural e ventilação mista. Foi levado em consideração ainda a taxa de transferência de calor entre os ocupantes e o meio, e as condições de contorno para as entradas de ar foram estabelecidas com a vazão volumétrica mínima necessária estabelecida pelo padrão lituano, que é de 6 L/s/pessoa. A comparação entre as eficiências dos sistemas foi realizada por meio do *Air Distribution Index* (ADI). Valores maiores de ADI indicam uma melhor distribuição de ar no ambiente analisado. Os resultados indicaram que os sistemas de ventilação mista apresentam melhores resultados de remoção térmica e remoção de poluentes.

Outros estudos também utilizaram a abordagem de CFD para avaliação da qualidade de ambientes interiores diferentes dos educacionais. Um exemplo é o estudo conduzido por Yang, Ye e He (2014), que avaliou o campo de velocidades,

temperaturas e idade do ar (reflete a eficiência de renovação do ar em um ambiente) em um quarto com ventilação conduzida por um ar-condicionado de parede durante a estação de verão em uma cidade de Shanghai. O ar-condicionado era localizado na parte superior do quarto com fluxo principal ocorrendo no meio do domínio.

Quanto aos resultados de conforto térmico, estes mostraram que o ar-condicionado instalado no quarto era eficiente para promover um conforto térmico, entretanto, a velocidade do ar era moderada e as correntes não poderiam ser sentidas em diferentes regiões do domínio, implicando em um leve desconforto. Já quanto aos resultados de tempo de residência, foi observado que nas regiões centrais do quarto a idade do ar era menor enquanto nas regiões mais à direita do domínio, a idade do ar era maior.

Um ponto importante apontado pelos autores foi quanto ao posicionamento da cama. Os ocupantes do quarto, enquanto dormiam, estavam localizados em áreas em que o ar apresentou maior idade, indicando maior exposição dos ocupantes a áreas de menor circulação de ar e conseqüente acúmulo de poluentes.

Já o estudo desenvolvido por Panagopoulos *et al.* (2011) avalia a distribuição de poluentes (COVs e formaldeído) em um apartamento por meio de modelagem CFD. O ambiente modelado corresponde às áreas de cozinha e sala de jantar, ambas conectadas devido ao conceito aberto do ambiente. O estudo foi realizado dentro do escopo de um Plano de Gestão de Poluição Interior e avaliou tais ambientes pois atividades de cocção, principalmente aquelas que utilizam como combustível gás butano, são consideradas uma das principais fontes de poluentes e material particulado em ambientes interiores.

Foram avaliadas três situações distintas de ventilação, variando-se a posição das entradas de ar e a velocidade de entrada do ar (cenário 1 com entrada pela janela e cenários 2 e 3 com entradas em pequenas aberturas em locais distintos). Observando os resultados, os autores concluíram que a situação em que melhor ocorreu a remoção dos poluentes emitidos foi no cenário 1, com a entrada de ar pela janela. Os demais cenários apresentaram performance inferior uma vez que há a criação de vórtices devido aos jatos criados nas aberturas.

Além desses estudos, há diversos outros que também buscam avaliar a qualidade do ambiente interior, como aquele desenvolvido por Chen, Xin e Liu (2020) que avaliou a

dinâmica de dispersão de partículas e campo de concentrações de partículas e temperaturas resultantes de atividades de cocção, aquele desenvolvido por Agarwal *et al.* (2019), que estudou os efeitos da taxa de ventilação na distribuição de radônio numa sala teste ou ainda o desenvolvido por Zhao *et al.* (2022), que analisou a qualidade da ventilação em um terminal de embarque aeroportuário.

Ainda, com a evolução da pandemia do COVID-19, os modelos em CFD também foram muitas vezes utilizados para avaliar o risco de infecção de ocupantes de um local fechado com a presença de uma pessoa contaminada, como aqueles desenvolvidos por Motamedi *et al.* (2022), que avaliam o risco em uma sala de aula, Mirzaie *et al.* (2021), que avaliam o risco em uma sala típica de um ambiente de trabalho e Alrebi *et al.* (2022), que avaliou a influência do escoamento na dispersão dos patógenos em um pronto-socorro.

Além desses, o estudo desenvolvido por Mohamadi e Fazeli (2022) reúne diversos outros estudos em que foram utilizadas a abordagem CFD para avaliação da dispersão dos vírus do COVID-19 no ar, entendimento do formato e alcance das plumas geradas por espirros ou tosse, verificação da influência do *layout* dos ambientes na dispersão e probabilidade de contaminação dos ocupantes entre outros.

Além dessas aplicações, essa ferramenta pode ser útil também para a avaliação de riscos ocupacionais, como realizado no estudo desenvolvido por Siddiqui, Jayanti e Swaminathan (2012), que avaliaram a dispersão da amônia proveniente de um pequeno vazamento em um galpão e Li *et al.* (2016), que avaliou a dispersão de um vazamento de gás natural na praça de máquinas de um navio. Os dois estudos buscavam determinar as melhores posições para detectores de gases e as possíveis respostas emergenciais para mitigar a exposição ocupacional e riscos adicionais.

Dessa forma, é possível verificar a relevância da aplicação de análises CFD para a avaliação da qualidade do ambiente interno, principalmente observando a concentração de poluentes e qualidade da ventilação. Sendo assim, essa ferramenta se faz útil para a fase de projeto do ambiente bem como para o estabelecimento de ações para ambientes já existentes de forma a garantir a prevenção de impactos adversos no ambiente físico e proteger a saúde humana.

O Quadro 3 apresenta um resumo com as principais características dos estudos citados neste capítulo.

Quadro 3: Características principais dos estudos envolvendo modelagens CFD citados no capítulo

#	Referência	Aplicação	Principal problema de CFD e geometria	Principais conclusões	Software utilizado	Tipo de escoamento modelo de turbulência
1	Jurelionis e Seduikyte, 2008	Efetividade das estratégias de ventilação de uma sala de aula	Avaliação da temperatura e velocidade do ar em uma sala de aula (9 x 6,2 x 3 m) para 4 estratégias de ventilação.	Boa correlação entre o experimento e o modelo CFD. A ventilação natural apresenta limitações quando a temperatura exterior está abaixo de 0°C (desconforto térmico); O caso que apresentou melhor resultado foi aquele em que a ventilação se dava pela injeção do ar em baixa velocidade na sala por aberturas na parede e exaurido na parede oposta na parte superior.	-	Turbulento modelo k-e
2	Panagopoulos <i>et al.</i> , 2011	Qualidade do ar em ambiente residencial	Concentração e dinâmica de dispersão de COVs e Formaldeído provenientes de atividades de cocção em um apartamento residencial sob diferentes condições de ventilação.	CFD é uma ferramenta útil para melhorar o design de ambientes interiores visto que as velocidades e concentração de contaminantes obtidas foram fisicamente realísticas. A localização do inlet é crítica e pode evitar com que zonas de recirculação ou “zonas quentes” surjam no ambiente.	PHOENICS	Turbulento modelo k-e
3	Siddiqui, Jayanti e Swaminathan, 2012	Análise da dispersão de gás tóxico para estudo de risco	Avaliação da concentração e tempo de residência de partículas de cloro em um galpão industrial (32 x 16x 8m) após vazamento acidental de pequena vazão	A modelagem CFD é útil para avaliação de cenários acidentais e facilita a compreensão do problema. Por ser um gás denso, a pluma se espalha inicialmente na parte inferior do galpão e sobre lentamente, sendo necessário a instalação de detectores em locais mais próximos ao chão.	Ansys Fluent	Turbulento Modelo k-e
4	Yang <i>et al.</i> , 2014	Qualidade do ar em ambiente residencial	Avaliação da velocidade do ar, temperatura e tempo de residência em um quarto com ar-condicionado de janela durante o verão	A presença do ar-condicionado consegue manter o ambiente em condições adequadas para o conforto térmico (tanto em temperatura quanto em velocidade do vento); Grande tempo de residência do ar, principalmente nas regiões mais próximas ao chão, onde por exemplo, se localiza a cabeça do indivíduo enquanto dorme.	Airpack	Turbulento modelo k-e

#	Referência	Aplicação	Principal problema de CFD e geometria	Principais conclusões	Software utilizado	Tipo de escoamento modelo de turbulência
5	Song e Meng, 2015	Efetividade das estratégias de ventilação de uma sala de aula	Avaliação da temperatura e velocidade do ar em uma sala de aula (11 x 9 x 4 m) com duas fileiras de 5 janelas (0,2 x 1,4 m) para 4 estratégias de ventilação.	Boa correlação dos casos simulados e das investigações por meio de formulários; Os ocupantes da sala reportaram se sentirem mais confortáveis em regiões que a ventilação era melhor.	Ansys Fluent	Turbulento modelo k-e
6	Li <i>et al</i> , 2016	Análise da dispersão de gás inflamável para estudo de risco	Avaliação da dispersão de vazamento de gás natural na praça de máquinas (8,4 m 11,8 x 3,5 m) de um navio	A modelagem CFD é útil para simular diferentes casos de acidentes com vazamento de gases em espaços confinados. A dispersão do gás depende da posição e direção do vazamento, do gradiente de temperaturas, taxa de ventilação aplicada e maquinário presente. A pluma tende, normalmente, a se acumular na parte superior do ambiente.	CFX	Turbulento Modelo K-omega SST
7	Agarwal <i>et al</i> , 2019	Qualidade do ar em uma sala teste	Avaliação da concentração de radônio em uma sala teste (1,5 x 2,8 x 1,8 m) sob diferentes taxas de ventilação	O aumento da taxa de ventilação causa um aumento da turbulência e consequente mistura do gás no interior da sala; Há uma redução da concentração do gás a medida em que se afasta das paredes (fontes de emissão), ligado principalmente ao baixo tempo de meia vida; Os resultados de concentração obtidos pelo CFD concordam razoavelmente com os resultados experimentais.	Fluidyn MP	Escoamento permanente e posterior implementação dos efeitos turbulentos (modelo k-e)
8	Chen <i>et al.</i> , 2020	Qualidade do ar e conforto térmico em ambiente residencial	Concentração de partículas e campo de temperaturas durante atividades de cocção numa cozinha (4,2 x 2,4 x 2,6 m) com presença de coifa (0,89 x 0,4 x 0,39 m) cuja taxa de exaustão é de 8 m ³ /min.	O aumento da taxa de exaustão pelas coifas proporciona uma redução da concentração de fumos nas regiões próximas ao nariz e a boca e podem aumentar o conforto térmico da pessoa que está cozinhando.	Ansys Fluent	Turbulento modelo k-e standart

#	Referência	Aplicação	Principal problema de CFD e geometria	Principais conclusões	Software utilizado	Tipo de escoamento modelo de turbulência
9	Mirzaie <i>et al.</i> , 2021	Transmissão do Covid-19 em uma sala de aula	Distribuição tempo-espacial dos patógenos em uma sala de aula (8 x 6 x 2 m) sob diferentes estratégias de ventilação, considerando como fonte transmissora um indivíduo contaminado em pé na frente da sala e avaliação da eficácia de proteção por meio da instalação de barreiras transparentes individuais na frente dos assentos.	A utilização de barreiras físicas é capaz de prevenir a contaminação até certo ponto, visto que o aumento da velocidade de escoamento leva a um aumento da velocidade das partículas, reduzindo a eficácia de bloqueio das barreiras; A concentração de gotículas contaminadas diminui com o tempo para todas as estratégias de ventilação, sendo que quando menor a ventilação, maior é a concentração de gotículas.	Ansys Fluent	Turbulento RNG Modelo k-e
10	Motamedi <i>et al.</i> , 2022	Transmissão do Covid-19 em ambientes internos	Distribuição tempo-espacial dos patógenos em uma sala (4 x 4 x 3,2 m) com 1 ocupante infectado e 2 saudáveis e 4 diferentes estratégias de ventilação (cruzada, lado único, sem ventilação e ventilação mecânica)	O estudo dos padrões do escoamento por meio de CFD contribui para a determinação do potencial de contaminação via aérea em um ambiente fechado, visto que esse apresenta considerável efeito na diluição e dispersão dos patógenos; O caso em que foi aplicada a ventilação de lado único é aquele que apresentou maior risco de infecção dos demais ocupantes presentes na sala. Juntamente com o caso sem ventilação, estes foram as estratégias que resultaram na maior dispersão dos patógenos pela sala.	Ansys Fluent	Turbulento RLZ Modelo k-e
11	Alrebi <i>et al.</i> , 2022	Transmissão do Covid-19 em ambientes internos	Avaliação do escoamento do ar em um pronto-socorro (740 m ²) como base para análise da dispersão do Covid-19,	Regiões onde há uma maior velocidade do ar e níveis de turbulência mais altos podem aumentar o risco de transmissão da doença para as regiões vizinhas, sendo recomendado a separação dessas áreas por meio de porta ou repartições. Concluiu-se também que a localização das entradas/saídas de ar dos ambientes e o design dos corredores é crucial para evitar a criação de rotas preferenciais e consequente acúmulo dos patógenos.	CFX	Turbulento Modelo k-e

#	Referência	Aplicação	Principal problema de CFD e geometria	Principais conclusões	Software utilizado	Tipo de escoamento modelo de turbulência
12	Zhao <i>et al.</i> , 2022	Qualidade do ambiente interno em aeroportos	Avaliação da eficiência de ventilação em uma sala de embarque (25 x 24 e 20 m) baseado na observação da distribuição de temperaturas, velocidade do vento, poluentes chave (CO ₂ e partículas) entre outros.	A zona cuja ocupação de passageiros é maior apresentou maior temperatura e concentrações de CO ₂ mais elevadas quando comparada as demais áreas da sala de embarque; quando avaliado qualidade ambiental, a melhor estratégia de ventilação é aquela com entrada de ar na parte superior e saída de ar na parte inferior, sendo estes opostos; quando avaliado redução da exposição a partículas, a melhor estratégia de ventilação é aquela em que a entrada e saída de ar estão localizadas do mesmo lado, sendo a primeira na parte superior e a outra na parte inferior.	STAR-CCM+	Turbulento RLZ Modelo k-ε

3.4 QUADRO REGULATÓRIO DA QUALIDADE DO AR INTERIOR

A partir da década de 1970, quando estudos relacionando uma má qualidade do ar interior a efeitos sobre a saúde humana começaram a ser publicados, houve uma crescente preocupação das organizações governamentais em limitar a exposição dos ocupantes dos ambientes a certas condições. Dessa forma, foram elaborados diretrizes e valores-padrões a fim de alcançar uma qualidade do ar interior de forma que não prejudicasse a saúde e desempenho dos ocupantes (ABDUL-WAHAB *et al.*, 2015).

Apesar de se tratar de um domínio com notória importância, as legislações nacionais e internacionais ainda não são bem definidas para a qualidade do ar interior, como já se é observado para a qualidade do ar ambiente. Há uma grande variação entre os poluentes/parâmetros observados em diferentes países bem como ainda existem países que não possuem padrões nacionais ou diretrizes (PAGEL, 2015).

No Brasil, a preocupação com o tema QAI iniciou apenas em 1995, quando foi criada a Sociedade Brasileira de Meio Ambiente e Controle de Qualidade de Ar Interiores (BRASINDOOR). Essa sociedade surgiu inicialmente para intensificar a troca de informações entre pesquisadores da área e incentivar a realização de novas pesquisas. Atualmente, ela possui um programa de certificação de qualidade, o “Selo da Qualidade BRASINDOOR”, que estabelece três categorias de certificação (produtos, serviços e ambientes), podendo ser concedido para qualquer ambiente que atenda integralmente as diretrizes para qualidade de ar interiores estabelecidas pela ANVISA (BRASINDOOR, 2021).

Em 1998, devido ao falecimento do então Ministro das Comunicações causado pela redução de sua capacidade respiratória (VARELLA, 1997) e agravamento do caso devido a presença de fungos instalados no sistema de climatização, iniciou-se uma mobilização em torno do assunto, sendo publicada, em 2000, a Resolução nº 176 da ANVISA. Essa resolução define Orientações Técnicas sobre Padrões Referenciais de Qualidade do Ar Interior em ambientes climatizados artificialmente de uso público e coletivo, estabelecendo valores máximos recomendáveis para contaminação biológica, química e física (ANVISA, 2000).

Em 2003, devido a necessidade de atualização da Resolução supracitada, a ANVISA emitiu a Resolução nº 9. Esta, por sua vez, também estabelece sobre as diretrizes de

qualidade do ar interior, entretanto, incorpora novas informações sobre o conhecimento e a experiência adquirida nos dois primeiros anos de vigência da Resolução nº 176/00, além de atualizá-la frente a realidade de conhecimento do país (ANVISA, 2003). Essa resolução é a vigente atualmente e os valores máximos recomendáveis são exibidos na Tabela 1.

Tabela 1: Valores máximos recomendáveis de diversos parâmetros físicos, químicos e biológicos estabelecidos na Resolução ANVISA nº 09/03

Parâmetro	Valor
Contaminação microbiológica	750 ufc/m ³
Dióxido de carbono	1000 ppm
Aerodispersóides *	80 µg/m ³
Temperatura no Verão	23.3 °C - 26.0 °C
Temperatura no Inverno	20.0 °C - 22.0 °C
Umidade relativa no Verão	40% - 65%
Umidade relativa no Inverno	35% - 65%
Velocidade do ar	0.25 m/s
Taxa de renovação de Ar	27 m ³ /h/pessoa

Legenda: (*) sistema disperso, em um meio gasoso, composto de partículas sólidas e/ou líquidas. O mesmo que aerossol ou aerosol.

Fonte: ANVISA, 2003

A Organização Mundial da Saúde publicou, em 1987, as primeiras diretrizes para qualidade do ar interior a serem aplicadas a ambientes não industriais. A sua última atualização foi realizada em 2010 e estabelece concentrações máximas recomendáveis para diversas substâncias químicas (benzeno, monóxido de carbono, formaldeído, naftaleno, dióxido de nitrogênio, hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (PAH) – especialmente o benzeno[a]pireno, radônio, tricloroetileno e tetracloroetileno) que são frequentemente observados em ambientes interiores, inclusive em concentrações que são preocupantes à saúde humana (WHO, 2010).

Esse documento, em geral, apresenta uma descrição das fontes de emissão internas do poluente em questão, bem como a relação de sua concentração no ambiente interior com os níveis de concentração encontrados no ambiente externo. Além disso, apresentam ainda como o poluente se comporta no corpo humano (cinética reacional e metabolismo) para enfim abordar os efeitos que podem ser gerados, uma avaliação do risco potencial e apresentação dos valores máximos recomendáveis.

Ainda, de acordo com a OMS, se as diretrizes foram aplicadas de forma sensata como parte integrante de uma política de desenvolvimento, a exposição a poluentes internos irá decrescer, reduzindo também os efeitos adversos à saúde.

Além das diretrizes da OMS, a União Europeia incentiva as autoridades dos países membros a adotar uma metodologia exaustiva e global quanto a poluição do ar, principalmente a poluição do ar interior. A Resolução 2018/2792 do Parlamento Europeu, de 13 de março de 2019, ressalta a importância da manutenção de uma boa qualidade do ar interior e solicita o desenvolvimento de normas de teste para a medição da poluição do ar em ambientes internos, bem como insta os estados-membros e a Comissão a adotar e implementar medidas para combater a poluição na fonte (levando em consideração as diferenças entre as fontes de poluição presentes no meio interno e externo) (PARLAMENTO EUROPEU, 2019).

Essa resolução estabelece também a obrigatoriedade da certificação da qualidade do ar interior a todos os edifícios novos ou renovados da União Europeia, levando em conta os indicadores de desempenho e os métodos de medição baseados na EN 16798-1¹ e nos valores do guia de qualidade do ar interior da OMS.

Antes mesmo dessa Resolução, diversos países europeus já haviam tomado algumas decisões ou possuíam normas/diretrizes para a melhoria contínua da qualidade do ar interior, entre eles França, Portugal e Alemanha.

Na França, a ANSES (Agência Nacional de Segurança Sanitária da Alimentação, do Meio Ambiente e do Trabalho), vem trabalhando desde 2004 para a elaboração de valores guias de qualidade do ar interior (VGAI). Esses são definidos como concentrações de poluentes abaixo das quais não causam efeito à saúde humana, e que foram determinados de acordo com os conhecimentos atuais e observando exclusivamente critérios sanitários (ANSES, 2021).

Em 2010, um grande passo para a redução dos impactos da qualidade do ar interior sobre população sensível foi estabelecido pela França. A lei nº 2010-788, de 12 de julho de 2010, tornou obrigatório o monitoramento da qualidade do ar interior em estabelecimentos que recebem públicos sensíveis (ERP), como os estabelecimentos que acolhem crianças menores de 6 anos, os centros de lazer e os estabelecimentos de ensino ou formação profissional (escolas maternas, elementares e colégios) (FRANÇA, 2010).

¹ Norma europeia que estabelece os parâmetros de entrada do ambiente interno para projeto e avaliação do desempenho energético de edifícios abordando a qualidade do ar interior, ambiente térmico, iluminação e acústica.

Estabeleceu-se apenas o monitoramento de parâmetros químicos, sendo eles a concentração de formaldeído, benzeno, tetracloroetileno e dióxido de carbono, este sendo determinado pelo nível de confinamento do ambiente². Os valores máximos são dispostos na Tabela 2.

Tabela 2: Valores limites para as substâncias passíveis de monitoramento de acordo com a Lei francesa n° 2010-788

Substância	Valor limite
Formaldeído	100 µg/m ³
Benzeno	10 µg/m ³
Tetracloroetileno	1250 µg/m ³
Dióxido de carbono	Índice de confinamento de nível 5

Fonte: Ministère de la Transition Écologique et Solidaire; Ministère des Solidarités et de la Santé, 2010

Em 2013, o Ministério do Meio Ambiente francês, em conjunto com o Ministério da Saúde, lançou um plano de ação para o melhoramento da qualidade do ar interior. Esse plano incluía ações como a publicação de valores guias para a qualidade do ar interior, início do monitoramento da qualidade do ar interior em estabelecimentos que recebem grande público (notadamente creches e escolas) e ainda a redução da exposição da população as principais fontes encontradas no ambiente interno (produtos odorantes como incensos, velas, difusores entre outros) trabalhando principalmente com a difusão de informações e a etiquetagem desses produtos (MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT; MINISTÈRE DE LA SANTÉ, 2013).

Já em Portugal, foi criado em 2006 por meio do Decreto-lei n° 78/2006, o Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior nos Edifícios. Este surgiu com o objetivo de melhorar o desempenho energético e ambiental dos edifícios (PORTUGAL, 2006). Quando entrou em vigor, os edifícios que estavam sendo construídos ou que passavam por obras significativas de renovação iniciaram um processo para obtenção de certificado energético, sendo este emitido após auditorias para avaliação do cumprimento dos requisitos técnicos, sendo que um desses requisitos é relacionado a qualidade do ar interior. Nesse contexto, são estabelecidas concentrações máximas de referência para parâmetros físico-químicos e biológicos (CERTIFICAÇÃO ENERGÉTICA, 2021; SCE, 2009).

² Determinado de acordo com a metodologia do CSTB (*Centre Scientifique et Technique du Batimënt* - Centro Científico e Técnico do Edifício).

Na Alemanha, o primeiro documento que estabelecia valores máximos recomendáveis para alguns parâmetros foi publicado em 1996. Desde então, este documento vem sendo atualizado para a inserção de novas substâncias e a revisão dos valores limites.

Atualmente, os limites são diferidos entre dois níveis para fins de avaliação dos riscos potenciais à saúde humana, sendo eles os valores de precaução (categoria II) e os valores de perigo (categoria I). Além disso, são estabelecidos também valores máximos de higiene, que são determinados quando experiências práticas demonstram um aumento simultâneo da probabilidade de reclamações/efeitos adversos à saúde com as concentrações de um poluente presente no ar interno. Entretanto, para estes, ainda não é possível estabelecer um valor guia com base toxicológica, uma vez que o estado de conhecimento ainda não é suficiente (UMWEL BUNDESAMT, 2021).

Já na América do Norte, mais especificamente no Canadá, existem diretrizes para a qualidade do ar interior aplicáveis à espaços residenciais, sendo que estas foram determinadas a partir do conhecimento científico dos efeitos potenciais à saúde humana que determinados poluentes podem exercer. Esses limites são determinados para longa exposição e para curta exposição (HEALTH CANADA, 2022).

Recentemente, visando complementá-las, o Canadá desenvolveu valores de triagem, chamados Níveis de Referência do Ar Interior (IARLs), para diversos COVs que são potencialmente encontrados em ambientes interiores. Esses foram determinados a partir de uma avaliação de estudos conduzidos por outras instituições internacionais reconhecidas, sendo selecionado apenas os níveis de referência mais relevantes obtidos pelas organizações observadas (HEALTH CANADA, 2018).

Nos Estados Unidos não há limites estabelecidos especificamente para QAI apesar de reconhecerem a temática através de diversas publicações e programas que são desenvolvidos. Dessa forma, a USEPA (Agência de Proteção Ambiental Americana) aplica o Padrão Nacional da Qualidade do Ar Ambiente (NAAQS) para a verificação dos níveis de contaminação interna (EPA, 2012).

A EPA possui um programa de ferramentas para IQA em escolas. Esse programa, alavancado durante a retomada das atividades pós pandemia do Corona Vírus, auxilia as partes interessadas a alcançar ambientes saudáveis para aprender e trabalhar. Dessa forma, ele traz algumas estratégias que podem ser tomadas para manter

ambientes internos saudáveis, sendo o principal deles o estabelecimento de um programa de gestão de QAI e a realização de manutenções preventivas/de rotina nos sistemas de ar-condicionado (EPA, 2014).

Na Tabela 3 são comparados os valores limites de concentração de poluentes estabelecidos por cada país discutido anteriormente bem como as diretrizes mundiais da OMS.

Tabela 3: Principais padrões de qualidade do ar interior

Poluente	BRASIL (a)	FRANÇA (b)	PORTUGAL (c)	ALEMANHA (d)	EUA (e)	CANADA (f)	WHO (g)
CO		10 mg/m ³ (8 hrs) 30 mg/m ³ (1 hr) 60 mg/m ³ (30 min) 100 mg/m ³ (15 min)	10.7 ppm	7 mg/m ³ (24 hrs) 10 mg/m ³ (8 hrs) 35 mg/m ³ (1 hr) 100 mg/m ³ (15 min)	9 ppm (8 hrs) 35 ppm (1 hr)	11.5 mg/m ³ (24 hrs) 28.6 mg/m ³ (1 hr)	10 ppm (8 horas) 25 ppm (1 hora) 50 ppm (30 min) 90 ppm (15 min)
CO ₂	1.000 ppm	Índice de confinamento < 5	984 ppm	Inofensivo: < 1000 ppm Elevado: 1000 - 2000 ppm Inaceitável: > 2000 ppm	-	1000 ppm (24 hrs)	-
SO ₂	-	-	-	-	0.5 ppm (3 hrs) 75 ppb (1 hr)	-	20 µg/m ³ (24 horas) 500 µg/m ³ (10 min)
NO ₂	-	20 µg/m ³ (> 1 ano) 200 µg/m ³ (1 hr)	-	I: 0.25 µg/m ³ (1 hora) II: 0.08 µg/m ³ (1 hora)	53 ppb (1 ano) 100 ppb (1 hr)	20 µg/m ³ (24 hrs) 170 µg/m ³ (1 hr)	40 µg/m ³ (1 ano) 200 µg/m ³ (1 hora)
O ₃	-	-	0.2 mg/m ³	-	0.070 ppm (8 hrs)	40 µg/m ³ (8 hrs)	100 µg/m ³ (8 horas)
Benzeno	-	30 µg/m ³ (1 a 14 dias) 20 µg/m ³ (14 dias a 1 ano) 10 µg/m ³ (> 1 ano) 2 µg/m ³ (uma vida inteira)	-	4.5 µg/m ³	-	manter níveis o mais baixo quanto possível	-
Formaldeído	-	100 µg/m ³ (curta exposição)	0.1 mg/m ³	-	-	50 µg/m ³ (8 hrs) 123 µg/m ³ (1 hr)	0.1 mg/m ³ (30 min)
Radônio	-	-	400 Bq/m ³	-	-	200 Bq/m ³	100 Bq/m ³
MP10	-	-	0.15 mg/m ³	-	150 µg/m ³ (24 hrs)	-	20 µg/m ³ (1 ano) 50 µg/m ³ (24 horas)
MP2.5	-	-	-	25 µg/m ³ (24 hrs)	35 µg/m ³ (24 hrs)	manter níveis o mais baixo quanto possível	10 µg/m ³ (1 ano) 25 µg/m ³ (24 horas)
PTS	-	-	-	-	-	-	-
Fungos	750 UFC/m ³	-	500 UFC/m ³	-	-	-	500 UFC/m ³

Fonte: (a) ANVISA, 2003; (b) ANSES, 2021; (c) SCE, 2009; (d) UMWEL BUNDESAMT, 2021; (e) EPA, 2012; (f) HEALTH CANADA, 2021; (g) WHO, 2010

A Tabela 4 traz uma complementação para a análise do quadro regulatório de cada país. Nela é possível verificar quais são as exigências internacionais sobre a qualidade do ar interior que são abordadas por cada país de acordo com seus regulamentos.

Tabela 4: Apresentação das exigências internacionais sobre a qualidade do ar em ambientes internos

Exigências	Países													
	Portugal	Espanha	França	Reino Unido	Suécia	Finlândia	Dinamarca	Holanda	Suíça	Grécia	Itália	EUA	Brasil	Japão
Disposições construtivas dos edifícios	X		X	X		X	X	X						
Número de ocupantes	X	X				X						X		
Características gerais, exigências e modo de realização da ventilação	X	X	X	X		X	X							
Taxas de renovação do ar	X	X	X	X		X	X							
Tipo de ventilação	X	X	X	X		X	X	X				X		
Taxas de extração de fluxo de ar	X	X	X			X		X				X		
Dispositivo de admissão e exaustão do ar	X	X	X	X	X	X	X	X				X		
Dimensionamento das tubulações	X		X		X	X	X			X		X		X
Velocidades de saída do ar								X						
Problemas com pressões e depressões						X	X							
Valores limites dos poluentes						X	X					X		X
Ventilação natural	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X		X
Ventilação mecânica	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X		X
Requisitos de conforto térmico	X												X	

Fonte: Abreu, 2010

As tabelas apresentadas anteriormente fornecem base para uma análise crítica da qualidade da legislação brasileira referente a qualidade do ar interior.

A Tabela 3 indica que o Brasil, entre os países analisados, é o que menos possui valores limites recomendáveis para concentração de poluentes em ambientes internos. Além disso, a Tabela 4 indica que os países que englobam o menor número de exigências são o Brasil, Itália, Suíça e Grécia, ao contrário de Finlândia e Portugal, que são os que melhor atendem as exigências.

Sabendo que poluentes como dióxido de carbono (CO₂), dióxido de nitrogênio (NO₂), dióxido de enxofre (SO₂) e partículas apresentam notáveis efeitos à saúde humana e que demais países já apresentam valores guias para tais poluentes, são considerados

no momento de realizar revisões sobre as normas brasileiras, visando estabelecer valores limites recomendáveis ou ainda normativas, tornando obrigatória a manutenção dos padrões de qualidade do ar para ambientes internos assim como já se é praticado para o ar ambiente.

4 METODOLOGIA

4.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS MODELOS CFD PROPOSTOS

4.1.1 Software

Para a realização das modelagens, foi utilizado o *software* comercial *Ansys Fluent*. De acordo com Liu *et al.* (2019), este *software*, juntamente com sua versão mais antiga (*Fluent*) foi utilizado em 63% dos estudos relacionados a análise da ventilação em ambientes interiores por meio de modelagem CFD. Isso se deve ao fato deste apresentar uma interface mais amigável quando comparado a outros *softwares*.

4.1.2 Malha

Como apresentado anteriormente, a etapa de construção da malha irá dividir a geometria em diversos elementos. De acordo com Blazek (2001) a malha deve ser construída tal qual não haja espaços da geometria não preenchidos por elementos ao mesmo tempo que estes não devem se sobrepor. Além disso, é recomendável que a malha não possua modificações bruscas nos volumes e dimensões dos elementos, ou seja, estes devem ser os mais regulares possíveis.

Foi observado na literatura o emprego preferencial de dois tipos de malhas: as estruturadas e não estruturadas. Na primeira, os elementos são distribuídos em linhas e colunas, apresentando sempre o mesmo número de elementos vizinhos, podendo ser unicamente identificadas pelos seus índices (i, j e k). Já a segunda, os elementos parecem ter sido gerados de maneira aleatória, não seguindo um padrão bem definido e não podendo ser diretamente identificados pelos índices (BLAZEK, 2001).

Os diferentes tipos de malhas apresentam vantagens e desvantagens. As malhas estruturadas, por exemplo, apresentam uma programação mais fácil, exigem uma menor memória computacional e ainda apresentam melhor conectividade, ao contrário das malhas não-estruturadas. Entretanto, é difícil adaptá-las para bem representar domínios com geometrias complexas (BLAZEK, 2001). O tipo mais aplicado nos estudos de ventilação é a não estruturada. Dessa forma, este foi o tipo de malha utilizada nas modelagens realizadas no presente trabalho.

Quanto aos elementos que compõe as malhas, existem diversas formas. A forma do elemento deve ser selecionada de acordo com as condições de contorno e da física

do problema a ser resolvido, observando-se a necessidade de captação do escoamento com precisão próximo às fronteiras. Normalmente, elementos de malhas estruturadas são quadriláteros em geometrias 2D e hexaedros em geometrias 3D. Já em malhas não estruturadas, os elementos são usualmente triangulares ou quadriláteros em geometrias 2D e tetraédricos ou hexaédricos em geometrias 3D (FERZIGER; PERIC, 2002).


Nas modelagens realizadas no âmbito deste estudo, utilizou-se elementos de malha tetraédricos visto o domínio tridimensional a ser estudado. Além disso, utilizou-se ainda dez camadas de transição prismáticas para correta captura dos gradientes formados próximos as fronteiras sólidas do domínio.

A qualidade da malha exerce um importante papel sobre a acurácia da solução bem como sobre a necessidade computacional requerida durante a modelagem. Dessa forma, existem algumas métricas que indicam a qualidade da malha (ANSYS, 2013), sendo as principais a qualidade ortogonal, a razão de aspecto e a assimetria. Esses três parâmetros de qualidade foram avaliados para os casos modelados neste estudo.

Qualidade ortogonal

A qualidade ortogonal avalia o desvio dos ângulos entre as faces dos elementos adjacentes. Essa métrica é calculada usando o vetor normal da face, o vetor do centroide da célula para o centroide de cada uma das células adjacentes e ainda o vetor do centroide da célula para uma das faces. Os valores podem variar de zero a um, sendo que valores mais próximos de um apresentam uma melhor qualidade ortogonal (ANSYS, 2013). A Figura 4 indica uma escala que relaciona os valores de qualidade ortogonal a qualidade que ele proporciona a malha.

Figura 4: Range de valores de qualidade ortogonal da malha e qualidade da malha associada



Unacceptable	Bad	Acceptable	Good	Very good	Excellent
0-0.001	0.001-0.14	0.15-0.20	0.20-0.69	0.70-0.95	0.95-1.00

Fonte: Gok *et al.*, 2017

Razão de aspecto

A razão de aspecto é uma medida do alongamento de uma célula, sendo esse calculado como a relação entre o valor máximo e o valor mínimo da distância normal entre os centroides da célula e os centroides da face ou da distância entre o centroide

da célula e os nós. Para essa métrica, o valor ideal seria o mais próximo de um, indicando uma maior homogeneidade entre as células. Valores muito elevados podem causar erros na aproximação numérica dos fluxos nas faces das células (ANSYS, 2013).

Assimetria

A assimetria é uma das medidas primárias para a verificação da qualidade da malha uma vez que ela determina o quão perto do ideal (equilateral ou equiangular) a face ou a célula está (ANSYS, 2010). Dessa forma, ela é definida como a diferença entre a forma da célula e a forma de uma célula equilateral com volume equivalente. Uma regra geral é que a assimetria máxima para células triangulares ou tetraédricas deve estar, necessariamente, abaixo de 0,95, com uma média significativamente mais baixa (ANSYS, 2013). A Figura 5 indica uma escala de valores de assimetria e sua respectiva qualidade da malha.

Figura 5: Range de valores de assimetria e qualidade da malha associada



Unacceptable	Bad	Acceptable	Good	Very good	Excellent
0-0.001	0.001-0.14	0.15-0.20	0.20-0.69	0.70-0.95	0.95-1.00

Fonte: Gok *et al.*, 2017

4.1.3 Equações governantes

O escoamento de fluidos, bem como o transporte de substâncias, é governado pelas equações de conservação, sendo elas a conservação da massa (continuidade), conservação da quantidade de movimento, a conservação da energia e a conservação da massa de espécie química.

Equação da conservação da massa

A equação da conservação da massa, também conhecida como equação da continuidade, descreve o princípio da conservação da massa para um sistema fechado, ou seja, em todo volume de controle fechado, a massa é constante. Ela pode ser escrita da seguinte forma:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

Onde:

- ρ é a densidade do fluido [kg/m³];
- t é o tempo [s];
- u_i é a componente da velocidade na direção i [m/s];
- x_i é a coordenada cartesiana na direção i [m].

No caso estudado, o escoamento pode considerado incompressível uma vez que ocorre a temperaturas ambientes e baixas variações.

Equação da conservação da quantidade de movimento

A equação da conservação da quantidade de movimento, ou equação da conservação do momento, é baseada na aplicação da segunda lei de Newton para um volume de controle. Essa, por sua vez, estabelece que a soma de todas as forças agindo sobre o volume é igual a taxa de variação com o tempo da quantidade de movimento do sistema (FOX *et al.*, 2018).

Existem dois tipos de forças que podem atuar sobre um volume de controle, aquelas ditas de campo, que são dependentes da massa do fluido e de um campo externo, e as forças de superfície, que correspondem às forças geradas devido ao contato.

Considerando a hipótese de Navier-Stokes que estabelece que as tensões podem ser expressas em termos de gradientes de velocidade e de propriedades dos fluidos quando fluidos incompressíveis e newtonianos, tem-se a seguinte equação como equação da conservação do momento:

$$\rho \frac{\partial u_j}{\partial t} + \rho \frac{\partial u_j u_j}{\partial x_j} = - \frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \right] \quad (3)$$

Onde:

- ρ é a densidade do fluido [kg/m³];
- t é o tempo [s];
- u_i é a componente da velocidade na direção i [m/s];
- u_j é a componente da velocidade na direção j [m/s];
- x_i é a coordenada cartesiana na direção i [m];
- x_j é a coordenada cartesiana na direção j [m];
- p é a pressão estática do fluido [N/m²];
- μ é a viscosidade dinâmica do fluido [Pa.s].

Equação da conservação da energia

A equação da conservação da energia em sua forma diferencial é obtida a partir da aplicação da 1ª Lei da Termodinâmica para um volume de controle diferencial. Sendo assim, esta equação descreve, quando em um escoamento estacionário, que a soma da energia que entra no volume de controle e a taxa de geração de calor neste mesmo volume subtraindo a taxa na qual trabalho é realizado pelo fluido dentro do mesmo volume deve ser nula (INCROPERA *et al.*, 2014). Esta equação pode ser escrita da seguinte forma:

$$\rho \frac{\partial c_p T}{\partial t} + \rho \frac{\partial u_i c_p T}{\partial x_i} = \rho \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + S_h \quad (4)$$

Onde:

- ρ é a densidade do fluido [kg/m³];
- t é o tempo [s];
- c_p é o calor específico do fluido [J/kg.K];
- T é a temperatura do fluido [K];
- u_i é a componente da velocidade na direção i [m/s];
- x_i é a coordenada cartesiana na direção i [m];
- k é a condutividade térmica molecular [W/m.K];
- S_h é a taxa de geração de calor dentro do volume de controle [W/m³].

Equação da conservação da massa de espécie química

A conservação da massa da espécie química se baseia no fato de que o balanço líquido entre a entrada, saída e geração de massa num volume de controle deve ser nula.

Segundo Incropera *et al.* (2014) a equação da conservação da massa de uma espécie química A estabelece que: a taxa na qual a massa da espécie A entra num volume de controle somada com a taxa na qual a massa da espécie A é gerada no interior do volume e subtraída a massa que deixa o volume de controle deve ser igual a taxa de aumento da massa da espécie A que é acumulada dentro do mesmo volume.

Sendo assim, tem-se a seguinte formulação:

$$\rho \frac{\partial c}{\partial t} + \rho \frac{\partial u_i c}{\partial x_i} = \rho \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_m \frac{\partial c}{\partial x_i} \right) + S_c \quad (4)$$

Onde:

- ρ é a densidade do fluido [kg/m³];
- t é o tempo [s];
- u_i é a componente da velocidade na direção i [m/s];
- x_i é a coordenada cartesiana na direção i [m];
- c é a concentração da espécie química [kg/m³];
- D_m é a difusividade mássica molecular [m²/s];
- S_c é a taxa de geração da espécie química dentro do volume de controle [kg/m³].

4.1.4 Turbulência

Escoamentos turbulentos ocorrem quando as forças inerciais são mais influentes no escoamento quando comparadas as forças viscosas, ou seja, quando o número de Reynolds é elevado. Os escoamentos naturais são muito afetados pela presença de obstáculos, rugosidade da superfície, variações de temperaturas, dentre outros aspectos. Sendo assim, pode-se considerar que a maior parte dos escoamentos atmosféricos são turbulentos, sendo caracterizados por serem caóticos, randômicos e tridimensionais.

A visualização de um escoamento turbulento mostra estruturas rotacionais, denominadas vórtices turbulentos que, por sua vez, podem variar amplamente de comprimentos. Devido a ação dessas estruturas, há uma movimentação intensa e rápida do fluido, fazendo com que haja transferência de calor, massa e momento de forma muito eficiente (BLAZEK, 2001).

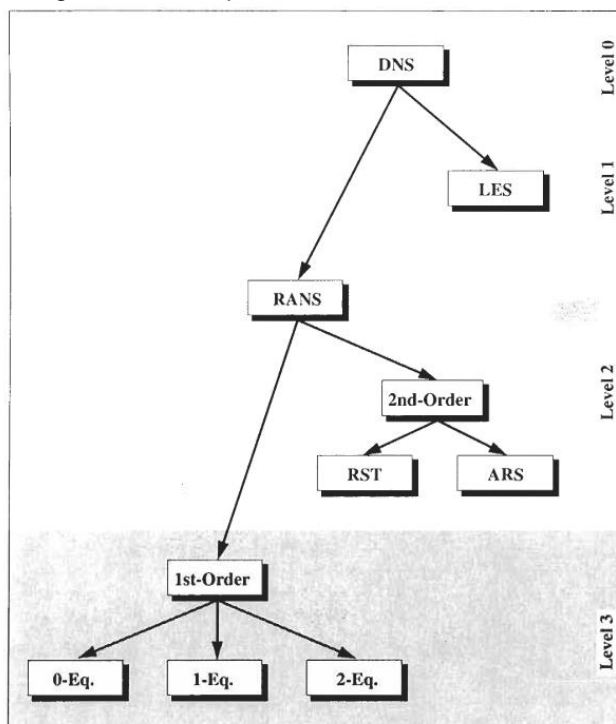
O escala de comprimento dos vórtices pode envolver também estruturas muito pequenas, inclusive menores que a malha de volumes finitos. A dissipação de energia em um escoamento turbulento se dá baseado no conceito de Cascata de Energia, ou seja, a energia cinética produzida pelos vórtices de grandes escalas é transferida para vórtices de escalas menores, criando um fluxo de energia descendente. Assim, há a formação da cascata de energia, ou seja, há transferência sucessiva de energia até que a dissipação desta se dê por efeitos viscosos, ou seja as forças inerciais sejam

da mesma ordem de grandeza das forças viscosas (MALALASEKERA; VERSTEEG, 2007).

Diferentemente dos escoamentos laminares, a representação matemática dos escoamentos turbulentos é um pouco mais complexa visto a presença de várias escalas temporais e espaciais geradas pela ação dos vórtices. Desse modo, a resolução direta do escoamento a partir da resolução das equações de NS é inviabilizada visto que, na maioria dos estudos, a demanda computacional seria muito mais elevada do que a capacidade atualmente ofertada.

Como consequência, alguns métodos matemáticos foram desenvolvidos para facilitar a previsão da turbulência, sendo que a maior parte destes é embasado estatisticamente. A Figura 6 mostra as diferentes classes de modelos de turbulência, sendo classificados de forma decrescente de acordo com seu nível de complexidade.

Figura 6: Hierarquia dos modelos de turbulência



Fonte: Blazek, 2001

Os métodos podem ser classificados em três categorias básicas (MALALASEKERA; VERSTEEG, 2007):

- Modelos de turbulência para equações RANS (*Reynolds-averaged Navier-Stokes*): resolução das equações de NS observando-se o escoamento médio e os efeitos da turbulência nas propriedades;
- Simulação de grandes vórtices – LES (*large eddy simulation*): aplicação de um filtro espacial nas equações transientes de NS, modelando vórtices maiores e simulando vórtices menores;
- Simulações numéricas diretas – DNS (*direct numerical simulation*): cálculo do escoamento médio e das flutuações turbulentas a partir da resolução das equações transientes de NS para todos os pontos do domínio de forma a abranger as menores escalas de comprimento.

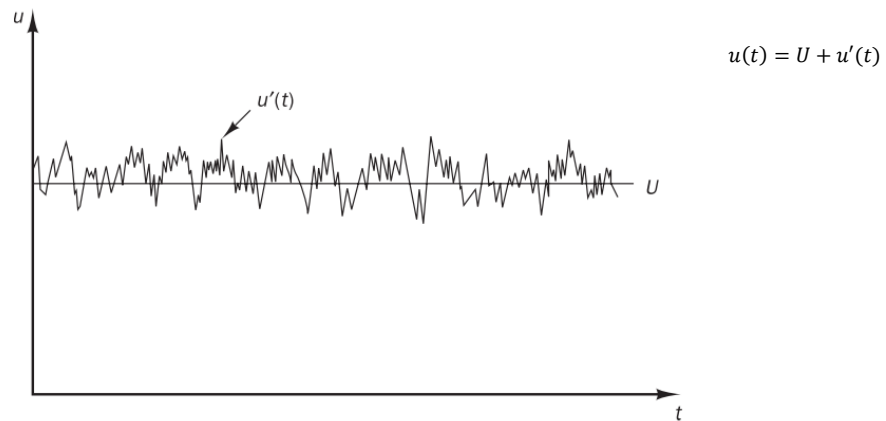
Deve-se considerar que um único método pode representar bem algumas situações de turbulência enquanto para outras apresentam alterações significativas. Sendo assim, cada modelo possui suas vantagens e desvantagens.

Um ponto que deve ser cuidadosamente observado durante a escolha do modelo é o esforço computacional e a precisão exigida pelo estudo (BLAZEK, 2001). Em muitos casos, modelos de turbulência mais simples conseguem prever algumas medidas globais com a mesma acurácia de modelos mais complexos, principalmente em estudos de engenharia que normalmente não é necessário obter detalhes sobre o comportamento das flutuações turbulentas (LÓPEZ, 2017).

Apesar de possuir um nível de complexidade mais baixo, a metodologia mais utilizado atualmente nos estudos é o RANS (*Reynolds Average Navier-Stokes*) pois, demanda menor capacidade computacional e os resultados são satisfatórios (BLAZEK, 2001; MALALASEKERA; VERSTEEG, 2007).

A metodologia RANS utiliza o conceito de Média de Reynolds que estabelece que o escoamento pode ser caracterizado em termos de uma variável média e suas flutuações, representadas a partir de propriedades estatísticas. A Figura 7 mostra as flutuações da velocidade instantânea devido a ação da turbulência.

Figura 7: Medidas pontuais de velocidade típicas de um escoamento turbulento



Fonte: Malalasekera e Versteeg, 2007

A inserção deste conceito nas equações N-S gera termos adicionais, conhecidos como tensões de Reynolds. Esses termos descrevem as flutuações causadas pela turbulência nas equações de transporte e que surgem devido a não linearidade do termo convectivo da equação (MALALASEKERA; VERSTEEG, 2007). Devido a introdução dessas, seis novas variáveis são incorporadas ao problema, além da pressão e das componentes do vetor velocidade, totalizando dez variáveis. Visto que há mais incógnitas do que equações, é estabelecido um problema de fechamento para a solução da turbulência (FERZIGER; PERIC, 2002).

Uma forma de simplificar o problema inicial das tensões de Reynolds é por meio da analogia de Boussinesq (1877), que estabelece o conceito de viscosidade turbulenta e sua semelhança a lei da viscosidade de Newton, porém apresentando uma ordem de grandeza muito maior. Portanto, as tensões de Reynolds são consideradas proporcionais às taxas de deformação média das partículas fluidas, introduzindo os conceitos de viscosidade turbulenta e energia cinética turbulenta (LÓPEZ, 2017).

Nesse sentido, para que a resolução do problema de escoamento seja possível, é necessário aplicar algumas aproximações para a determinação das tensões de Reynolds, do transporte de escalares e para fechar o sistema. Essas aproximações são os modelos de turbulência propriamente ditos.

Os modelos RANS mais utilizados podem ser diferenciados de acordo com o número adicional de equações de transporte que precisam ser resolvidas (MALALASEKERA; VERSTEEG, 2007). Os principais modelos são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5: Modelos de turbulência baseados na metodologia RANS

Número de equações adicionais	Nome do modelo
Zero	Mixing length model
Uma	Spalart-Allmaras model
Duas	<i>k-e</i> model
	<i>k-w</i> model
	Algebraic stress model
Sete	Reynolds stress model

Fonte: Malalasekera e Versteeg, 2007

Nas modelagens realizadas no presente estudo, optou-se pela utilização do método das médias de Reynolds (RANS) com o modelo de turbulência *k-e* visto que é um modelo mais simples, assim como apresenta bons resultados (BLAZEK, 2001; FERZIGER; PERIC, 2002; MALALASEKERA; VERSTEEG, 2007). Esse método foi escolhido uma vez que o presente trabalho busca uma visão abrangente da dinâmica do escoamento num ambiente interno, no caso uma sala de aula. Dessa forma, não são necessários modelos de turbulência com grandes detalhamentos ou refinamentos.

Ainda, diversos estudos envolvendo modelagens CFD em ambientes interiores, principalmente aqueles listados no Quadro 3, em adição àqueles publicados por Mora-pérez, Guillen-Guillamón e Amparo López-Jiménez (2017) e Panagopoulos *et al.* (2011) utilizaram tal modelo de turbulência.

O modelo *k-e* foi primeiramente utilizado nos trabalhos de Chou, entretanto, as mais importantes contribuições foram propostas por Jones e Launder, Launder e Sharma e Launder e Spalding. Esse modelo é baseado na solução das equações da energia cinética turbulenta (*k*) e sua taxa de dissipação (*ε*), visto que relaciona a viscosidade turbulenta a essas duas variáveis.

A viscosidade turbulenta é calculada a partir da seguinte equação (MALALASEKERA; VERSTEEG, 2007):

$$\mu_{turb} = \frac{c_{\mu} \cdot \rho \cdot \kappa^2}{\varepsilon}$$

Onde:

- c_{μ} é uma constante empírica do modelo;
- ρ é a massa específica do fluido [kg/m³];

- κ é a energia cinética turbulenta;
- ε é a taxa de dissipação da energia cinética turbulenta;

O modelo padrão κ - ε utiliza as seguintes equações de transporte para solucionar κ e ε (MALALASEKERA; VERSTEEG, 2007):

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \text{div}(\rho k U) = \text{div} \left[\frac{\mu_{turb}}{\sigma_k} \text{grad } k \right] + 2\mu_{turb} S_{ij} \cdot S_{ij} - \rho \varepsilon$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \text{div}(\rho \varepsilon U) = \text{div} \left[\frac{\mu_{turb}}{\sigma_\varepsilon} \text{grad } \varepsilon \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} 2 \mu_{turb} S_{ij} \cdot S_{ij} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}$$

Onde:

- S_{ij} é a taxa de deformação da partícula fluida;
- σ_k , σ_ε , $C_{1\varepsilon}$ e $C_{2\varepsilon}$ são constantes ajustáveis.

Para a resolução, são utilizados os seguintes valores de constantes:

Tabela 6: Constantes empíricas para o modelo k- ε padrão

Constante	C_μ	σ_k	σ_ε	$C_{1\varepsilon}$	$C_{2\varepsilon}$
Valor	0,09	1,00	1,30	1,44	1,92

Fonte: Malalasekera e Versteeg, 2007

4.1.1 Condições iniciais e condições de contorno

De acordo com Malalasekera e Versteeg, (2007) todos os problemas de modelagem CFD são definidos em termos de condições iniciais e condições de contorno. Essas devem ser condizentes com a realidade uma vez que aplicadas de forma errônea podem levar a não convergência dos resultados.

No presente estudo são utilizados 5 tipos de condições de contorno para todas as modelagens realizadas: entrada e saídas de ar, paredes, fonte de poluentes e fontes de calor.

4.2 VALIDAÇÃO DO MODELO

Em estudos de modelagem CFD, a validação do modelo se faz necessária. Ela pode ser realizada comparando-se os dados obtidos a demais estudos sobre o mesmo tema, que apresentam características em comum.

A validação do modelo do estudo de caso desenvolvido no presente trabalho foi realizada a partir da reprodução computacional do experimento desenvolvido por Zheng *et al.* (2021), a fim de validar a utilização da ferramenta Ansys para a modelagem de escoamentos em ambientes internos.

Zheng *et al.* (2021) estudaram sobre as características das variações a longo prazo das concentrações de CO₂ em ambientes internos, propondo um modelo matemático que fosse capaz prever a concentração desse gás para períodos maiores ou iguais a 8 horas.

Este, por sua vez, consiste em um modelo de difusão de CO₂ e um método de calibração de parâmetros. Dessa forma, para inicialização do modelo, foi necessário a aquisição de dados ambientais, como a concentração de CO₂ durante um curto período. Sendo assim, houve a necessidade da condução de um estudo experimental, no qual duas pessoas foram alocadas em uma cabine cujo mecanismos de ventilação eram controlados e foram estudadas 5 situações distintas de ventilação.

A primeira consistia no cenário de referência, ou seja, não foi aplicada ventilação mecânica ao local e a porta foi mantida fechada. As três situações seguintes mantiveram a condição da porta fechada, sendo aplicadas diferentes taxas de ventilação mecânica ao local. Para esses quatro cenários citados, buscou-se manter a mesma concentração inicial de CO₂, então, antes de iniciar as medições, o sistema de ventilação foi acionado e a porta deixada aberta até o momento em que a concentração média do referido gás na sala atingisse 550 ppm. Neste momento, as pessoas adentraram a sala e os respectivos experimentos eram iniciados.

O último cenário, por sua vez, diferiu dos demais visto que os autores buscaram avaliar a influência da ventilação natural na concentração do poluente estudado. Sendo assim, após entrada das pessoas na cabine, a porta foi mantida fechada sem ventilação mecânica sendo aplicada durante o período de 1 hora, momento em que abriu-se a porta e monitorou-se a concentração de CO₂ por mais 20 minutos.

Em todos os cenários, a frequência de medição do equipamento utilizado era de 5 medições por segundo, sendo observado um período de 1 hora para os 4 primeiros cenários e de 1 hora e 20 minutos para o último cenário. Os resultados obtidos na parte experimental do estudo foram inseridos no modelo desenvolvido a fim de realizar a calibração do mesmo.

Observando os resultados experimentais para os primeiros 4 cenários, os autores concluíram que ao longo de 1 hora a concentração de CO₂ aumentou de forma próxima a linear, sendo que a taxa de crescimento era menor conforme aumentava a taxa de ventilação. Além disso, também foi observado que em todos esses cenários a concentração de CO₂ ultrapassou 1.000 ppm, limite estabelecido por normas internacionais aplicáveis a edifícios residenciais e comerciais.

Já os resultados obtidos para o 5º cenário indicaram que a abertura da porta foi capaz de proporcionar uma redução significativa nas concentrações de CO₂ no ambiente, visto que foi aumentado o volume da cabine e causado um efeito de diluição. Entretanto, os autores também ressaltaram que tal resultado foi obtido apenas pois as concentrações de CO₂ no exterior da cabine eram mais baixas do que do interior da cabine.

Para avaliar a eficácia de predição da concentração de CO₂ em longos períodos pelo modelo proposto, os resultados numéricos foram comparados com os resultados experimentais e constatou-se um erro percentual máximo inferior a 3%, indicando que o modelo estava bem calibrado e que poderia prever de maneira eficaz a concentração de CO₂ no ambiente para longos períodos.

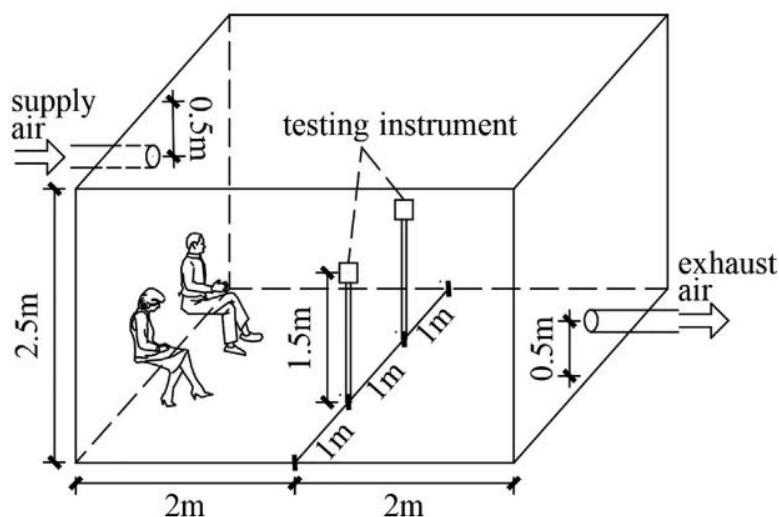
Ao prosseguir com as modelagens, os autores observaram que, na condição sem ventilação mecânica, as concentrações de CO₂ permaneceram superiores a 1000 ppm por um longo período, estabilizando em níveis superiores a 5000 ppm. Já nos demais casos, as concentrações estabilizaram em um patamar inferior a 5000 ppm. Já no caso em que se considera a porta aberta, a concentração do referido gás estabilizou num patamar inferior a 1000 ppm. Sendo assim, os autores concluíram a importância e necessidade dos sistemas de ventilação com taxa de ventilação adequada nos ambientes interiores.

Conforme apontado anteriormente, para o caso de validação, utilizou-se apenas a primeira parte do estudo de Zheng *et al.* (2021) em que o experimento da cabine é realizado, aqui chamado apenas de experimento.

Primeiramente, a cabine avaliada no experimento, identificada na Figura 8, foi reproduzida computacionalmente com auxílio do *software* Space Claim. Buscou-se manter o modelo o mais próximo possível dos casos monitorados por Zheng *et al.* (2021). Entretanto, algumas aproximações e simplificações foram realizadas, como a

aproximação de algumas medidas que não estavam disponíveis no estudo, mas que eram essenciais à geometria, por exemplo a entrada e saída de ar, cujo diâmetro adotado corresponde a 160 mm, e no caso da representação das pessoas, que no modelo, foram simplificadas para um conjunto de blocos. Os narizes foram representados como pequenas faces quadradas com área total de 4 cm².

Figura 8: Figura esquemática da cabine do experimento que foi reproduzido computacionalmente



Fonte: Zheng *et al.*, 2021

Depois, gerou-se uma malha, sendo utilizadas 10 camadas prismáticas de transição e aplicou-se refinamento nas células das paredes e pessoas. As métricas foram avaliadas para identificação da qualidade da malha. Por fim, foram definidas as condições de contorno do problema.

Para a validação, foram realizadas modelagens apenas considerando os três casos em que há ventilação mecânica e que a porta foi mantida fechada (MVR12, MVR17 e MVR25).

Na entrada de ar, foi considerada uma condição de contorno de entrada de fluido (*inlet*) de velocidade constante. O estudo experimental de Zheng *et al.* (2021) avalia três cenários de ventilação, alterado entre eles apenas a taxa de ventilação aplicada. No primeiro cenário (MVR12) é aplicado uma taxa de ventilação de 12 m³/h, enquanto no segundo (MVR17) e terceiro cenário (MVR25) são aplicadas taxas de 17 m³/h e 25 m³/h, respectivamente.

Contudo, conforme citado anteriormente, o dado de entrada necessário para o modelo é a velocidade de entrada do ar, sendo necessário relacionar as taxas de ventilação

avaliadas por Zheng *et al.* (2021) com a área de entrada de ar, definida anteriormente. Sendo assim, as velocidades de entrada de ar utilizadas nos três casos são dadas na Tabela 7.

Tabela 7: Velocidades de entrada de ar no caso de validação

Cenário	Taxa de ventilação [m ³ /s]	Velocidade de entrada [m/s]
MVR12	12,00	0,17
MVR17	17,00	0,23
MVR25	25,00	0,35

Para as paredes e pessoas, foram utilizadas condições de contorno de paredes. Já na saída de ar, a condição de contorno utilizada foi a de saída de pressão considerando pressão atmosférica. Já para o nariz dos ocupantes, definiu-se uma condição de contorno de fluxo positivo de massa constante, sendo que o valor aplicado foi de $7,4 \cdot 10^{-6}$ kg CO₂ /s, que foi a taxa de emissão do referido poluente estimada pelo autor durante a realização do experimento. Além disso, neste caso de validação, o escoamento foi considerado isotérmico, estando a uma temperatura constante de 26,85 °C.

4.3 ESTUDO DE CASO

4.3.1 Seleção do ambiente

Conforme explicitado anteriormente, a qualidade do ar em ambientes internos pode afetar a saúde dos ocupantes bem como sua produtividade. Dessa forma, devido à sensibilidade do público-alvo, escolheu-se uma sala de aula típica para embasar a modelagem para os diferentes cenários.

A sala de aula estudada consiste num ambiente prismático de 5,84 m x 4,47 m x 2,90 m (C x L x H), contando com uma porta (2,10 m x 0,80 m) e duas janelas retangulares (0,6 m x 0,5 m). Esta se localiza no primeiro andar da edificação.

A lotação típica da sala de aula é de 15 pessoas. Nesta, ocorrem atividades relacionadas a ensino, leitura e escrita, cuja duração média é de duas horas. Esta sala, por sua vez, possui público com média de idade de 20-25 anos. De acordo com a literatura (SAKAMOTO *et al.*, 2022) a ordem de grandeza de emissão de CO₂ por crianças é a mesma para adultos, sendo assim, a realização de tal comparação é possível.

O edifício cuja sala de aula foi escolhida se localiza no bairro Goiabeiras, em Vitória, e está próxima de uma avenida de tráfego intenso, mas as ruas ao entorno são pouco movimentadas e apresentam trânsito majoritário de veículos leves. Além disso, há um braço de mar nas proximidades.

4.3.2 Campanha experimental

Durante a realização deste trabalho de conclusão de curso, uma campanha experimental foi realizada para determinar alguns dados de entrada para os modelos CFD propostos no estudo de caso e, posteriormente, nas propostas de melhoria. Com isso, ainda foi possível gerar uma base de comparação para os resultados estimados pelo modelo. Foi realizado o monitoramento da concentração de CO₂ na sala de aula e foram medidas, pontualmente, as velocidades de entrada e temperaturas nas entradas e saídas de ar.

Para o monitoramento da concentração de CO₂, utilizou-se um sensor durante o intervalo de 1 hora na sala de aula estudada. Foi monitorada a situação em que as janelas e a porta permaneceram fechadas, sendo que a entrada de ar se dava unicamente pelo ar-condicionado e as saídas pelas frestas. O sensor utilizado em tais medições consiste no Aeroqual SERIE 500, conforme identificado na Figura 9, e foi instalado a 1,10 m do chão.

Este sensor, quando utilizado com a cabeça para medição de dióxido de carbono, utiliza a tecnologia de Infravermelho Não Dispersivo (NDIR) para determinação da concentração do referido gás. Basicamente, um feixe de luz infravermelha é emitido e parte da energia é absorvida pelos gases. A luz restante é filtrada para comprimentos de onda específicos e, a partir da quantidade de luz absorvida pelos gases é possível determinar a concentração do gás que está sendo analisado (AEROQUAL, 2021).

Figura 9: Sensor Aeroqual Serie 500



Fonte: Acervo pessoal

A campanha foi realizada no dia 09 de junho de 2022 durante uma aula na parte da tarde (das 15:05 às 16:05), com lotação de 13 alunos e 1 professor.

O sensor foi instalado no canto direito da sala, próximo ao professor, a uma altura de 1,10 m do chão conforme identificado na Figura 10. Este foi ajustado para que realizasse uma medição a cada minuto. O comportamento dos ocupantes foi registrado para melhor entendimento do experimento.

A concentração inicial de CO₂ medida na sala foi de 610 ppm e foi utilizada como condição inicial dos modelos CFD propostos para o estudo de caso e nas propostas de melhoria.

Figura 10: Sensor Aeroqual Serie 500 instalado no ambiente estudado



Fonte: Acervo pessoal

Além disso, também foram conduzidas medições para determinação das velocidades do vento e temperatura do ar na saída do ar-condicionado e na porta. Os resultados estão disponíveis na Tabela 8 e foram utilizados como condições de contorno para alguns cenários propostos.

Tabela 8: Velocidades e temperaturas médias nas entradas do domínio estudado

Local	Velocidade do ar [m/s]	Temperatura [°C]
Ar-condicionado	3,80	22,00
Janelas	0,70	23,50
Porta	0,26	24,00

Tais parâmetros foram determinados utilizando o sensor TAFR-190 da Instrutherm (Figura 11) que consiste num anemômetro de fio quente. Este tipo de equipamento funciona através da transferência de calor. Em uma ponteira, há um filamento em que é induzida uma corrente elétrica. A resistência elétrica deste é proporcional a temperatura. Devido a passagem do ar, há transferência de calor entre o filamento e o ar, logo há uma alteração da temperatura do filamento e, conseqüentemente, de sua

resistência térmica. Essa variação, por sua vez, pode ser relacionada com a velocidade do fluido em deslocamento. O Quadro 4 traz algumas especificações técnicas do modelo utilizado.

O equipamento possui frequência de amostragem de 0,8 segundos. Os parâmetros citados foram amostrados durante um período de 20 segundos e realizou-se a média das leituras. Vale ressaltar que durante as medições, devido à limitações do local, a paleta do ar-condicionado estava em modo oscilante, variando a direção do escoamento entre perpendicular a face de saída e inclinado 45° para baixo.

Figura 11: Sensor TAFR-190 Anemômetro de fio quente



Fonte: Acervo pessoal

Quadro 4: Especificações técnicas do anemômetro de fio quente utilizado

Velocidade do vento	Faixa de medição*	0,1 a 25,0 m/s
	Resolução	0,01 m/s
	Precisão	± (5% + 1d) da leitura ou ± (1%+1d) do total
Temperatura	Faixa de medição*	0°C a 50°C
	Faixa de medição	0°C a 50°C
	Precisão	± 1°C (entre 0°C e 35 °C) ou ± 2°C (entre 35,1 °C e 50°C)

Legenda:

(*) Na faixa de temperaturas de 0°C a 50°C e umidade relativa menor que 80%.

Fonte: Instrutherm, 2021

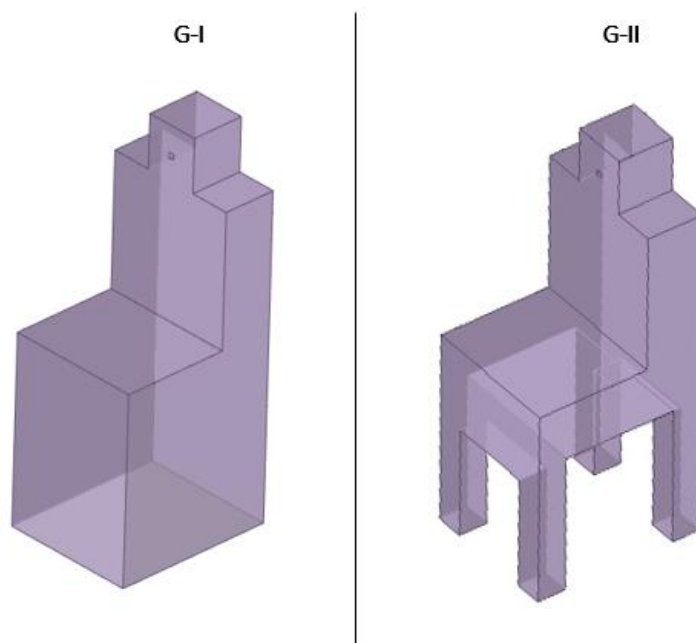
4.3.3 Modelagens

4.3.3.1 Geometria e Malha

Reproduziu-se computacionalmente a sala em que o experimento foi realizado com o auxílio do *software* Space Claim. Foram geradas duas geometrias distintas a fim de avaliar também a influência das simplificações geométricas nos estudos relacionados à qualidade do ar interior.

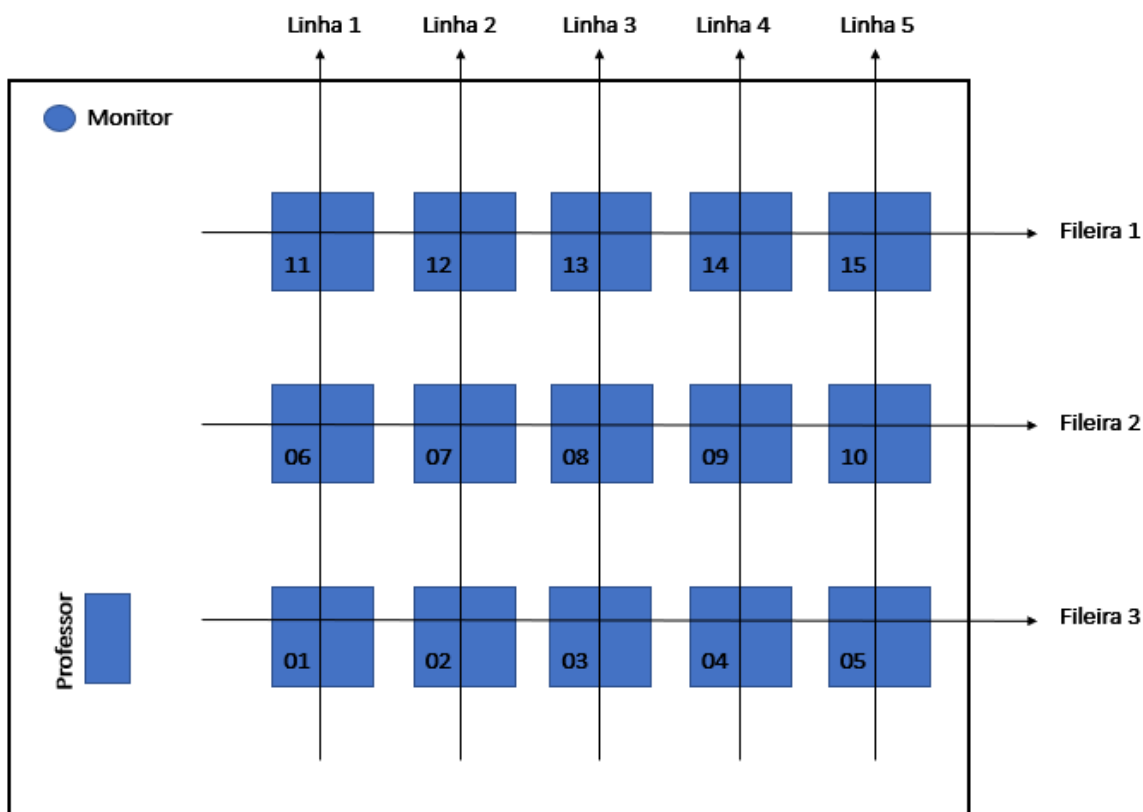
Na primeira geometria estudada (G-I), os alunos e as carteiras foram representados como blocos maciços, não proporcionando passagem de ar pela sua parte inferior. Já na segunda geometria (G-II), tal espaço foi implementado. Foi removido, para a formação dos espaços vazados em cada ocupante, um paralelepípedo de 30 cm x 40 cm x 50 cm. Tal diferença pode ser visualizada na figura abaixo.

Figura 12: Diferença de representação de geometria dos ocupantes



A distribuição dos ocupantes na sala foi realizada conforme indicada na figura abaixo.

Figura 13: Distribuição dos ocupantes na sala de aula avaliada no estudo de caso.



Depois, para ambos os casos, gerou-se uma malha, utilizando 10 camadas prismáticas de transição. Foi realizado também um refinamento nas células das paredes, incluindo porta, janelas, fresta da porta e ar-condicionado, e dos ocupantes. As métricas foram avaliadas para identificação da qualidade da malha.

4.3.3.2 Cenários modelados, Condições Iniciais e Condições de Contorno

Inicialmente buscou-se reproduzir a situação em que ocorreu o monitoramento citado na seção anterior, sendo assim, o cenário base apresentava a porta e janelas fechadas sendo que a única entrada de ar no domínio ocorre pelo ar-condicionado e a saída pela fresta da porta.

Foram considerados, ao todo, seis cenários, sendo alteradas, respectivamente, a geometria do problema (entre G-I e G-II), a angulação de entrada de ar (entre 90° e 45°) e sua velocidade na face do ar-condicionado (entre 3,8 m/s e 1 m/s). A Tabela 9 traz todos os cenários que foram considerados neste estudo de caso.

O cenário considerado como base e que representa a situação monitorada durante a aula é o a entrada de ar se dá a 90° com velocidade de 3,8 m/s.

Tabela 9: Cenários modelados no estudo de caso

Cenário	Situação		
	Geometria	Angulação de entrada de ar	Velocidade de entrada de ar
1	G-I	90°	3,80 m/s
2	G-II	90°	3,80 m/s
3	G-II	45°	3,80 m/s
4	G-I	90°	1,00 m/s
5	G-II	90°	1,00 m/s
6	G-II	45°	1,00 m/s

Conforme explicitado anteriormente, foram adotados os resultados da campanha experimental como condições iniciais e condições de contorno. Sendo assim, a concentração inicial de CO₂ considerada na sala foi de 610 ppm e temperatura média de 24,6 °C para todos os cenários.

Foi definido uma taxa de emissão de CO₂ de $1,4 \cdot 10^{-5}$ kg/s para a face que representa o nariz dos alunos e do professor, visto que foi a taxa de emissão média observada no estudo desenvolvido por E. Thorstensen *et al.* (1990), que levou em consideração medições em 10 ambientes escolares.

Foi considerada uma taxa de emissão mais elevada no estudo de caso visto que, em uma sala de aula, os ocupantes não estão em repouso pleno, conforme considerado por Zheng *et al.* (2022) em seu experimento, mas sim realizando atividades mentais intensas, falando, escrevendo ou digitando, o que eleva a taxa de emissão de CO₂.

Também foi definida uma temperatura constante de 37°C em todas as faces dos ocupantes, representando a temperatura corporal.

Vale ressaltar que, durante a realização do experimento, havia apenas 13 alunos na sala, dessa forma, as posições 14 e 15 foram consideradas paredes, não sendo estabelecida taxa de emissão do poluente ou fluxo de calor/temperatura constante para tais ocupantes. Esta condição se manteve constante em todos os casos.

Quanto a entrada de ar, foi considerada a condição de entrada de ar com velocidade constante, sendo aplicada as velocidades de 3,8 m/s, que foi a velocidade determinada na campanha experimental, e 1 m/s, uma segunda velocidade hipotética proposta. Ainda, tal entrada de ar pode ocorrer de forma perpendicular ou a 45°, conforme foi discretizado na Tabela 9. Foi estabelecido também que este fluxo de ar

está a uma temperatura constante de 22°C, que corresponde à temperatura medida com o anemômetro no dia do experimento.

Para efeitos de simplificação, foi considerada que a saída de ar do domínio ocorria unicamente por frestas, sendo que essa foi simplificada para uma única fresta na parte inferior da porta, chamada de “fresta da porta”. Sendo assim, foi aplicada a condição de contorno de saída de pressão para pressão atmosférica.

As demais superfícies não citadas anteriormente (paredes laterais, chão, teto, porta, janelas e ocupantes 14 e 15) foram consideradas paredes sem a presença de fluxo de calor/temperatura constante ou fluxo de massa.

Para efeitos de comparação direta dos resultados do modelo, a concentração de CO₂ foi monitorada no ponto específico da sala em que o sensor foi alocado durante a realização da campanha experimental. Este ponto foi chamado de monitor.

Para todos os cenários foram avaliadas ainda os contornos de concentrações de CO₂, de velocidade do ar e de temperatura, visando verificar o atendimento aos valores recomendáveis pela Resolução Anvisa nº 9 e para comparar a eficiência de cada cenário.

Além disso, buscando complementar as análises, observou-se também os contornos de energia cinética turbulenta e as trajetórias das partículas de CO₂ proveniente dos ocupantes.

Para avaliação das variáveis citadas anteriormente, foram traçados planos auxiliares no domínio, conforme identificado na Tabela 10.

Tabela 10: Planos auxiliares traçados para avaliação das variáveis do estudo de caso

Planos		Coordenadas					
		X ₀	X ₁	Y ₀	Y ₁	Z ₀	Z ₁
XY	Plano-linha 1	0,00	4,47	0,00	2,90	3,84	3,84
	Plano-0.1m-chao	0,00	4,47	0,10	0,10	0,00	5,84
XZ	Plano-monitor	0,00	4,47	1,10	1,10	0,00	5,84
	Plano-nariz-aluno	0,00	4,47	1,29	1,29	0,00	5,84
	Plano-nariz-professor	0,00	4,47	1,83	1,83	0,00	5,84
YZ	Plano-fileira-2	2,18	2,8	0,00	2,90	0,00	5,84
	Plano-vertical-monitor	0,35	0,35	0,00	2,90	0,00	5,84

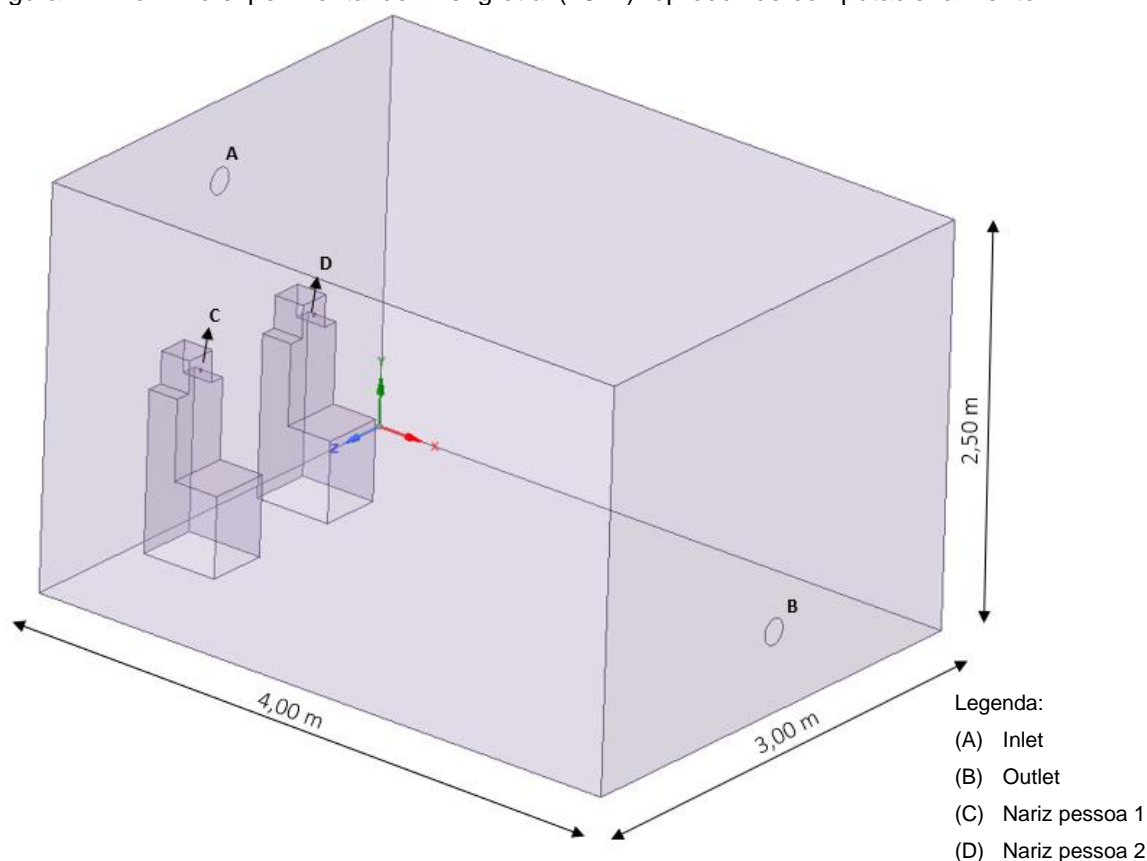
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O presente capítulo apresenta os resultados obtidos a partir da metodologia descrita anteriormente, sendo estes discutidos e avaliados entre si e demais estudos encontrados na literatura recente.

5.1 VALIDAÇÃO DO MODELO

A geometria utilizada para a realização das modelagens do caso validação pode ser visualizada na Figura 14. Conforme indicado anteriormente, algumas simplificações e aproximações foram realizadas.

Figura 14: Domínio experimental de Zheng *et al* (2022) reproduzido computacionalmente



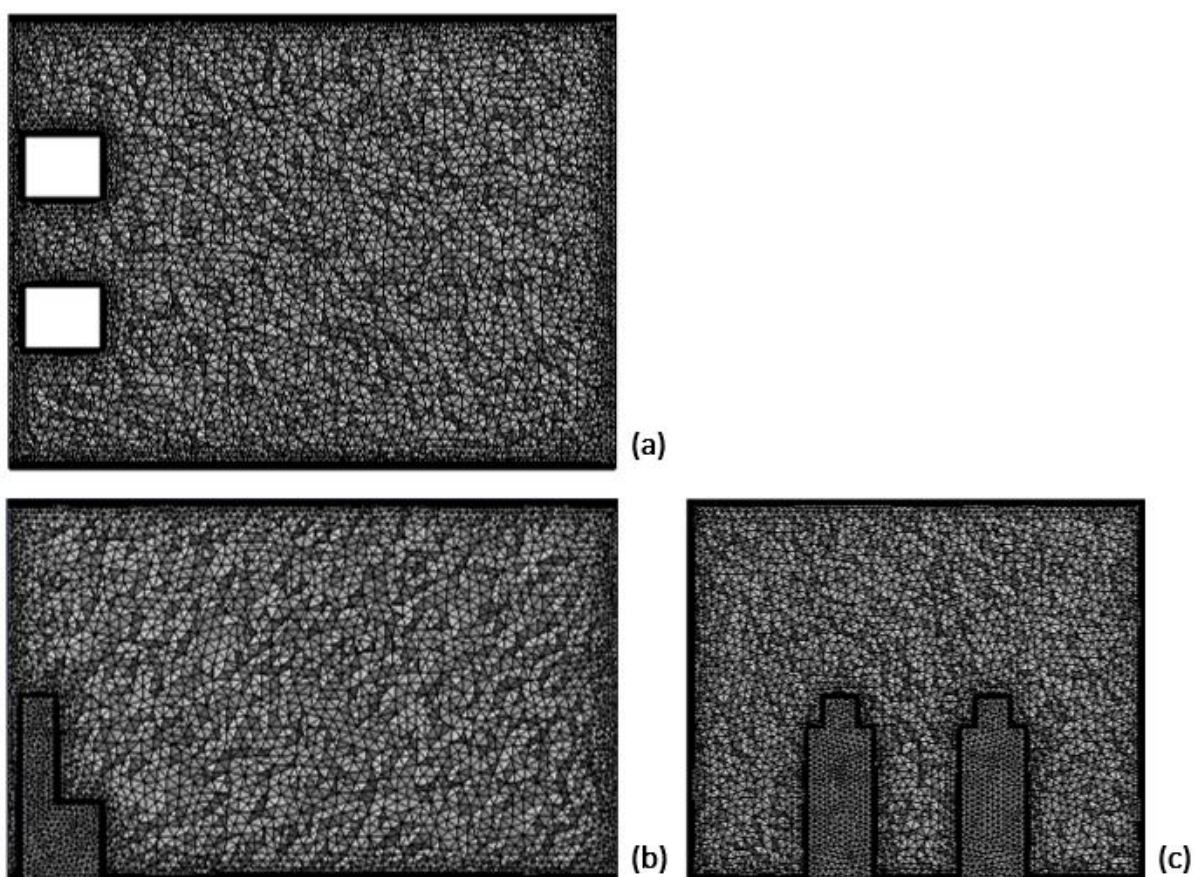
A Tabela 11 apresenta as principais características da malha gerada para este caso. A malha gerada foi considerada de boa qualidade, permitindo a continuação dos estudos.

Tabela 11: Características gerais da malha do caso validação

Característica		Parâmetro	Valor
Construtivas	Malha em geral	Taxa de crescimento	1,20
		Tamanho máximo dos elementos	0,08
		Tamanho dos elementos	0,08
	Camada prismática de transição	Núm de elementos	1.847.683
		Núm de camadas	10
		Taxa de crescimento	1,20
Qualidade	Refinamento nas faces	Tamanho dos elementos	0,035
	Qualidade ortogonal	Médio	$0,78 \pm 0,12$
	Razão de aspecto	Médio	$5,72 \pm 5,85$
	Assimetria	Médio	$0,22 \pm 0,13$

A figura abaixo representa a malha gerada para esta geometria.

Figura 15: Vista (a) Superior, (b) Lateral e (c) Frontal da malha gerada para o Caso Validação



Ao executar o modelo com as condições iniciais indicadas na metodologia e observando os resultados nos pontos M1 e M2, que correspondem aos sensores de CO₂ instalados ao centro da sala, obteve-se a evolução temporal da concentração deste poluente, conforme indicado nos gráficos a seguir. Esses resultados foram

confrontados com os obtidos por Zheng *et al* (2022) durante a realização de seu estudo experimental.

Gráfico 1: Concentrações de CO₂ obtidas pelo modelo e obtidas por Zheng *et al* (2022) para o caso MVR12

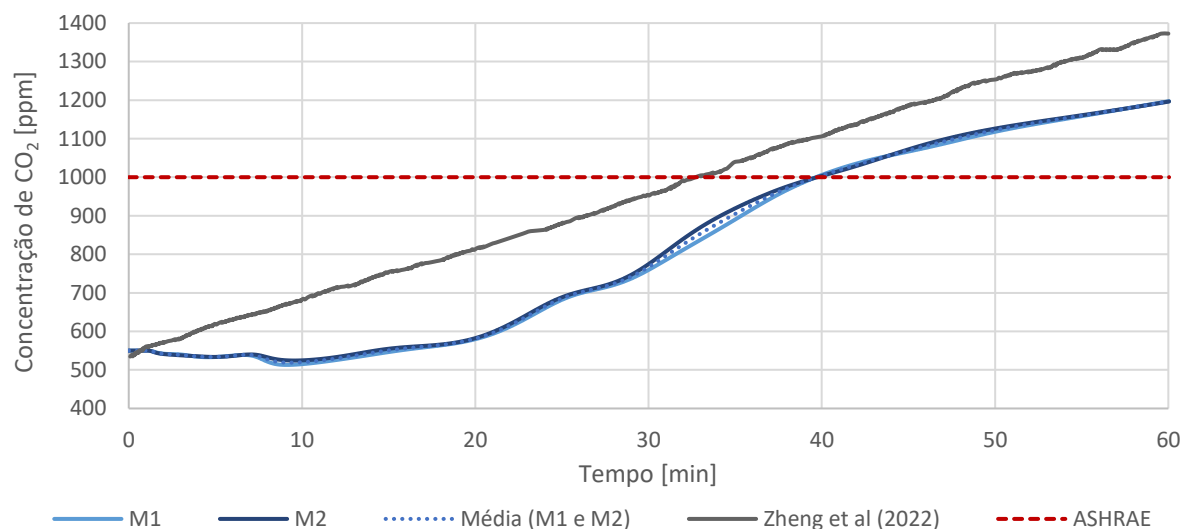


Gráfico 2: Concentrações de CO₂ obtidas pelo modelo e obtidas por Zheng *et al* (2022) para o caso MVR17

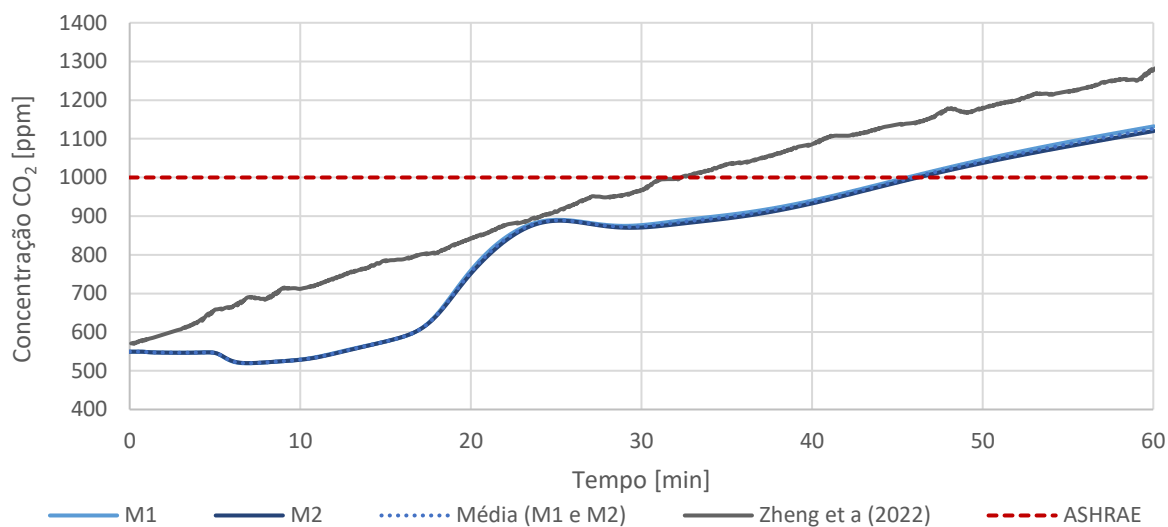
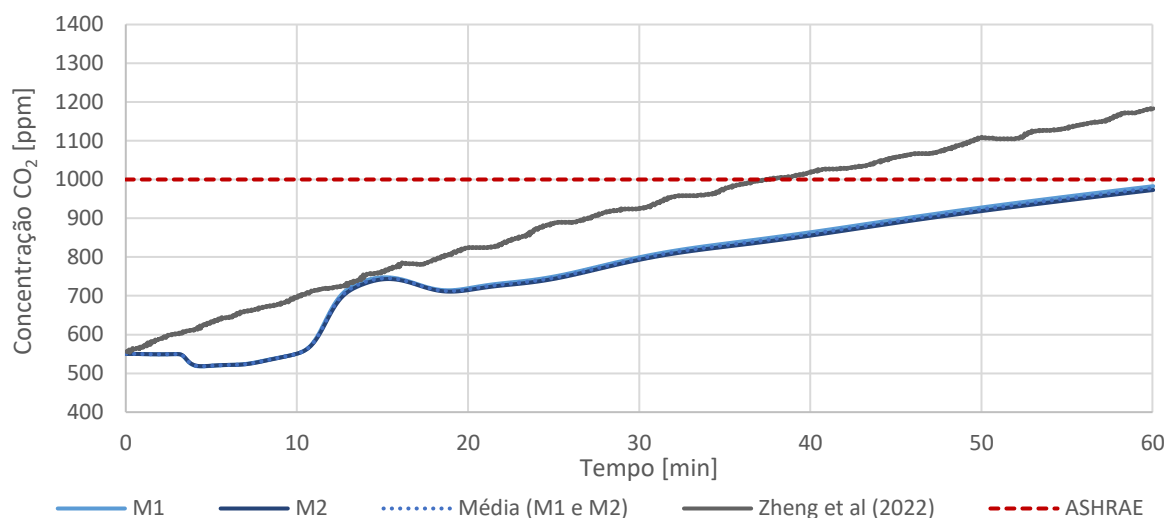


Gráfico 3: Concentrações de CO₂ obtidas pelo modelo e obtidas por Zheng *et al* (2022) para o caso MVR25



As concentrações finais médias do ponto M1 e M2 obtidas pelo experimento e pelo modelo, bem como os erros percentuais entre eles podem ser encontrados na Tabela 12. O erro médio geral para os casos estudados foi de 14%.

Tabela 12: Concentrações de CO₂ [ppm] ao final de 1 hora obtidas pelo experimento e pelo modelo

Cenário	Zheng <i>et al</i> , 2022	Simulações	Erro [%]
MVR12	1379,00	1196,85	13,21%
MVR17	1285,00	1126,28	12,35%
MVR25	1185,00	978,81	17,48%

Observando os Gráfico 1, Gráfico 2 e Gráfico 3, percebe-se que o modelo tendeu a subestimar as concentrações quando comparados aos resultados de medição direta obtidos por Zheng *et al* (2022). No caso MVR25, por exemplo, a concentração real medida superou o limite de 1.000 ppm recomendável pela ASHRAE enquanto a concentração gerada pelo modelo ficou abaixo deste valor. Já nos casos MVR12 e MVR17, a concentração de CO₂ no experimento atingiu tal valor por volta dos 33 minutos, enquanto nos resultados do modelo, ocorreu apenas em 40 e 45 minutos, respectivamente.

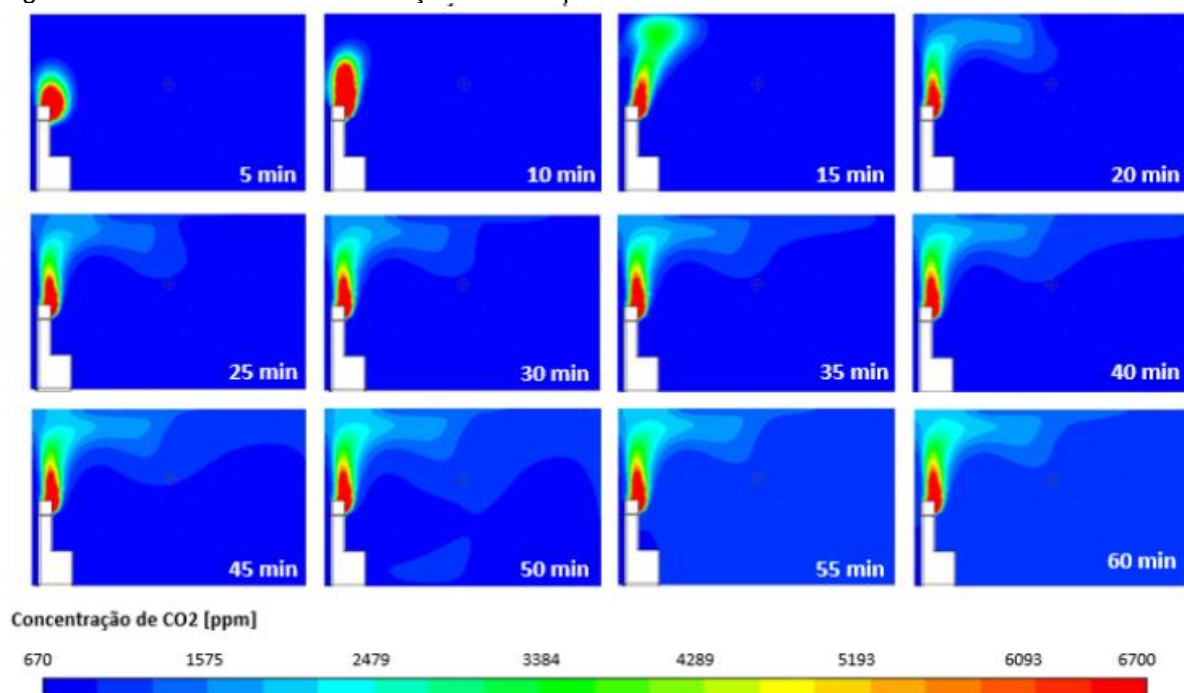
A subestimação dos valores pelo modelo matemático pode estar relacionada a diversos fatores, como, a necessidade de aproximação de algumas medidas na geometria do estudo, influenciando nos valores adotados para os dados de entrada, como a velocidade de entrada de ar no domínio.

Ainda, deve-se considerar que a taxa de emissão de CO₂ de 0,25 l/min por ocupante apontada no estudo e utilizada para calibração do modelo de longa duração proposto por Zheng *et al* (2022), foi determinada a partir de um balanço de massa, o que pode levar a incertezas associadas ao resultado. Apesar dessa taxa de emissão ser coerente ao disposto na literatura (SAKAMOTO *et al.*, 2022), para o caso específico, pode ter contribuído para o subdimensionamento da concentração obtida pelo modelo.

Foi observado também uma diferença nas dinâmicas de aumento da concentração de CO₂ no ambiente quando comparado os resultados do modelo e pelo experimento de Zheng *et al* (2022). Nos resultados do modelo, para os casos MVR17 e MVR25, há uma tendência inicial de redução, seguida por um aumento exponencial e posterior estabilização com crescimento linear nos 30 primeiros minutos de escoamento. Já nos resultados experimentais, observa-se apenas uma tendência de crescimento linear das concentrações.

Essa dinâmica de crescimento pode ser visualizada ao observar os contornos de concentração ao longo do tempo. A Figura 16 apresenta estas para o caso MVR17. É possível notar que a região em que os monitores estão localizados não é afetada diretamente após exalação de CO₂ por parte dos ocupantes, ou seja, o aumento da concentração deste poluente no ponto ocorre de forma gradual e após certo tempo de escoamento.

Figura 16: Contornos de concentração de CO₂ para o caso MVR17 a cada 5 minutos de escoamento



Primeiramente há uma tendência de ascensão do CO₂ emitido pelos ocupantes devido a diferença de pressão gerada pela entrada do ar na sala. O gás exalado leva em torno de 15 minutos para chegar à região em que ocorre o escoamento principal, ou seja, na altura da entrada de ar. Apenas após este momento, o gás é dispersado para toda a sala, visto que adentra o escoamento principal.

Observando em especial a região em que se localiza os monitores, visualiza-se um aumento da concentração apenas a partir de 40 minutos de escoamento visto que há uma alteração do intervalo da escala, agora estando sob concentrações entre 972 ppm e 1273 ppm.

Outro ponto que pode ter contribuído para tais diferenças é o espaço de tempo capturado por cada situação. A modelagem foi capaz de captar 10 vezes mais informações quando comparado ao estudo experimental visto que no modelo, utilizou-se médias de 0,5 segundos, enquanto no experimento, o sensor utilizado realizava medições a cada 5 segundos. Essa diferença de tempos de captura pode ter levado a uma observação mais sensível da dinâmica de escoamento do ar na sala e consequente dinâmica de acúmulo do poluente observado, possibilitando a visualização da redução inicial e posterior aumento.

A Figura 17 apresenta os contornos de velocidade para as diferentes estratégias de ventilação adotadas no estudo de validação. Conforme esperado, há a formação de um efeito jato na entrada de ar devido ao pequeno diâmetro, o que causa um aumento da velocidade no eixo central desta região. Além disso, conforme a velocidade de entrada aumenta, há uma ampliação das zonas de velocidades mais elevadas, bem como o aumento da velocidade de saída do domínio.

Entretanto, mesmo com o aumento da velocidade na região de entrada, grande parte da sala permanece com velocidades de ar muito baixas, principalmente na região com altura inferior a 1,5 m. Essa situação pode ser verificada também ao avaliar a Figura 18, que traz os vetores coloridos pela velocidade no plano vertical auxiliar traçado no meio da sala. É possível identificar uma pequena zona de recirculação nas proximidades da saída de ar e uma zona de estagnação próxima aos ocupantes e na região em que os sensores foram instalados.

Figura 17: Contornos de velocidade para o caso validação no plano XY em $z = 1,5$ m para as estratégias de ventilação (a) MVR12, (b) MVR17 e (c) MVR25

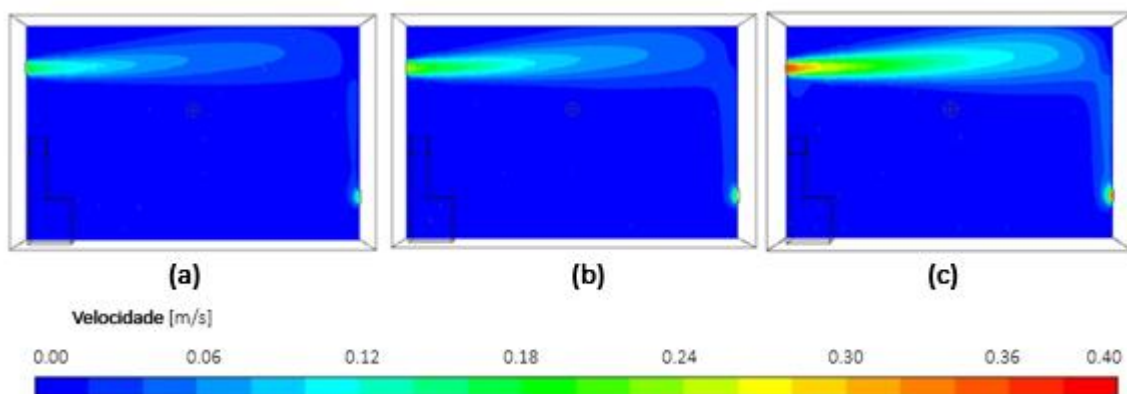
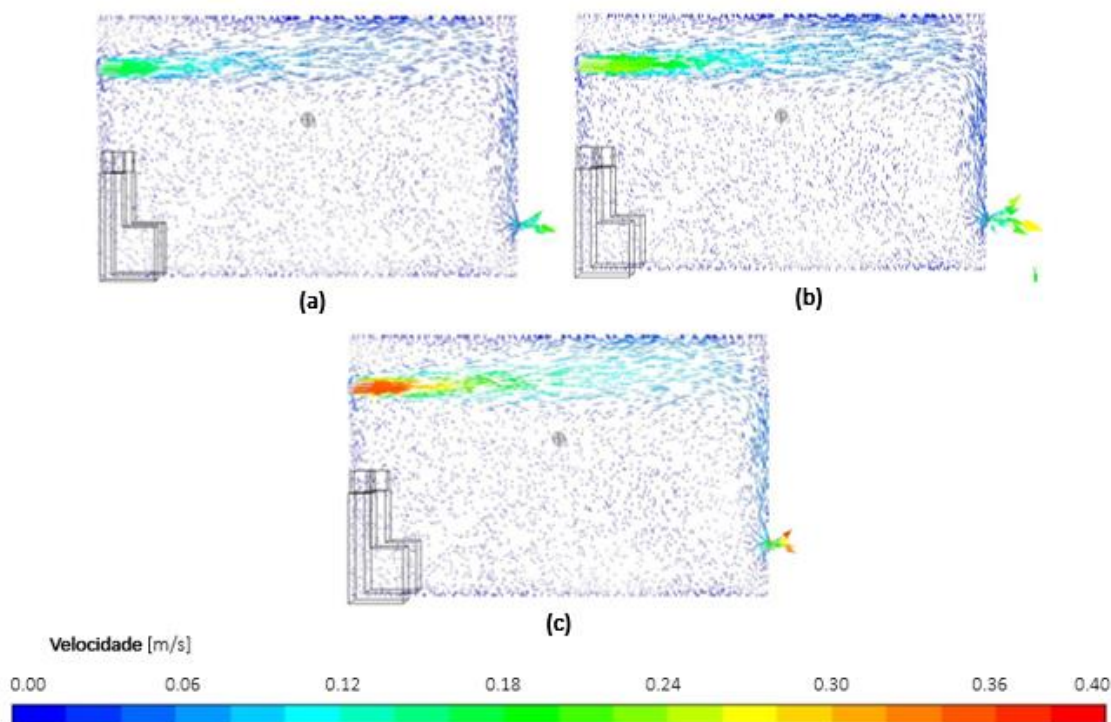


Figura 18: Vetores coloridos pela velocidade para o caso validação no plano XY em $z = 1,5$ m para as estratégias de ventilação (a) MVR12, (b) MVR17 e (c) MVR25



Além disso, é possível identificar ainda que os vetores na região próxima aos ocupantes estão predominantemente direcionados para cima ($y +$), sendo possível inferir que o CO_2 emitido por estes realizará um movimento ascendente. Tal situação pode ser comprovada ao observar os contornos de concentração nos planos verticais e horizontais auxiliares, conforme explicitados pelas Figura 19 e Figura 20.

Figura 19: Contornos de concentração de CO₂ do caso validação nos planos verticais de referência para as estratégias de ventilação (a) MVR12, (b) MVR17 e (c) MVR25

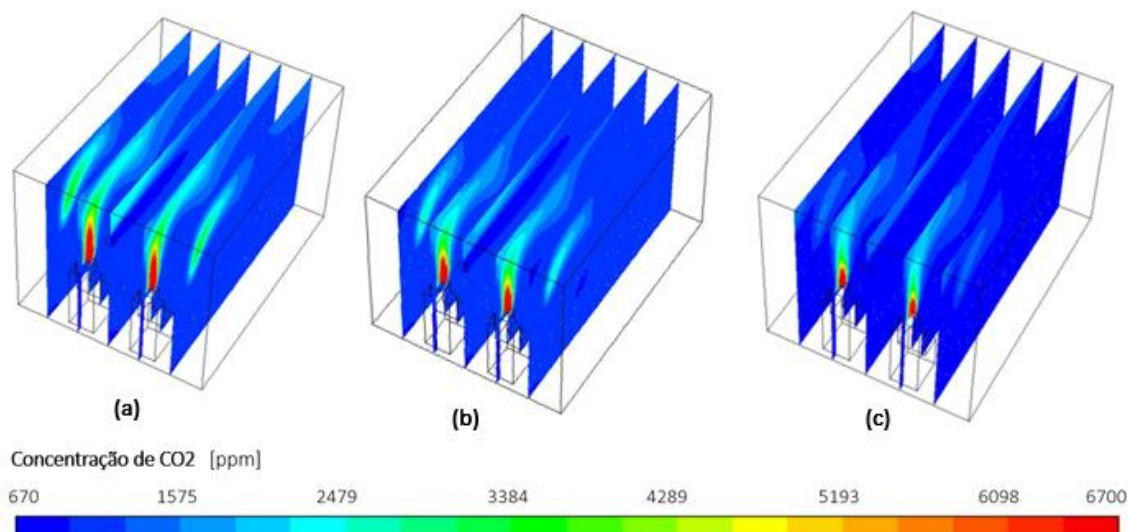
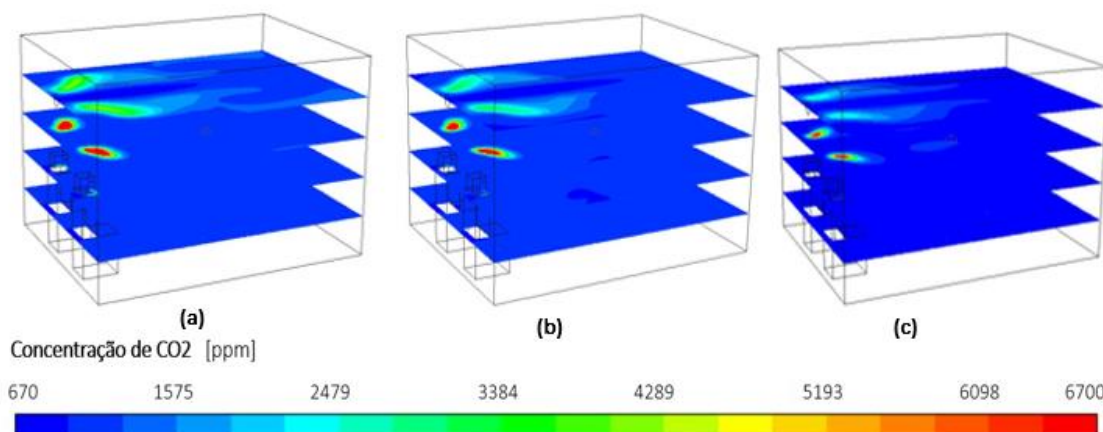


Figura 20: Contornos de concentração de CO₂ do caso validação nos planos horizontais de referência para as estratégias de ventilação (a) MVR12, (b) MVR17 e (c) MVR25

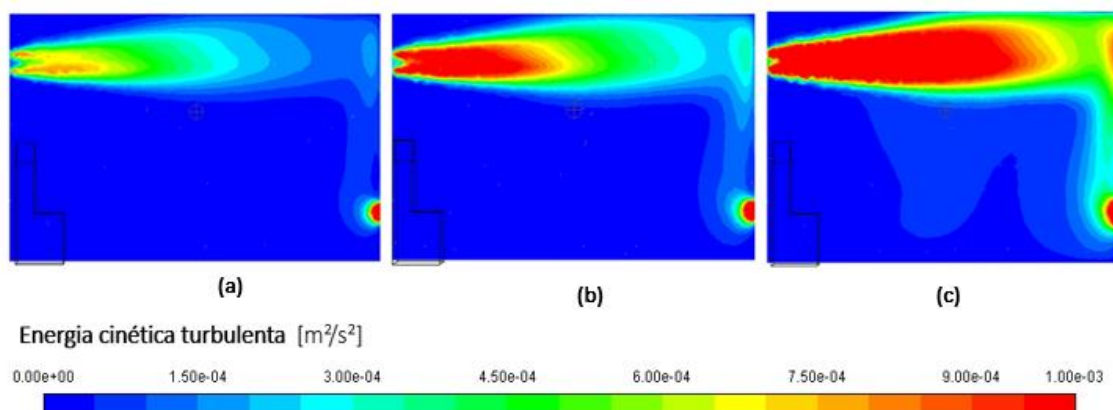


A partir da observação das figuras anteriores, é possível verificar também outro resultado esperado: melhor dispersão do poluente nos casos em que as taxas de ventilação são maiores. Tanto na Figura 19 quanto na Figura 20 é possível identificar que as zonas de concentrações mais elevadas de CO₂ decrescem e ficam mais estreitas à medida em que se aumenta a velocidade de entrada do ar. Um dos fatores que levam a esse resultado é o aumento da turbulência causado pelo aumento da velocidade de entrada.

A turbulência pode ser avaliada a partir da observação dos contornos da energia cinética turbulenta do escoamento, como ilustrado na Figura 21. Conforme pode ser visualizado, a zona de alta energia cinética turbulenta é maior para o caso em que a taxa de ventilação é maior, favorecendo assim o processo de mistura turbulenta e,

consequentemente, reduzindo o acúmulo de poluentes em zonas específicas. No cenário MVR25, o monitor está inserido numa zona de maior energia cinética turbulenta, o que corrobora com o resultado experimental e matemático de menor concentração obtido para o caso.

Figura 21: Contornos de energia cinética turbulenta para os cenários (a) MVR12, (b) MVR17 e (c) MVR25



A Tabela 13 mostra os números de Reynolds calculados para cada estratégia de ventilação utilizada. Esse número adimensional, conforme discutido anteriormente, representa a relação entre as forças inerciais e as forças viscosas de um escoamento. Conforme esperado, o número de Reynolds para o último cenário é maior.

Tabela 13: Número de Reynolds para as diferentes estratégias de ventilação do caso validação

Estratégia de ventilação	Número de Reynolds
MVR12	41.909,27
MVR17	56.700,77
MVR25	86.283,78

A partir do exposto anteriormente, verifica-se que o modelo proposto foi capaz de retratar de forma adequada e eficiente a situação estudada. Ainda que subestime algumas variáveis, os erros percentuais permaneceram inferiores a 20% em todos os cenários de ventilação.

Apesar de avaliar outro poluente em condições distintas, o estudo desenvolvido por Chauhan *et al.* (2015), apresentou consideráveis divergências entre os valores de concentrações obtidos pelo modelo e pelas medições ativas/passivas do poluente estudado, chegando a erros percentuais, em alguns pontos monitorados, de 38,5% entre os resultados do modelo e as medições ativas e de até 82,6% quando comparado os resultados do modelo e as medições passivas. Já no estudo de Venturini (2020), os erros médios permaneceram na faixa de 25%, onde o caso

simulado se tratava de concentração de CO em um estacionamento e o *software* utilizado foi o mesmo do presente estudo.

Em ambos os casos, foi considerado que o modelo representou de forma adequada a situação estudada e poderia ser utilizado para prever a distribuição do poluente em situações reais.

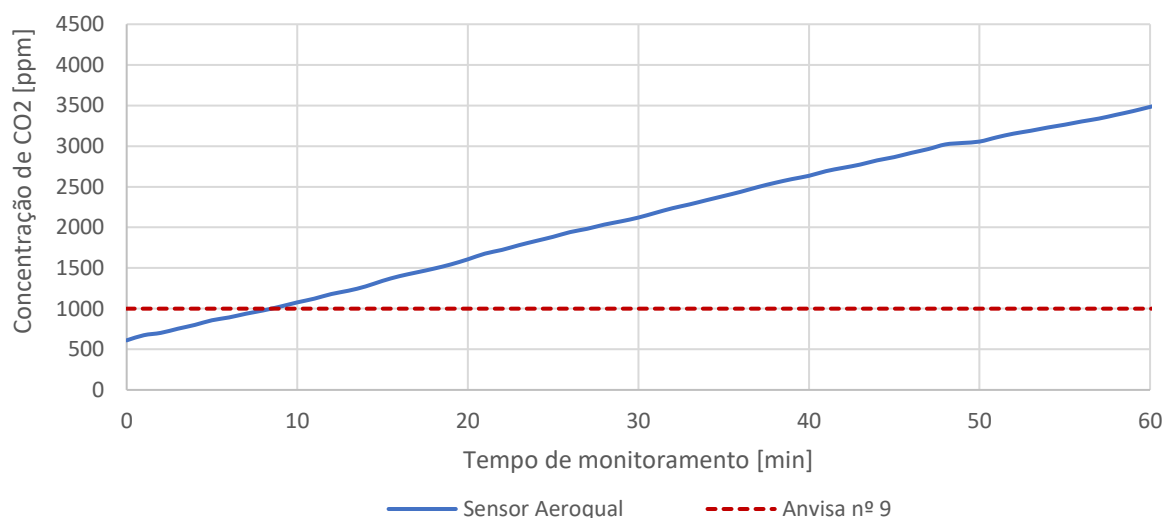
Sendo assim, o modelo desenvolvido no presente trabalho foi considerado calibrado aos fenômenos físicos, podendo ser utilizado para o estudo de situações similares.

5.2 ESTUDO DE CASO

5.2.1 Campanha experimental

O Gráfico 4 representa a evolução da concentração de CO₂ durante o monitoramento realizado na sala de aula. Ambos os parâmetros foram comparados com os limites estabelecidos pela Resolução ANVISA nº 9, de 3 de outubro de 2002.

Gráfico 4: Evolução da concentração de CO₂ durante o período monitorado na sala de aula para o cenário 1



A concentração inicial da sala era 610 ppm e em menos de 10 minutos de monitoramento, a concentração ultrapassou o limite recomendável pela Anvisa, indicando que a sala apresenta deficiência de ventilação. Ao final de 60 minutos, a concentração de CO₂ atingiu 3500 ppm.

A concentração inicial da sala era 610 ppm e em menos de 10 minutos de monitoramento, a concentração ultrapassou o limite recomendável pela Anvisa,

indicando que a sala apresenta deficiência de ventilação. Ao final de 60 minutos, a concentração de CO₂ atingiu 3500 ppm.

A Tabela 14 apresenta as intervenções que ocorreram na sala durante o período monitorado.

Tabela 14: Intervenções ocorridas durante o monitoramento

Horário	Intervenção
15:05	Início do monitoramento
15:11	Entrada de um ocupante
15:12	Entrada de um ocupante
15:20	Entrada de um ocupante
15:31	Momento de maior comunicação geral da sala, duração de aproximadamente 1 minuto
15:51	1 ocupante deixou a sala
15:56	Ocupante retorna a sala
15:58	1 ocupante deixou a sala
15:59	Ocupante retorna a sala
16:05	Aula terminou, alunos começam a se movimentar para deixar a sala
16:10	Todos deixam a sala e o equipamento é desligado

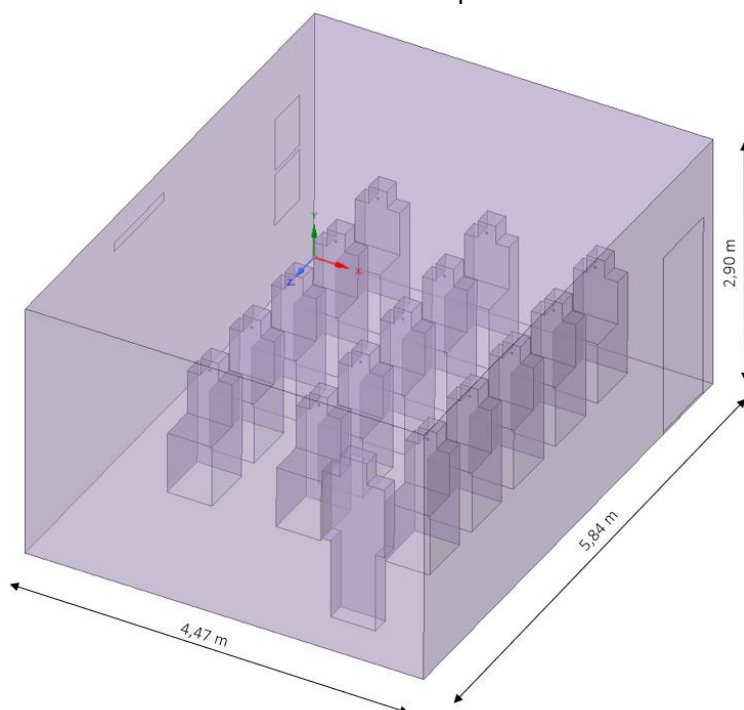
5.2.2 Modelagens

5.2.2.1 Geometrias e Malhas

Geometria I: ocupantes como blocos maciços

Na primeira geometria avaliada no estudo de caso, os ocupantes juntamente com suas carteiras, são representados como blocos maciços, conforme pode ser visualizado na Figura 22

Figura 22: Geometria I do estudo de caso: ocupantes como blocos maciços



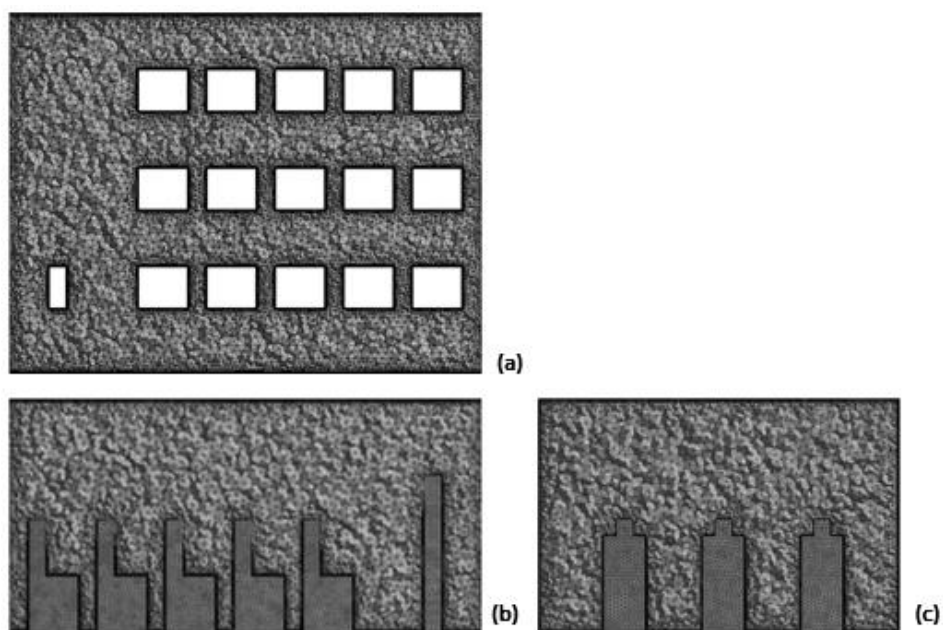
A Tabela 15 apresenta as principais características gerais da malha gerada para tal geometria.

Tabela 15: Características gerais da malha gerada para a Geometria I do estudo de caso

	Característica	Parâmetro	Valor
Construtivas	Malha em geral	Taxa de crescimento	1,30
		Tamanho máximo dos elementos	0,10
		Tamanho dos elementos	0,08
	Camada prismática de transição	Núm de elementos	3.124.727
		Núm de camadas	10
Refinamento nas faces	Taxa de crescimento	1,20	
	Tamanho dos elementos	0,04	
Qualidade		Taxa de crescimento	1,30
	Qualidade ortogonal	Médio	$0,75 \pm 0,14$
	Razão de aspecto	Médio	$6,90 \pm 6,67$
	Assimetria	Médio	$0,24 \pm 0,14$

A malha gerada foi considerada com boa qualidade para a modelagem dos casos pertinentes. A Figura 23 apresenta alguns cortes da geometria para representação da malha computacional obtida.

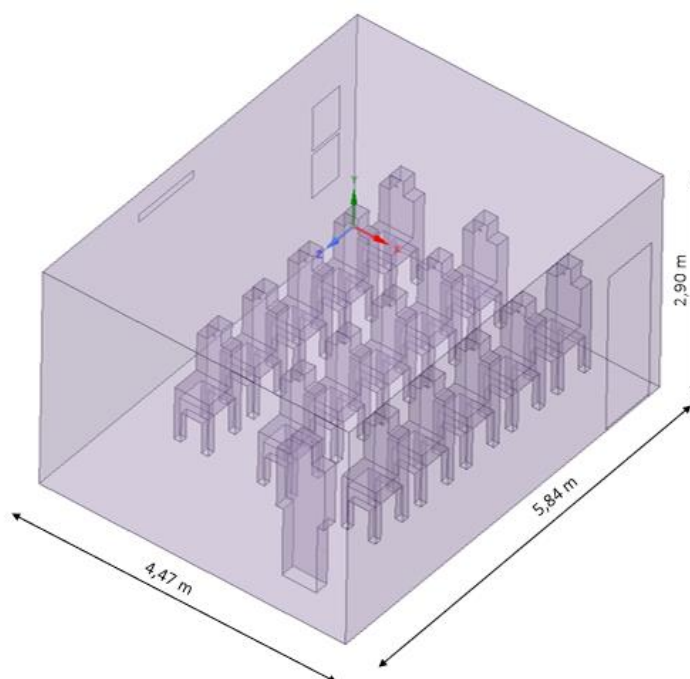
Figura 23: Vista (a) Superior, (b) Lateral e (c) Frontal da malha gerada para a Geometria I



Geometria II: ocupantes como blocos vazados

Uma segunda geometria foi estudada, incluindo agora os espaços vazados das cadeiras a fim de avaliar a influência da geometria e representação simplificada dos objetos em estudos relacionados à ventilação e qualidade do ar em ambientes interiores. A Figura 24 representa o novo domínio estudado.

Figura 24: Geometria II do estudo de caso: ocupantes como blocos vazados

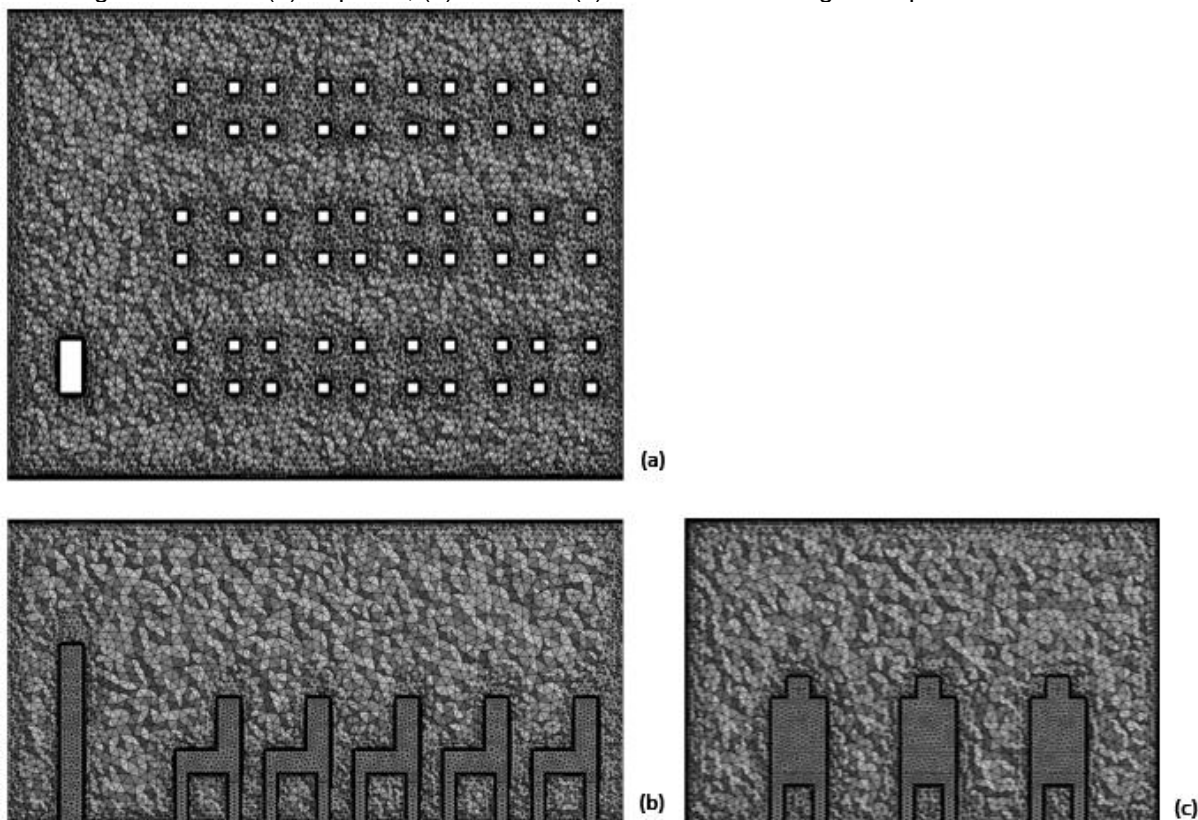


Logo, uma nova malha foi gerada. Buscou-se manter as características mais próxima possível da primeira malha para possibilitar a comparação direta dos resultados. As características e métricas da nova malha obtida podem ser verificadas nas e Tabela 16 e sua representação gráfica pode ser visualizada na Figura 25.

Tabela 16: Características gerais da malha gerada para a Geometria II do estudo de caso

	Característica	Parâmetro	Valor
Construtivas	Malha em geral	Taxa de crescimento	1,30
		Tamanho máximo dos elementos	0,10
		Tamanho dos elementos	0,08
	Camada prismática de transição	Núm de elementos	3.280.586
		Núm de camadas	10
		Taxa de crescimento	1,20
Refinamento nas faces	Tamanho dos elementos	0,04	
	Taxa de crescimento	1,30	
Qualidade	Qualidade ortogonal	Médio	$0,73 \pm 0,16$
	Razão de aspecto	Médio	$7,20 \pm 7,12$
	Assimetria	Médio	$0,26 \pm 0,16$

Figura 25: Vista (a) Superior, (b) Lateral e (c) Frontal da malha gerada para a Geometria II



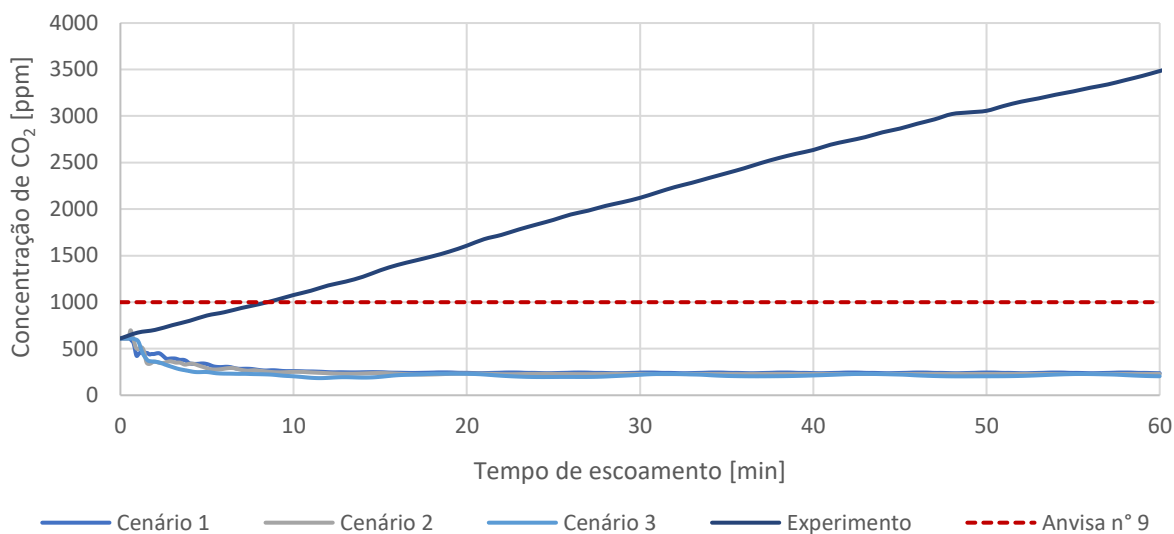
Esta malha também foi considerada de qualidade aceitável e apta a ser utilizada para as modelagens dos casos pertinentes.

5.2.2.2 Cenários 1, 2 e 3: velocidade de entrada de 3,8 m/s

Nesta seção serão apresentados e comparados os resultados obtidos para os cenários 1, 2 e 3, ou seja, aqueles cuja velocidade de entrada de ar no domínio corresponde à 3,8 m/s.

O Gráfico 5 apresenta a evolução temporal da concentração de CO₂ estimada pelo modelo para o ponto onde o sensor foi instalado. Tais resultados foram comparados com aqueles obtidos pelo experimento.

Gráfico 5: Evolução temporal da concentração de CO₂ estimada pelo modelo para os cenários 1, 2 e 3 no ponto em que o sensor foi instalado



É possível perceber que a concentração de CO₂ na sala, para os três casos, tende a decrescer, indicando que há uma boa taxa de remoção dos poluentes ou que o ponto observado não corresponde efetivamente ao ponto de acúmulo de poluentes da sala. As concentrações obtidas não são compatíveis com o observado na campanha experimental, visto que, ao final de 1 hora de monitoramento, a concentração medida chegou a níveis de 3.500 ppm.

A Tabela 17 traz os erros percentuais quando comparadas as concentrações do modelo e da campanha experimental para alguns momentos específicos. Verifica-se que, ao final da modelagem, os três casos resultaram em divergências superiores a 90%.

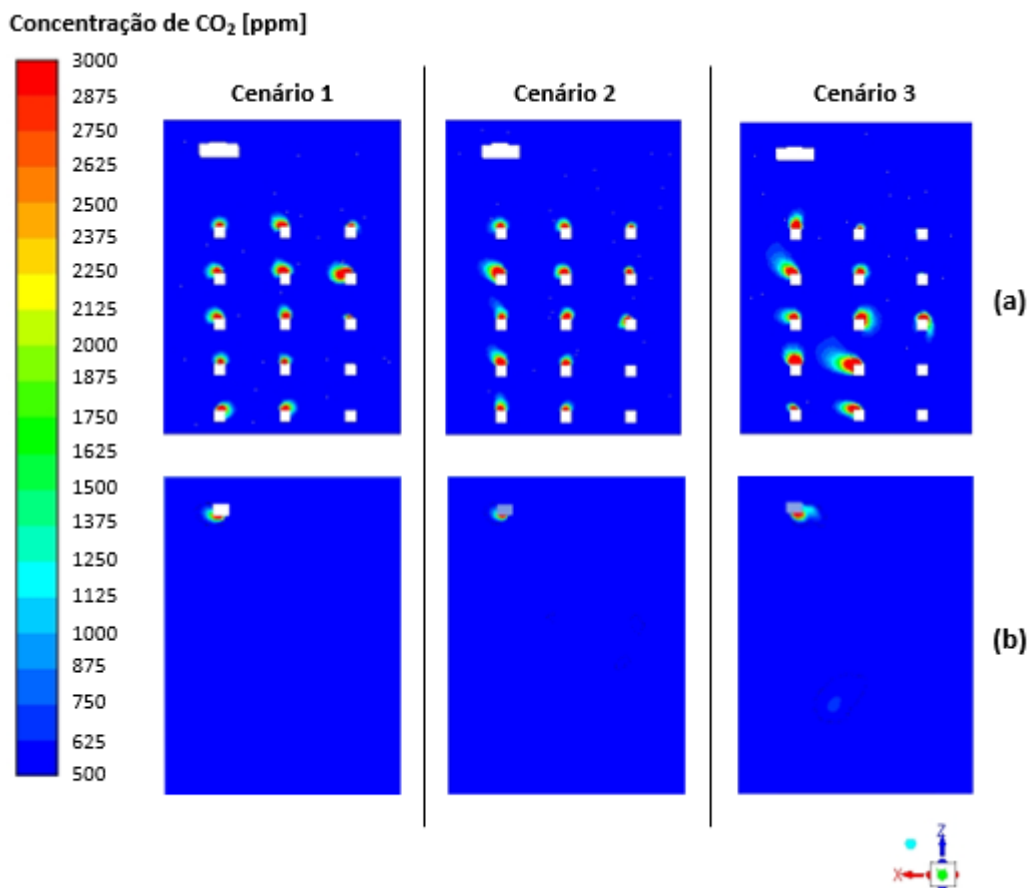
Tabela 17: Comparação entre as concentrações de CO₂ obtidas pelo modelo e pelo experimento para os cenários 1, 2 e 3

Tempo de escoamento	Concentração [ppm]			Experimento	Erro [%]		
	Cenários de modelagem				1	2	3
Min	1	2	3				
10	259,93	251,55	203,68	1077,00	75,87%	76,64%	81,09%
20	240,80	232,78	230,53	1607,00	85,02%	85,51%	85,65%
30	243,23	229,23	220,08	2121,00	88,53%	89,19%	89,62%
40	238,09	228,19	213,07	2635,00	90,96%	91,34%	91,91%
50	244,19	228,25	204,06	3056,00	92,01%	92,53%	93,32%
60	236,92	228,34	204,24	3483,00	93,20%	93,44%	94,14%

Abaixo são disponibilizados os contornos de concentração para os cenários avaliados nesta seção. Observa-se que, mesmo apresentando os menores resultados de concentração para o ponto em que o sensor foi instalado, o caso em que a entrada de

ar no domínio se dá a 45° na face do ar-condicionado (cenário 3), proporciona maiores zonas de elevadas concentrações de CO₂ nas proximidades da maioria dos ocupantes.

Figura 26: Contornos de concentração de CO₂ para os cenários 1, 2 e 3 nos planos (a) “Nariz-aluno” (b) “nariz-professor”



Constata-se também que, em todos os cenários, mesmo a sala apresentando concentração média de CO₂ de até 625 ppm, nas regiões próxima aos ocupantes há concentrações que podem chegar ou ultrapassar 3.000 ppm, o que é superior ao limite de 1000 ppm estabelecido pela Resolução Anvisa n° 9.

Para os casos em que o ar entra no domínio perpendicularmente a face do ar-condicionado (cenários 1 e 2), a velocidade em toda a sala se apresenta menos uniforme, ao contrário do observado para o cenário 3. Tal situação pode ser verificada na Figura 27, que traz os contornos de velocidade para os três cenários.

A alteração da geometria, entre o primeiro e segundo cenário, não gerou significativas alterações no campo de velocidades, visto que a sala ainda apresenta zonas de

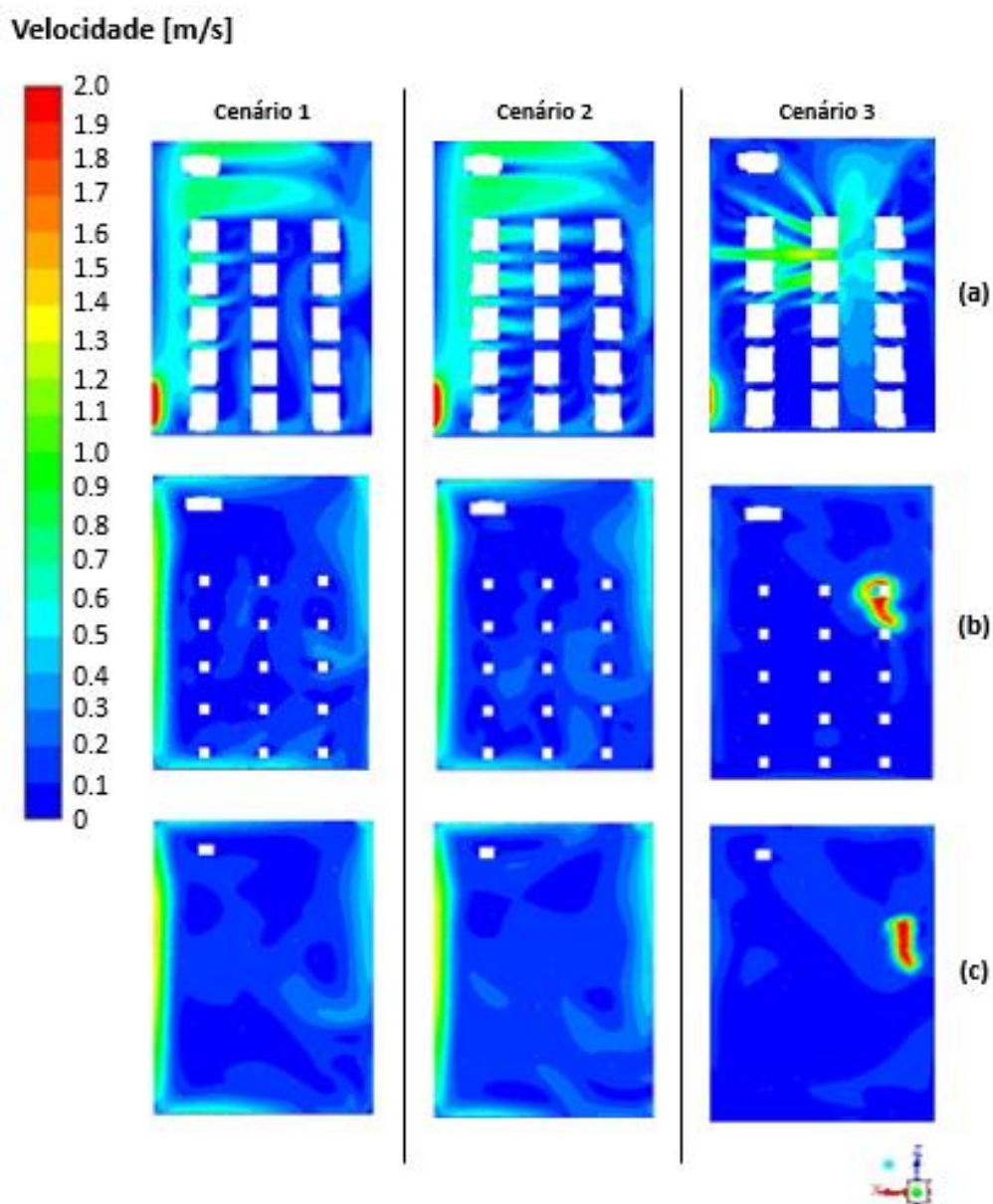
maiores velocidades nas proximidades das paredes laterais e ao centro direito nos planos superiores. Além disso, o padrão de escoamento formado próximo ao chão também não é significativamente alterado.

Entretanto, quando se altera a direção de entrada do ar no domínio, um grande efeito no escoamento é causado, visto que, agora, as maiores velocidades são concentradas ao redor das posições 6, 7, 11 e 12, uma vez que estão sobre influência direta do jato criado pelo ar-condicionado.

Ainda, conforme explicitado anteriormente, a velocidade encontrada na sala de aula neste cenário é menor, principalmente na região próxima ao nariz dos alunos, conforme pode ser visto na Figura 27 (b). Tal situação prejudica a dispersão do poluente emitido e conseqüentemente, leva a um acúmulo deste nas proximidades dos ocupantes, gerando maiores zonas de altas concentrações.

Conforme já visto, maiores velocidades levam a uma melhor dispersão do poluente, visto que aumentam a intensidade da turbulência e conseqüentemente, a dispersão turbulenta. No estudo de caso, observa-se velocidades superiores àquelas observadas no caso de validação, sendo assim, as zonas de altas concentrações de CO₂ são menores. Além disso, no cenário cuja velocidade no domínio é menor, a dispersão é prejudicada.

Figura 27: Contornos de velocidade para os cenários 1, 2 e 3 nos planos (a) “0.1-chao” (b) “nariz-aluno” e (c) “nariz-professor”

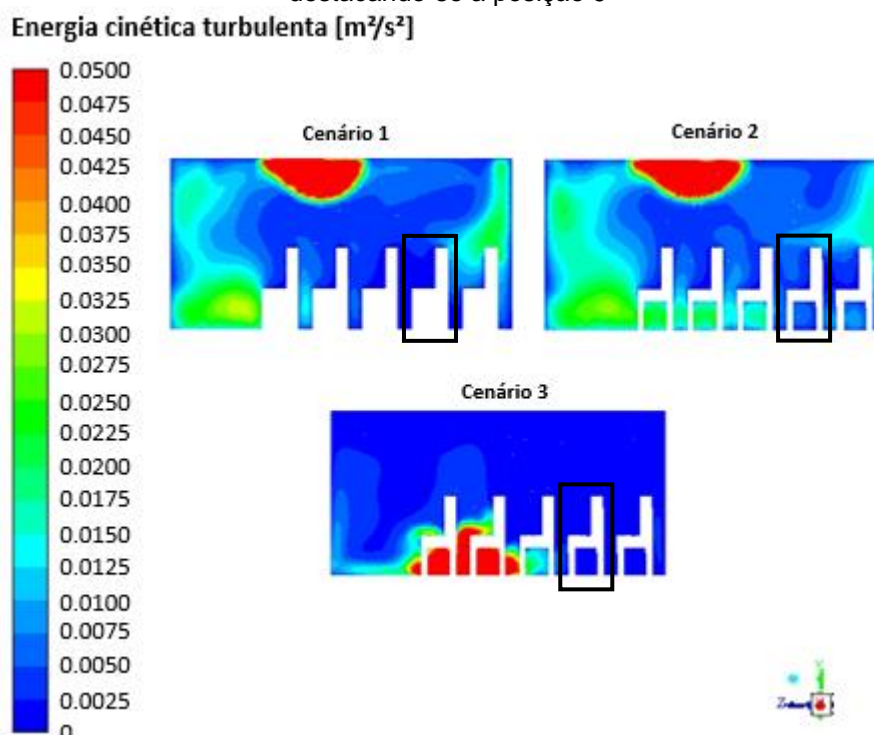


Quando comparado aos valores recomendáveis pela Resolução Anvisa nº 9, a maior parte dos alunos se encontram em zonas com velocidades do ar aceitáveis, inferiores a 0,3 m/s nos cenários 1 e 2. Entretanto, sobre certas circunstâncias, os alunos da linha 5 e os alunos das posições 11, 12 e 13 podem experimentar velocidades um pouco mais elevadas, chegando a 0,5 m/s.

Já para o cenário 3, os alunos das posições 11 e 12 são expostos a velocidades do ar muito elevadas, podendo chegar a 2 m/s. Os demais alunos da sala estão em zonas cuja velocidade do vento está de acordo com o estabelecido pela Anvisa.

Observando mais a fundo a posição 9, a qual apresentou a maior diferença de tamanho das plumas entre os cenários, constata-se que a região em que este ocupante se localiza realmente é uma região de menor turbulência (Figura 28) quando sobre a estratégia de ventilação do cenário 3, fator esse que prejudica a dispersão do poluente emitido por ele.

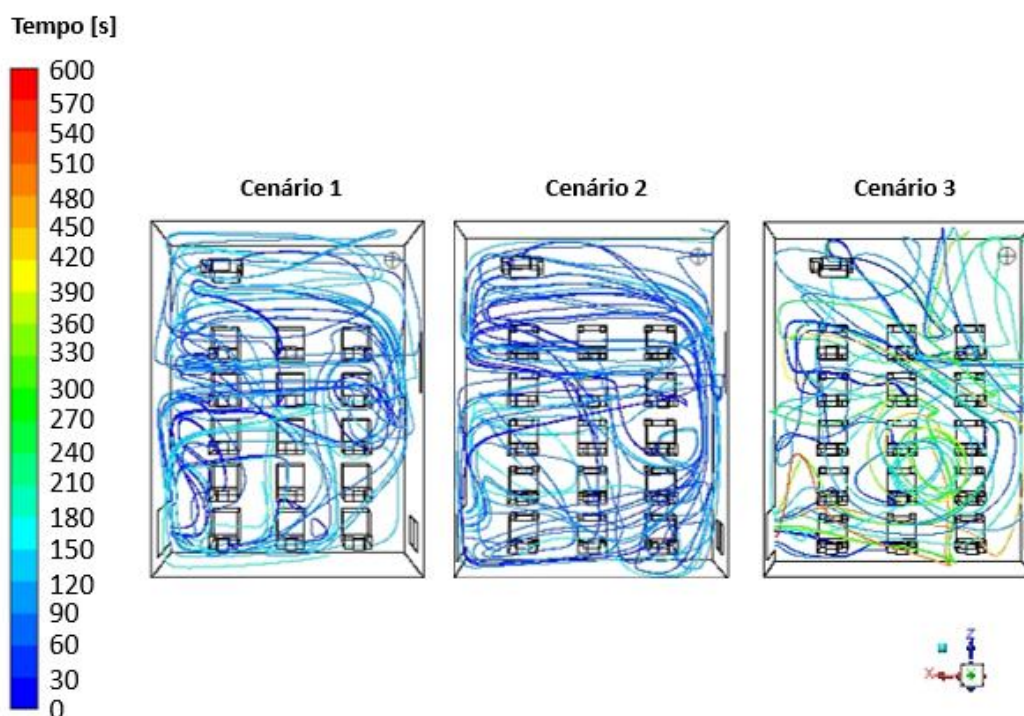
Figura 28: Contorno de energia cinética turbulenta para os cenários 1, 2 e 3 no plano “fileira-2”, destacando-se a posição 9



As menores concentrações observadas para o cenário 3 no ponto do monitor se deve ao padrão de escoamento formado na sala. Devido a divisão do escoamento principal em vários braços, há a formação de uma zona de alta turbulência próxima ao local do monitor e que abrange a região em que os alunos das proximidades emitem o CO₂, o que leva a rápida dispersão deste e conseqüente não acúmulo no canto da sala.

Além disso, ao observar as trajetórias das partículas de CO₂ emitida pelos ocupantes, é possível verificar que poucas dessas chegam a efetivamente atingirem o canto em que o monitor está instalado devido a dinâmica do escoamento gerado na sala. Tal fato contribui para a menor concentração observada neste ponto para este cenário 3.

Figura 29: Trajetória das partículas de CO₂ emitidas pelos ocupantes coloridas pelo tempo para os cenários 1, 2 e 3

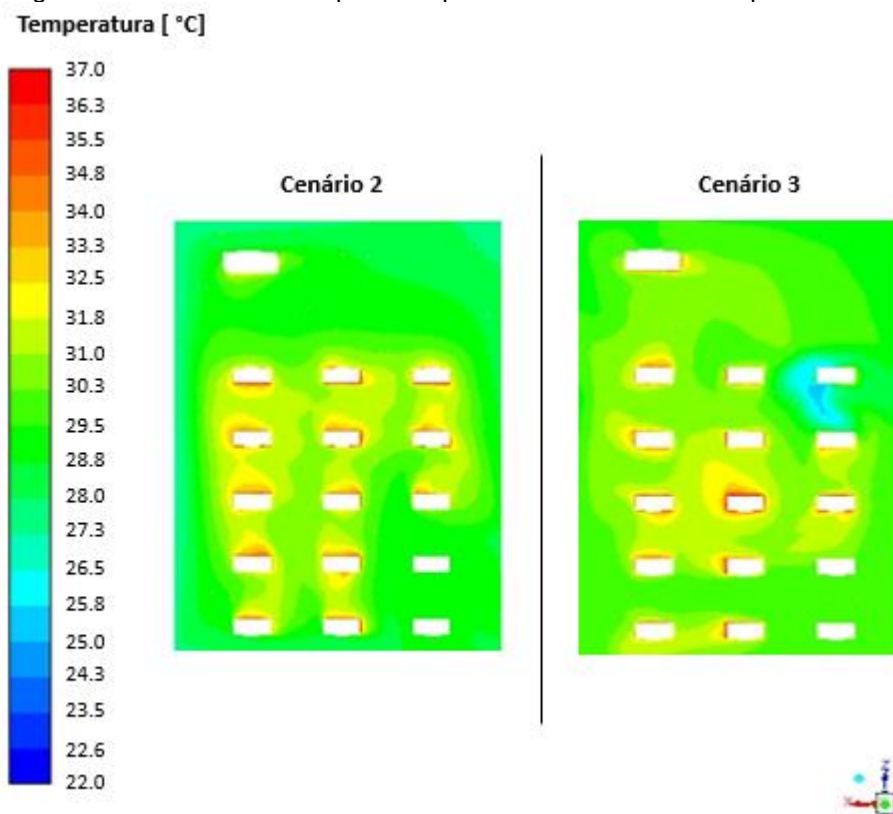


Ao observar os contornos de temperatura, conforme explicitado na Figura 30, constata-se que a temperatura média da sala se mantém na faixa de 28 – 30 °C, o que está acima do valor máximo recomendado pela Resolução Anvisa n° 9 para o verão, que é de 26°C.

O caso em que o ar entra no domínio perpendicularmente à face do ar-condicionado apresenta melhor desempenho na manutenção do conforto térmico, visto que, ao mesmo tempo que mantém a temperatura praticamente estável em toda a sala, apresenta também maiores velocidades de ar, o que pode amenizar a sensação de calor dos ocupantes e proporcionar uma melhor aceitabilidade térmica.

No caso em que a entrada de ar se dá com angulação de 45°, é possível notar a formação de uma zona quente ao centro da sala, próximo ao ocupante 8 (na faixa de 31°C a 32,5°C), e a formação de uma zona de temperaturas mais amenas (na faixa de 25°C e 26,5°C), próximo aos ocupantes 11 e 12. Tais temperaturas, alinhadas à baixas e altas velocidades do ar, respectivamente, podem prejudicar a percepção de conforto térmico desses ocupantes.

Figura 30: Contorno de temperatura para os cenários 2 e 3 no plano "monitor"



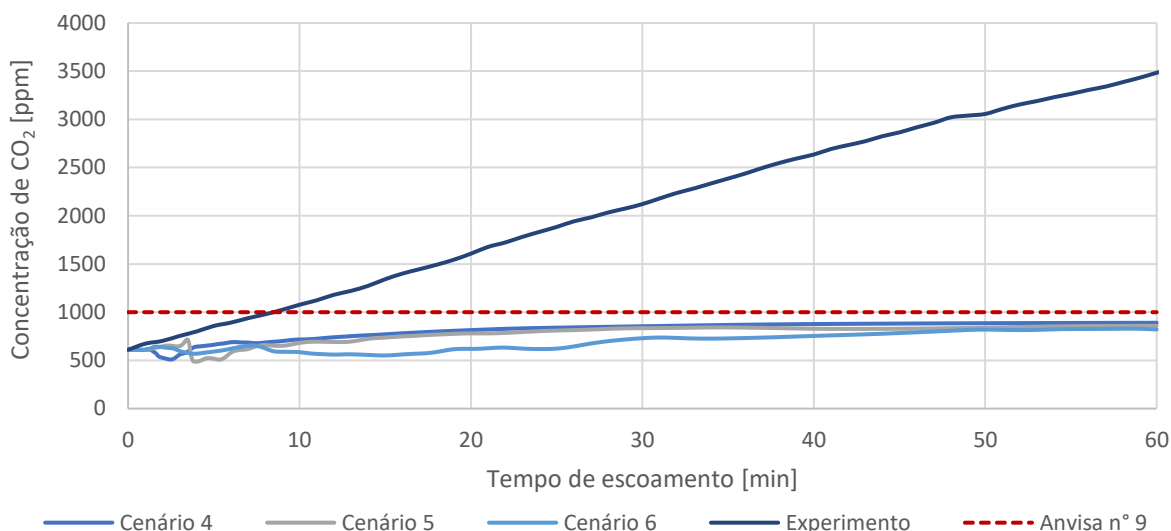
Em resumo, quando comparado os três cenários, o cenário 2 se apresentou mais satisfatório visto que é capaz de manter melhores condições de ventilação na sala, o que leva a menores concentrações de CO₂, e proporciona melhores condições de conforto térmico a maior parte dos ocupantes.

5.2.2.3 Cenários 4, 5 e 6: velocidade de entrada de 1,0 m/s

Nesta seção serão apresentados e comparados os resultados obtidos para os cenários 4, 5 e 6, que são correspondentes aos cenários 1, 2 e 3, respectivamente, sendo apenas alterada a velocidades de entrada de ar no domínio, que agora corresponde 1,0 m/s.

O Gráfico 6 apresenta a evolução temporal da concentração de CO₂ estimada pelo modelo para os referidos cenários no ponto onde o sensor foi instalado. Tais resultados foram comparados com aqueles obtidos pelo experimento.

Gráfico 6: Evolução temporal da concentração de CO₂ estimada pelo modelo para os cenários 4, 5 e 6 no ponto em que o sensor foi instalado



Para estes cenários, é possível perceber que a concentração de CO₂ na sala aumentou, diferentemente do observado para os casos de 3,8 m/s. Entretanto, tal crescimento se deu a uma taxa significativamente inferior à observada no experimento. Respectivamente, as taxas de crescimento para os casos 4, 5 e 6, foram de 4,67, 4,14 e 3,53, enquanto a observada no experimento foi de 48,17, ou seja, cerca de 10 vezes superior.

A Tabela 18 traz os erros percentuais quando comparadas as concentrações do modelo e do experimento para alguns momentos específicos. Verifica-se que os erros obtidos para esses cenários foram menores quando comparados aos obtidos para os cenários 1, 2 e 3, mesmo assim permanecem elevados, na faixa média de 75% de divergência.

Tabela 18: Comparação entre as concentrações de CO₂ obtidas pelo modelo e pelo experimento para os cenários 4, 5 e 6

Tempo de escoamento	Concentração [ppm]					Erro [%]		
	Seg	Min	Cenários de modelagem			Experimento	4	5
600	10	716,45	681,52	585,28	1077,00	33,48%	36,72%	45,66%
1200	20	814,19	779,70	619,38	1607,00	49,33%	51,48%	61,46%
1800	30	853,90	834,23	730,07	2121,00	59,74%	60,67%	65,58%
2400	40	876,89	828,23	753,72	2635,00	66,72%	68,57%	71,40%
3000	50	885,59	839,52	819,39	3056,00	71,02%	72,53%	73,19%
3600	60	890,07	858,28	821,30	3483,00	74,45%	75,36%	76,42%

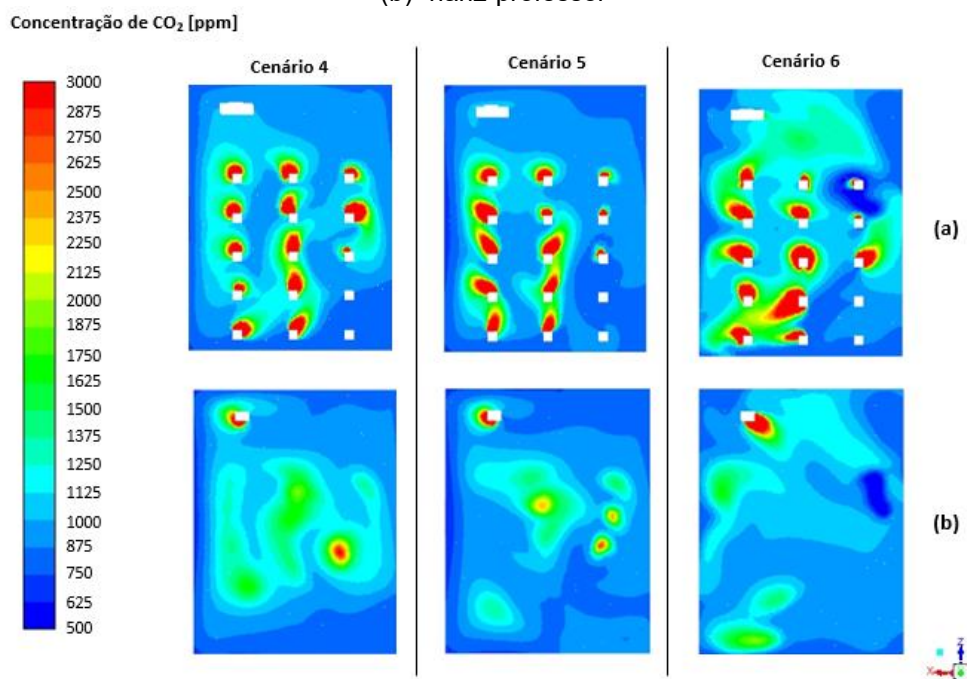
Em conformidade com o comportamento observado para os três primeiros cenários, a concentração estimada pelo modelo para o ponto do sensor no cenário 6, cuja

entrada de ar se dá a 45°, é menor quando comparado aos casos em que a entrada de ar ocorre perpendicularmente à face do ar-condicionado.

Corroborando com o observado no caso validação, as concentrações de CO₂ observadas nos contornos (Figura 31) para os cenários 4, 5 e 6 são mais altas e as plumas mais extensas quando comparadas as plumas dos cenários 1, 2 e 3, visto que a velocidade média do escoamento é mais baixa, o que prejudica a dispersão.

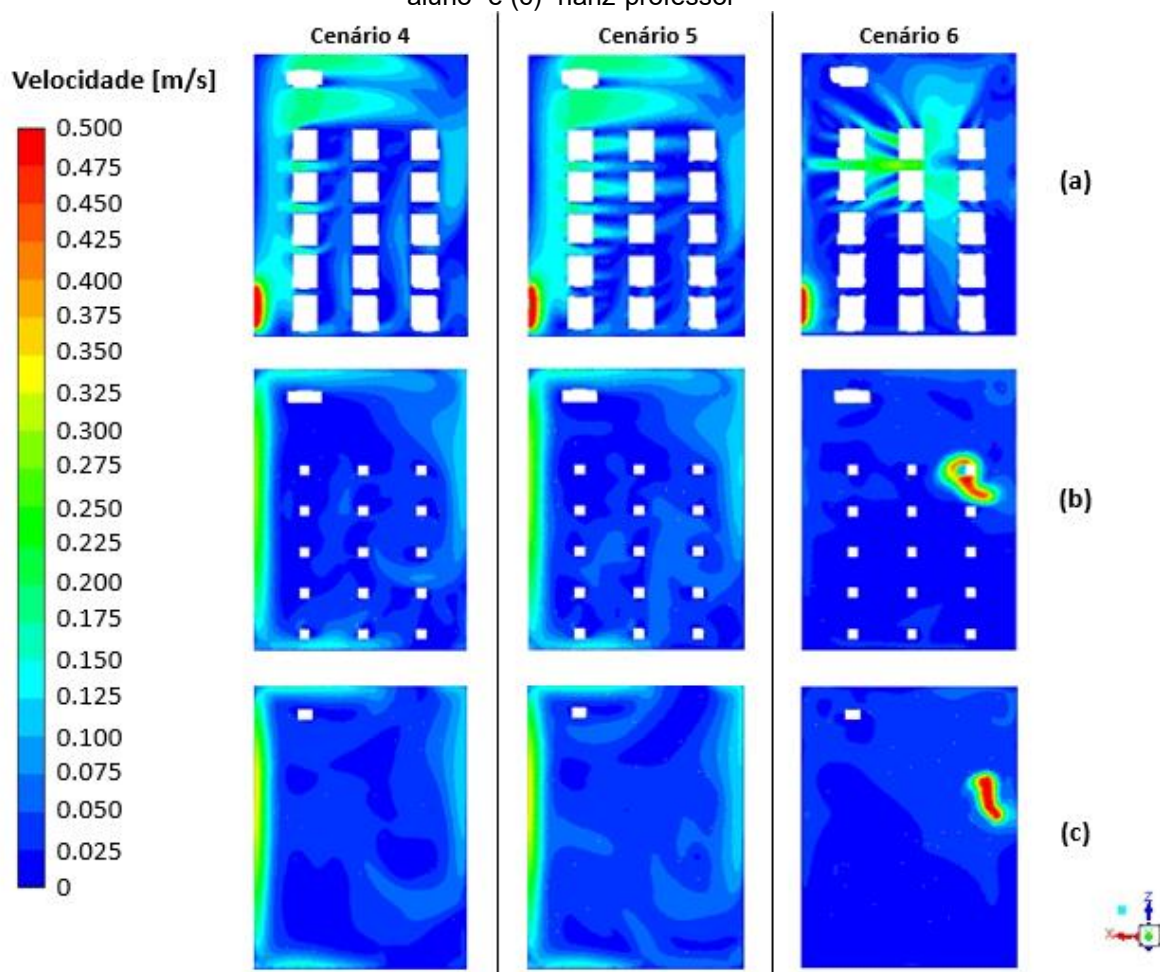
Assim como constatado também para os casos cuja velocidade de entrada era de 3,8 m/s, o caso em que a entrada de ar se dá a 45° apresenta maiores zonas de altas concentrações, apesar de ter apresentado resultados inferiores de concentração para o ponto do monitor.

Figura 31: Contorno de concentração de CO₂ para os cenários 4, 5 e 6 nos planos (a) “nariz-alunos”
(b) “nariz-professor”



As maiores zonas de concentração neste cenário ocorrem devido à baixa velocidade de escoamento observado em toda a sala. Conforme identificado na Figura 32, a velocidade na sala é mais homogênea e, na altura em que a maior parte do CO₂ é emitido, ou seja, na altura do nariz dos alunos, ela é muito baixa, sendo algumas vezes inferior a 0,05 m/s.

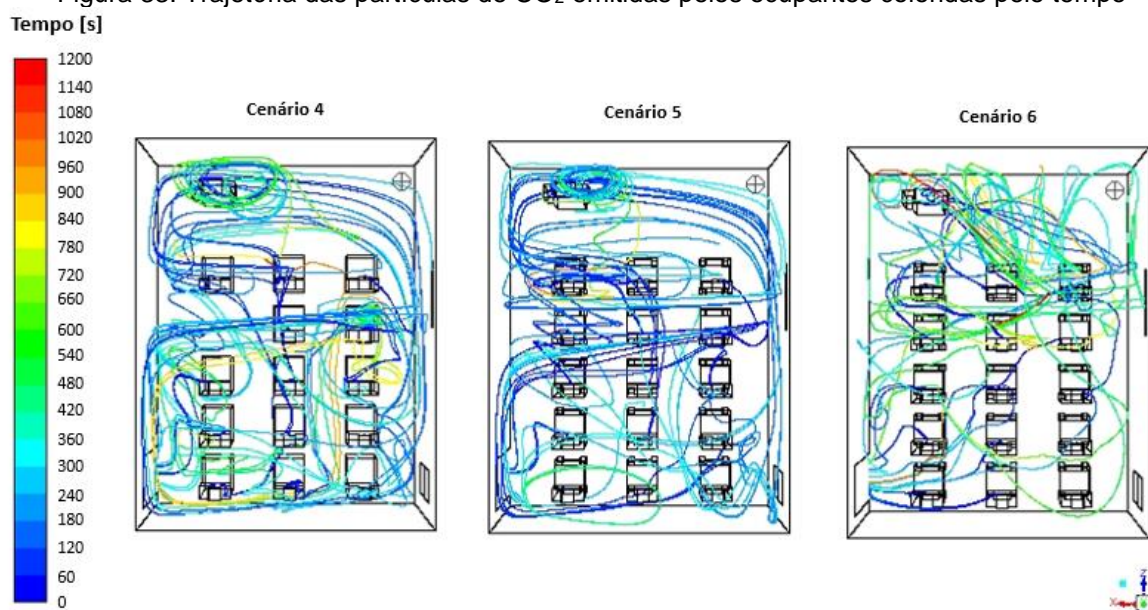
Figura 32: Contorno de velocidades para os cenários 4, 5 e 6 nos planos (a) "0.1-chao", (b) "nariz-aluno" e (c) "nariz-professor"



Já as menores concentrações observadas no ponto do monitor para tal cenário podem ser explicadas observando as trajetórias das partículas de CO₂ emitidas pelos ocupantes. Observa-se que para o cenário 6, assim como averiguado no cenário 3, grande parte das partículas não chegam a passar pelo monitor devido ao escoamento mais desordenado que é formado próximo a esta região.

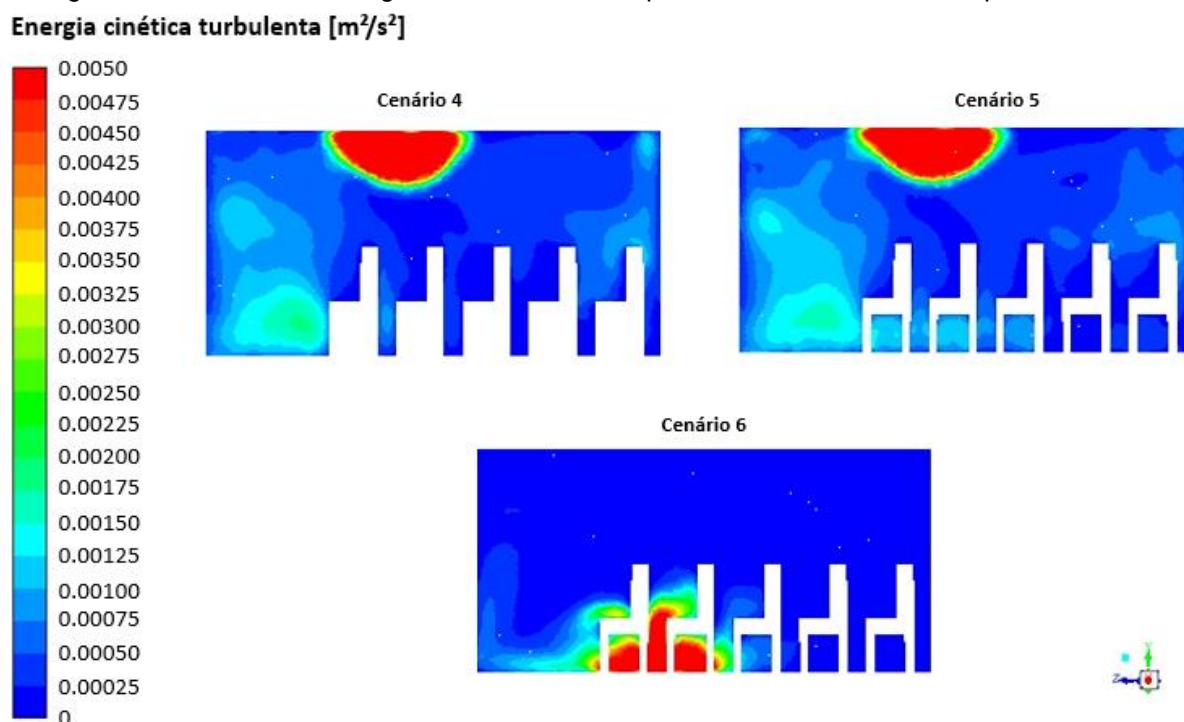
Conforme visto, após atingir o chão, o escoamento principal se divide em diversos braços, criando uma zona de maior turbulência que colabora com a dispersão das partículas de CO₂ nesta região e em suas proximidades.

Figura 33: Trajetória das partículas de CO₂ emitidas pelos ocupantes coloridas pelo tempo



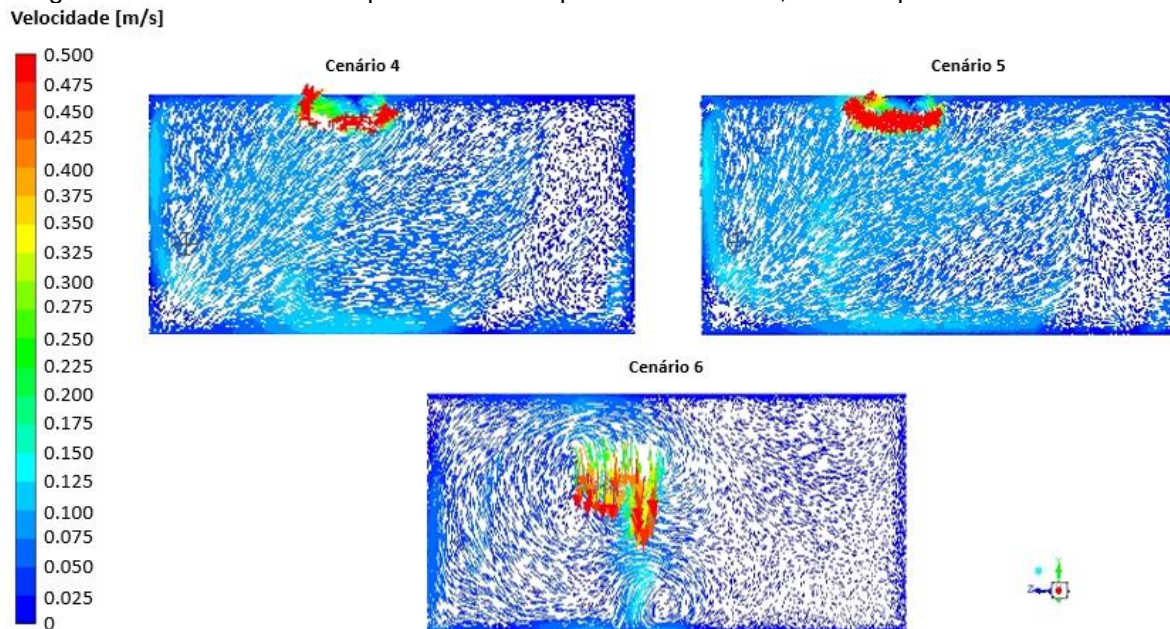
O contorno de energia cinética turbulenta no plano que passa sobre a fileira 2, conforme indica a Figura 34, mostra justamente esta zona de alta turbulência gerada próximo ao chão para o cenário 6 e que não pode ser observada nas mesmas proporções para os cenários cuja entrada de ar se dá perpendicularmente à face do ar-condicionado.

Figura 34: Contorno de energia cinética turbulenta para os cenários 4, 5 e 6 no plano "fileira-2"



Além disso, em todos os casos, as partículas que estão próximas à região do monitor tendem a serem rapidamente carregadas para cima, visto a direção dos vetores de velocidade, como pode ser visualizado na Figura 35. Tal comportamento ocorre também para os cenários em que a velocidade de entrada no domínio é de 3,8 m/s.

Figura 35: Vetores coloridos pela velocidade para os cenários 4, 5 e 6 no plano "vertical-monitor"



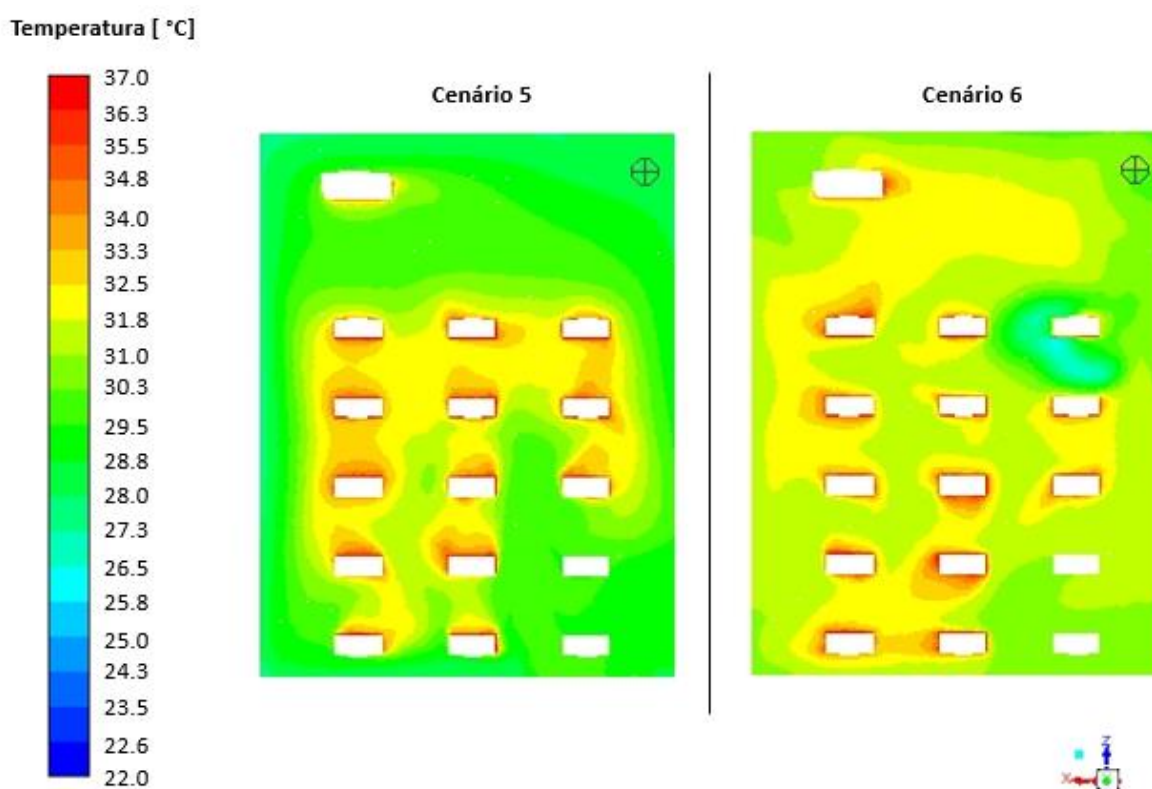
Ainda quanto à concentração de CO_2 , constata-se que a maior parte dos ocupantes estão constantemente expostos a níveis superiores a 1500 ppm, situação que está em desacordo com o estabelecido pela resolução Anvisa n° 9. Entretanto, não foi possível identificar pontos ou zonas da sala de aula na qual este acúmulo ocorresse preferencialmente a não ser nas proximidades dos alunos, que são as próprias fontes. Nessas regiões, concentração muitas vezes chega a atingir ou ultrapassar 3.000 ppm, podendo levar a efeitos sobre a concentração e capacidade cognitiva do pessoal exposto.

Observa-se também que para os cenários 5 e 6, os ocupantes das posições 11 e 12 são beneficiados pelo padrão de escoamento da sala, que impede o acúmulo do CO_2 nas suas proximidades. Ao mesmo tempo, tais posições são desfavorecidas quando se observa a velocidade do vento no cenário 6. Estes ocupantes são expostos a velocidades superiores ao limite estabelecido pela Anvisa, que é de 0,25 m/s. Todos os demais ocupantes estão em regiões cuja faixa de velocidades é adequada.

Dentre os dois cenários avaliados, ambos apresentaram temperaturas superiores ao recomendável pela Anvisa, na faixa de 30°C e 32°C respectivamente para os cenários 5 e 6. Notadamente, a situação gerada pelo cenário 6 é pior do que aquela gerada pelo cenário 5.

Entretanto, em ambos os casos, tal situação pode levar a sensações de desconforto térmico uma vez que a velocidade do ar nesses cenários é baixa. No cenário 6, os ocupantes das posições 11 e 12 são favorecidos por estarem em posições que recebem diretamente o jato do ar-condicionado a temperaturas mais baixas. Entretanto, quando alinhado com velocidades altas, também pode levar a sensações de desconforto térmico.

Figura 36: Contorno de temperaturas para os cenários 5 e 6 no plano "monitor"



Sendo assim, o cenário que proporciona um ambiente interior mais confortável é o cenário 5, visto que leva a uma melhor dispersão do CO₂ emitido pelos ocupantes, evitando o acúmulo em certos pontos, apresenta uma melhor distribuição de temperaturas alinhado a velocidades de ar dentro do estipulado pela Anvisa.

Além disso, conforme observado para os cenários cuja velocidade de entrada se dava a 3,8 m/s, a alteração da geometria não proporciona grandes ganhos marginais na qualidade do ambiente avaliado.

Entretanto, quanto à direção de entrada do ar no domínio, é possível perceber uma significativa melhoria nas condições ambientais da sala para o caso em que o ar entra perpendicularmente à face, visto que as zonas de altas concentrações aumentaram nas proximidades dos ocupantes, a velocidade de ar no domínio reduziu e, ainda, proporcionou maiores temperaturas em todo o domínio.

5.3 PROPOSTA DE MELHORIA

Diante dos resultados obtidos no estudo de caso, foram adicionalmente propostos mais 3 cenários, buscando melhorar a qualidade da ventilação na sala e, conseqüentemente, aumentar o conforto dos ocupantes.

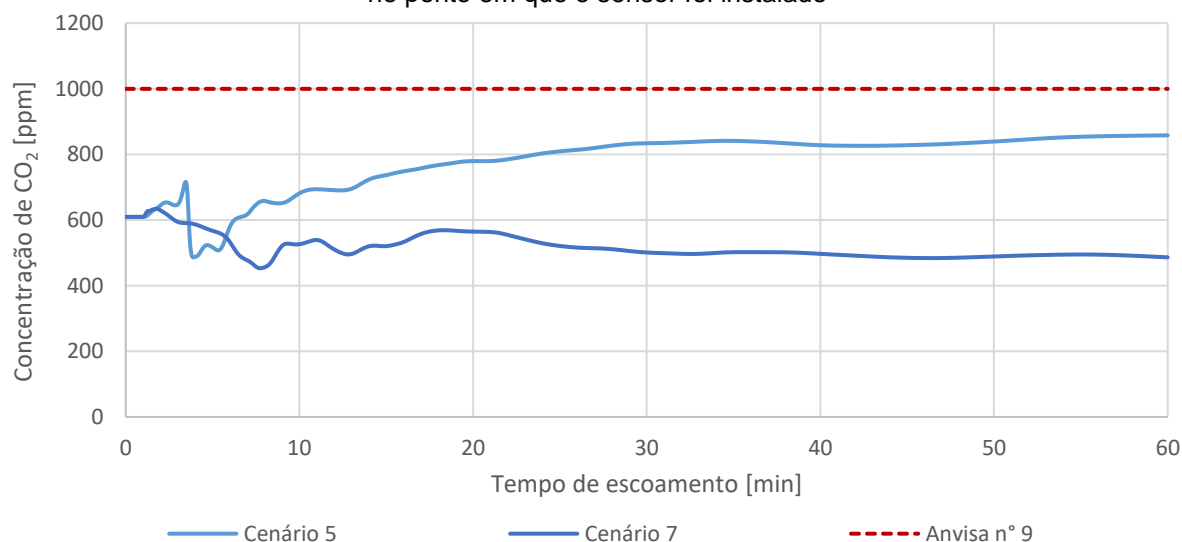
5.3.1 PORTA E JANELAS ABERTAS

Neste cenário, modelou-se a situação em que o aparelho de ar-condicionado é mantido ligado, mas as janelas e a porta estão abertas, de forma a comparar os resultados diretamente com o cenário 5. Este foi chamado de cenário 7.

Para a realização da modelagem em si, alterou-se a condição de contorno das janelas e da porta de “parede” para “entrada com velocidade constante” e “saída de pressão” respectivamente. Foi adotada uma velocidade de 0,7 m/s para as janelas, visto que este foi o valor determinado com o auxílio do anemômetro de fio quente, conforme descrito na metodologia. Para a porta, adotou-se saída para pressão atmosférica, visto que não há sistema de exaustão presente na sala. Foram mantidas as condições iniciais e de contorno para as demais fronteiras do domínio.

O Gráfico 7 indica a evolução temporal da concentração de CO₂ na sala para este cenário.

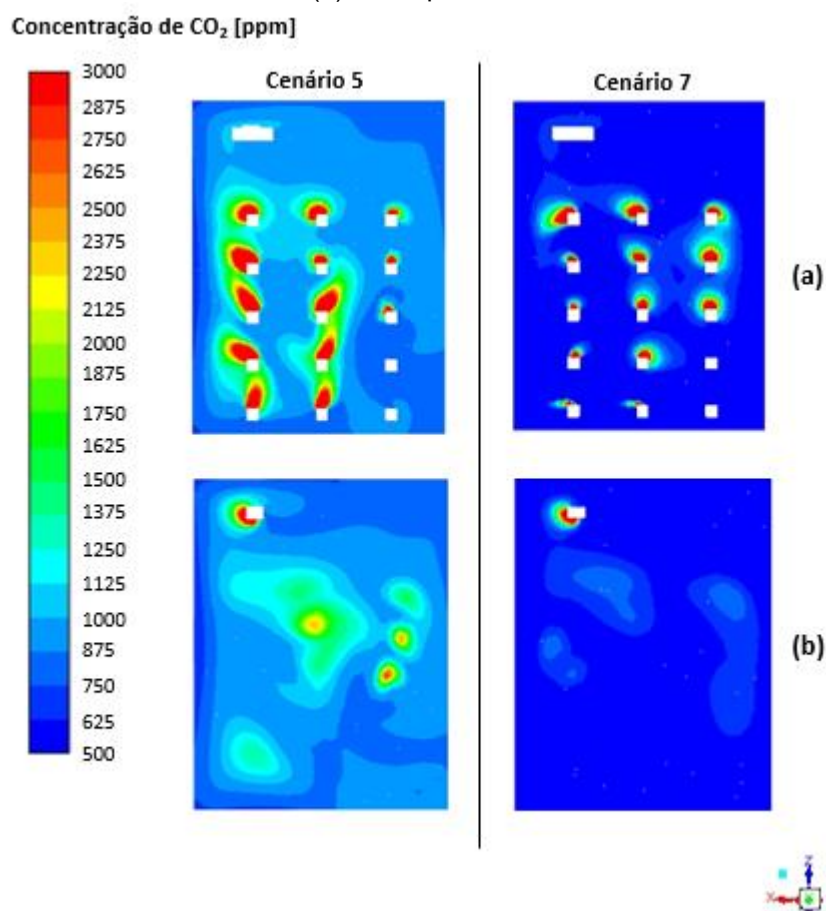
Gráfico 7: Evolução temporal da concentração de CO₂ estimada pelo modelo para os cenários 5 e 7 no ponto em que o sensor foi instalado



Observa-se que as concentrações no ponto em que o monitor foi instalado para o cenário em que se considera as janelas e a porta aberta são cerca de 350 ppm inferiores, o que indica que o cenário 7 possivelmente apresenta importantes melhorias na ventilação da sala. Em ambos os casos, as concentrações observadas no referido ponto estavam dentro do valor estipulado pela Resolução Anvisa nº 9.

Para melhor compreensão dos benefícios da abertura das janelas e da porta, os contornos de concentração de CO₂, velocidade e temperatura foram avaliados e comparados com os obtidos para o cenário 5.

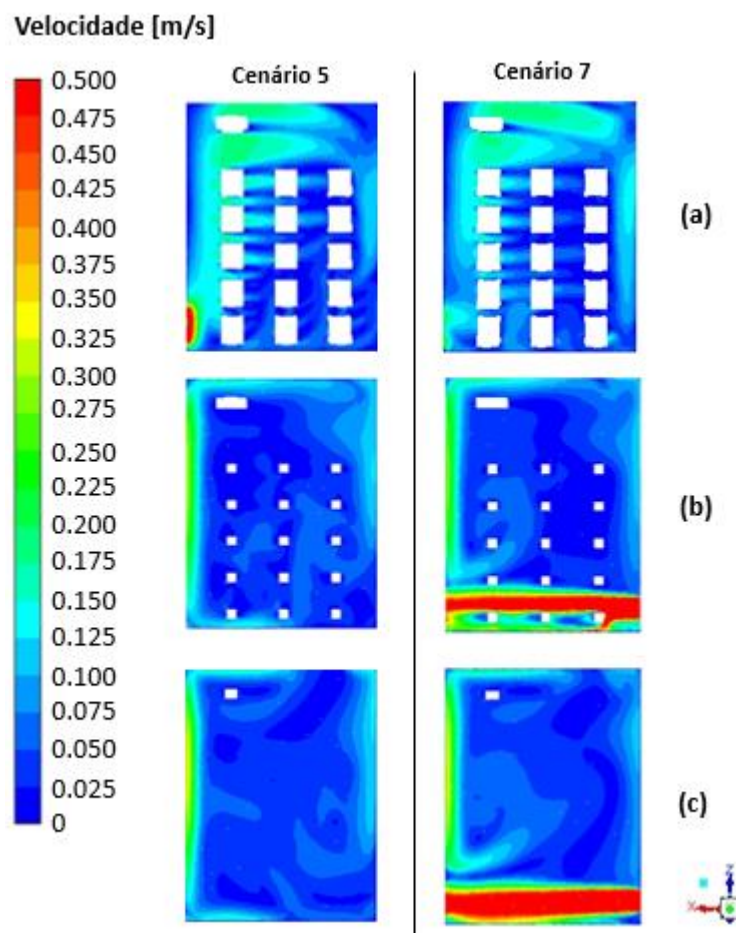
Figura 37: Contornos de concentração de CO₂ para os cenários 5 e 7 nos planos (a) “nariz-aluno” e (b) “nariz-professor”



Observa-se que a concentração média da sala efetivamente reduziu, bem como os pontos onde havia maior acúmulo de CO₂. Tal situação indica que a ventilação da sala realmente melhorou com a abertura das janelas e da porta.

O escoamento se tornou mais complexo, visto que há duas correntes de ar conflitantes no domínio. Uma zona de maiores velocidades é formada na parte de trás da sala, na direção da janela, sendo que essa segue diretamente para a porta, criando um curto-circuito.

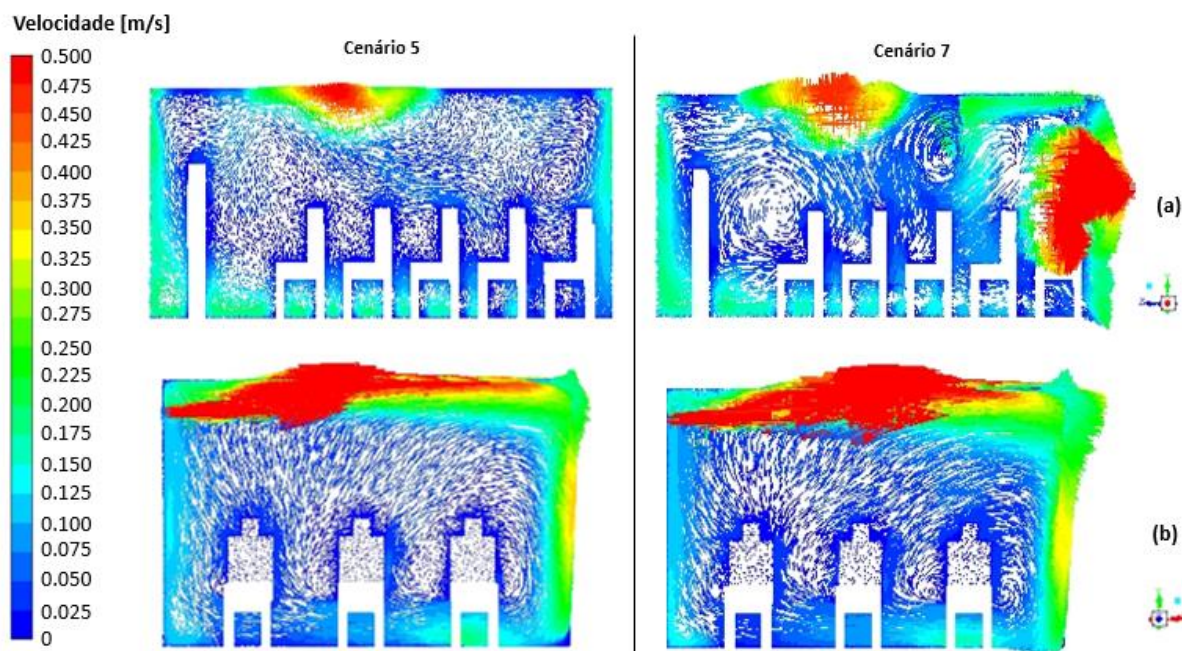
Figura 38: Contorno de velocidade para os cenários 5 e 7 nos planos (a) "0.1-chao", (b) "nariz-aluno" e (c) "nariz-professor"



O ar que é proveniente do ar-condicionado encontra a parede lateral e acaba sendo deslocado, em partes, para a região central da sala devido à pressão criada pelo escoamento originário da janela. Este fenômeno cria uma grande zona de recirculação acima dos ocupantes da fileira 1, como pode ser observado na Figura 39. Entretanto, não é acumulado poluente uma vez que a velocidade em locais próximos a esses ocupantes é elevada, o que favorece o carregamento do CO_2 emitido e consequente dispersão.

Observa-se também outra zona de recirculação entre os ocupantes da primeira linha e o professor. Tal local já apresenta menores velocidades e pode ser associada, ainda, com as zonas de maiores concentrações observadas na Figura 37.

Figura 39: Vetores coloridos com a velocidade para os cenários 5 e 7 nos planos (a) “fileira-1” e (b) “linha-1”

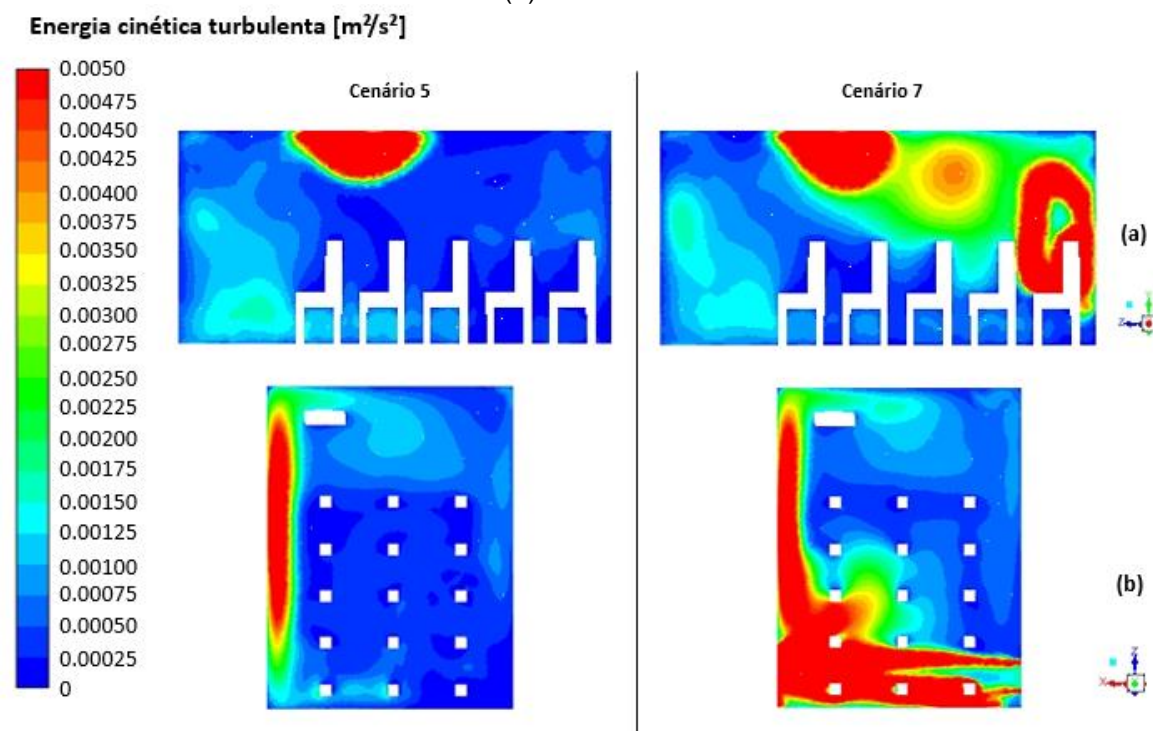


É possível constatar também que, uma das principais diferenças entre os casos é o nível de turbulência presente na sala. Ao verificar o contorno de energia cinética turbulenta para a fileira 2, disponibilizado na Figura 40, é possível visualizar claramente o aumento da zona de maior turbulência, principalmente nas proximidades do jato proveniente da janela. Tal situação corrobora com os melhores resultados de ventilação obtidos para o cenário 7 quando comparados ao cenário 5.

Os alunos que estão inseridos em zonas de maior turbulência e maior velocidade normalmente apresentam menores plumas de CO_2 , visto que as partículas de CO_2 emitidas são rapidamente carregadas junto ao escoamento de maior velocidade e são dispersadas devido ao movimento aleatório proporcionado pela alta turbulência.

Tal situação pode ser observada para as posições 2, 3, 4, 5 e 10 no cenário 7, que estão localizadas em regiões de maior turbulência e velocidade. Quando comparado ao cenário 5, a pluma resultante em suas proximidades significativamente menor.

Figura 40: Contornos de energia cinética turbulenta para os cenários 5 e 7 nos planos (a) “fileira-2” e (b) “nariz-alunos”

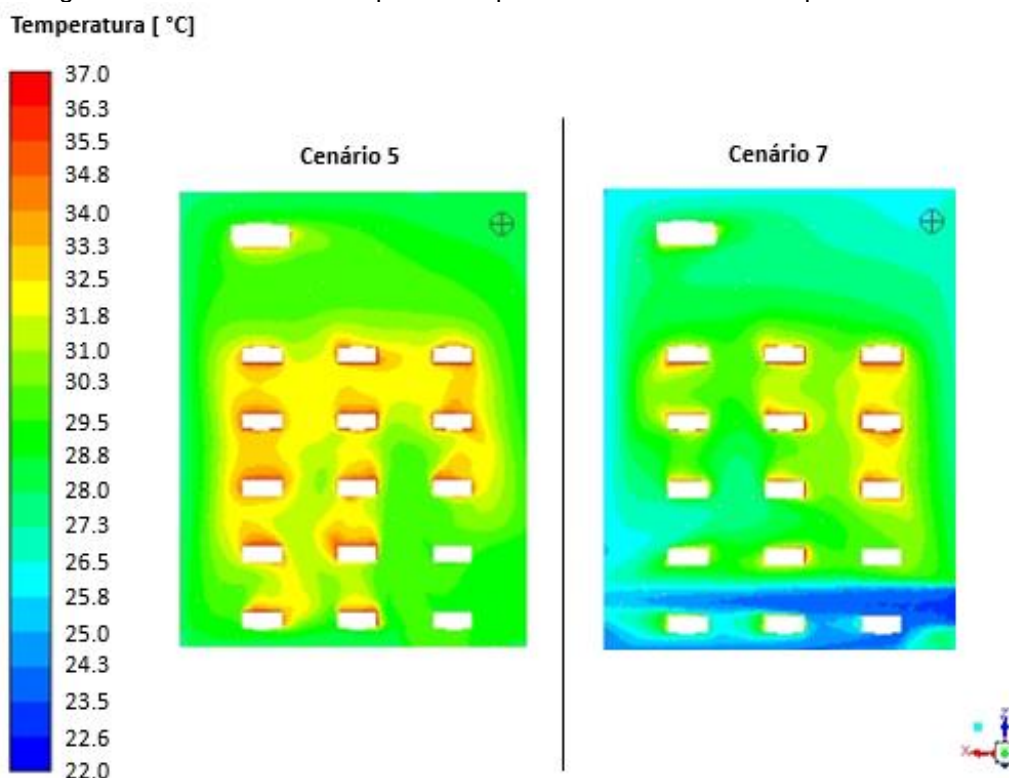


Averiguou-se também que o cenário 7 apresenta um melhor desempenho térmico quando comparado ao cenário 5, visto que a maior parte dos ocupantes estão expostos a temperaturas até 28°C. Apesar de ainda estar acima do recomendável pela Anvisa para épocas de verão, a junção de maiores velocidades pode amenizar as sensações de desconforto térmico, favorecendo a aceitabilidade térmica do ambiente pelos alunos.

Conforme observado por Song e Meng (2015), a abertura das janelas e portas pode auxiliar, em algumas situações, o alcance de situações de conforto térmico.

Alguns alunos, principalmente aqueles da linha 5, que estão diretamente expostos ao escoamento proveniente da janela, estão sobre temperaturas mais amenas, na faixa de 23,5 a 25,8 °C, o que está em concordância com o intervalo recomendável, cujo limite inferior é de 23,3°C. Porém também se encontram em zonas cuja velocidade é elevada, superior a 0,5 m/s, o que também é acima do recomendável e pode levar ao desconforto de tais estudantes.

Figura 41: Contornos de temperaturas para os cenários 5 e 7 no plano "monitor".



De forma geral, constata-se que o cenário 7, em que as janelas e a porta foram mantidas abertas juntamente ao ar-condicionado ligado com velocidade de 1,0 m/s apresenta melhores resultados de ventilação, sendo os ocupantes expostos a menores concentrações de CO₂ ao mesmo tempo em que experimentam menores temperaturas e velocidades de ar mais elevadas.

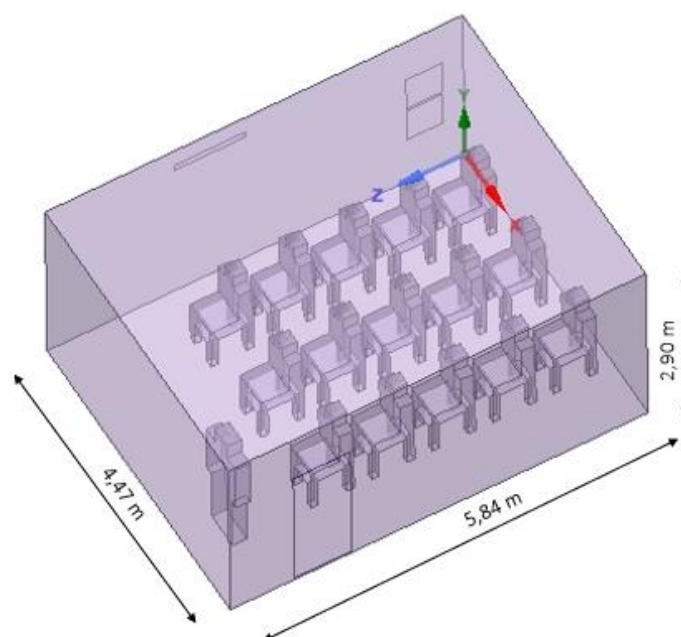
Entretanto, vale ressaltar que as concentrações de CO₂ foram efetivamente reduzidas na sala visto que não foi considerado concentração de CO₂ no ar externo. Em situações que tal concentração é superior àquela encontrada no ambiente interno, a abertura de portas e incorporação do escoamento natural pode prejudicar ainda mais e expor os ocupantes à maiores níveis deste poluente.

5.3.2 PORTA EM OUTRA POSIÇÃO

Visto que a parede lateral, na qual se localiza a porta de entrada na sala estudada é de PVC e uma alteração de seu local seria geometricamente e economicamente possível, foram avaliados mais dois cenários, chamados de cenários 8 e 9, que correspondem à porta na parte da frente da sala, sendo que no primeiro caso, a porta e as janelas são mantidas fechadas e no segundo caso essas são mantidas abertas.

Para isso, uma terceira geometria foi desenhada e pode ser visualizada na Figura 42.

Figura 42: Geometria III com a porta alterada de local



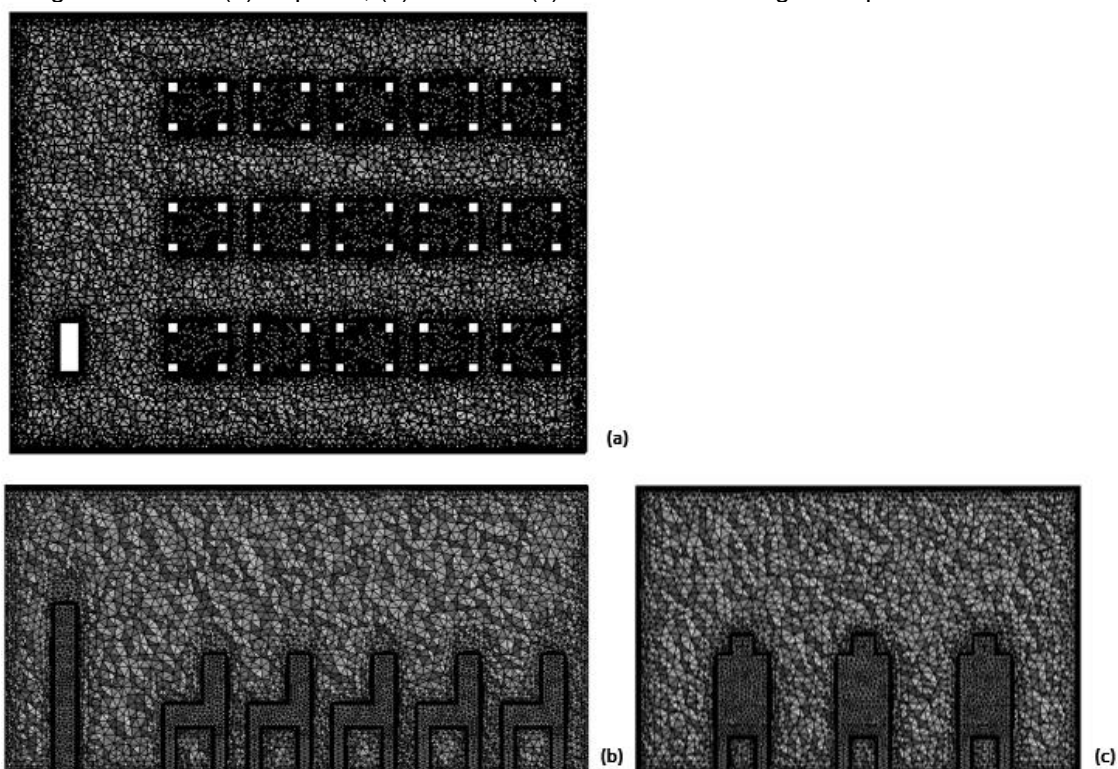
Dessa forma, foi necessário gerar uma nova malha, cujas características estão expostas na Tabela 19. Da mesma forma que para as demais, buscou-se manter as características mais próximas possíveis das anteriores. As métricas também foram avaliadas para identificação da qualidade da malha.

Tabela 19: Características gerais da malha gerada para a Geometria III

	Característica	Parâmetro	Valor
Construtivas	Malha em geral	Taxa de crescimento	1,30
		Tamanho máximo dos elementos	0,10
		Tamanho dos elementos	0,08
		Núm de elementos	3.294.413
	Camada prismática de transição	Núm de camadas	10
		Taxa de crescimento	1,20
		Refinamento nas faces	Tamanho dos elementos
		Taxa de crescimento	1,30
Qualidade	Qualidade ortogonal	Médio	$0,73 \pm 0,16$
	Razão de aspecto	Médio	$7,21 \pm 7,12$
	Assimetria	Médio	$0,26 \pm 0,16$

A Figura 43 traz uma representação gráfica da malha gerada.

Figura 43: Vista (a) Superior, (b) Lateral e (c) Frontal da malha gerada para a Geometria III

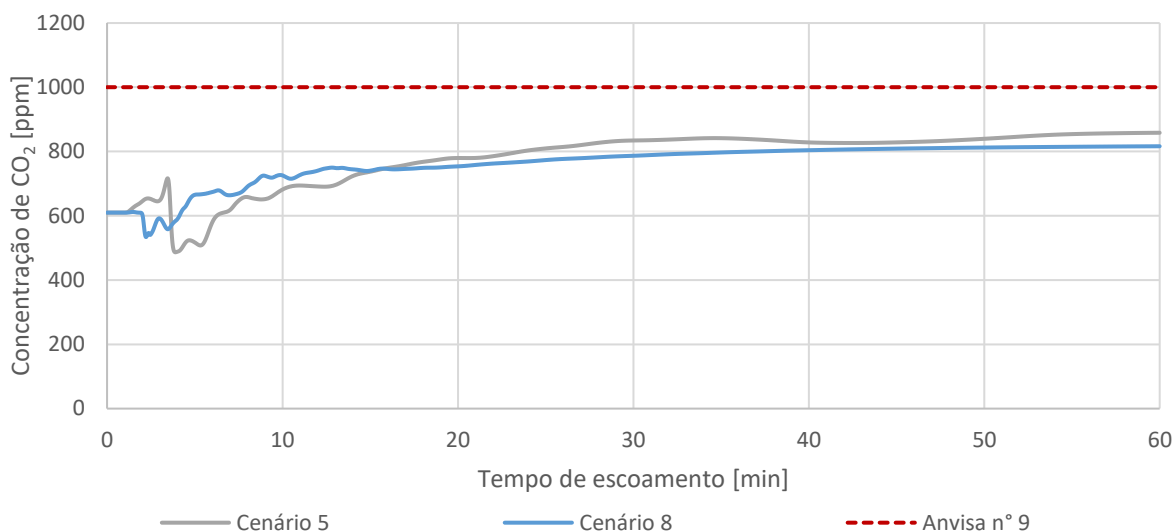


5.3.2.1 Cenário 8: Porta em outra posição e mantida fechada, juntamente com as janelas

Neste cenário, utilizou-se a geometria III e a porta foi mantida fechada, assim como as janelas. Considerou-se que a entrada de ar no domínio ocorria apenas pelo ar-condicionado, sendo que o escoamento adentra perpendicularmente e com uma velocidade de 1 m/s. Dessa forma, este cenário foi comparado ao cenário 5, visto que apresentam as mesmas condições de contorno.

O Gráfico 8 indica a evolução temporal da concentração de CO₂ na sala considerando tais condições.

Gráfico 8: Evolução temporal da concentração de CO₂ estimada pelo modelo para os cenários 5 e 8 no ponto em que o sensor foi instalado

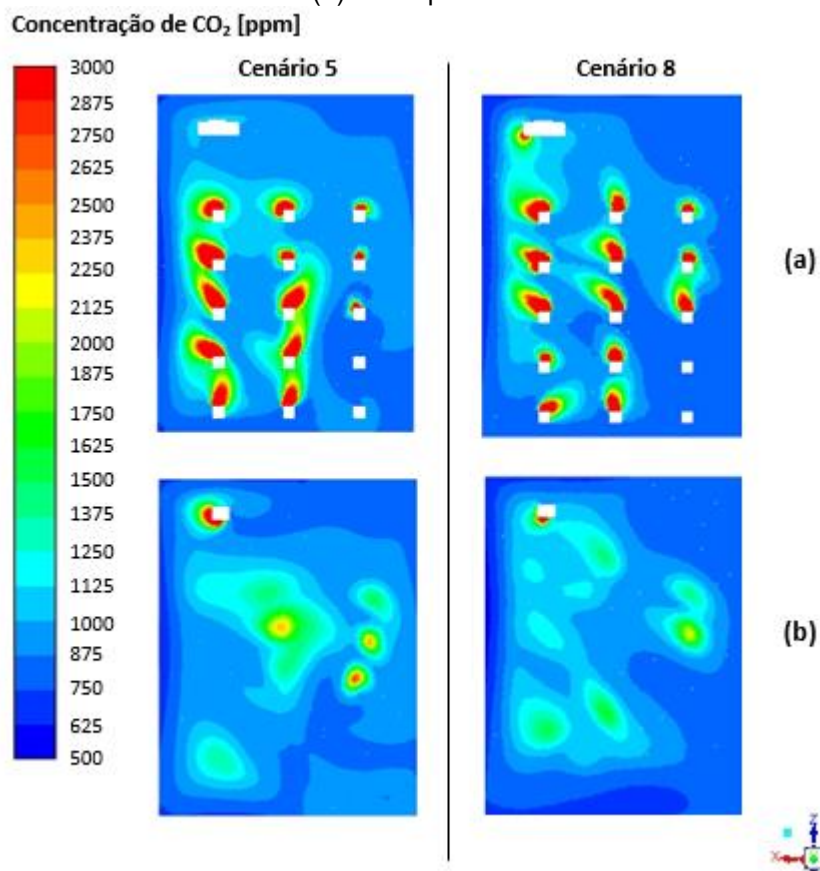


De imediato é possível perceber que, para o ponto do monitor, não houve alteração significativa nas concentrações estimadas, visto a dinâmica de crescimento entre os dois cenários e a concentração final permaneceram próximas. Para melhor entendimento dos efeitos da alteração do local da porta, os contornos de concentração de CO₂, velocidade e temperatura foram avaliados.

A partir do contorno de concentrações, constata-se que houve um pequeno ganho no cenário 8 para as concentrações de CO₂, visto que as zonas de elevadas concentrações são ligeiramente menores e menos extensas. Entretanto, essas ainda continuam sendo formadas em regiões análogas no domínio.

Pode-se notar também uma pequena melhora uma vez que há uma melhor distribuição do CO₂ na sala, evitando a ocorrência do acúmulo central do poluente, como pode ser constatado ao observar a imagem (b) da Figura 44. Isso ocorre pois é formado um escoamento mais organizado nesta região e que tende a seguir na direção diagonal para a esquerda, buscando a saída da sala.

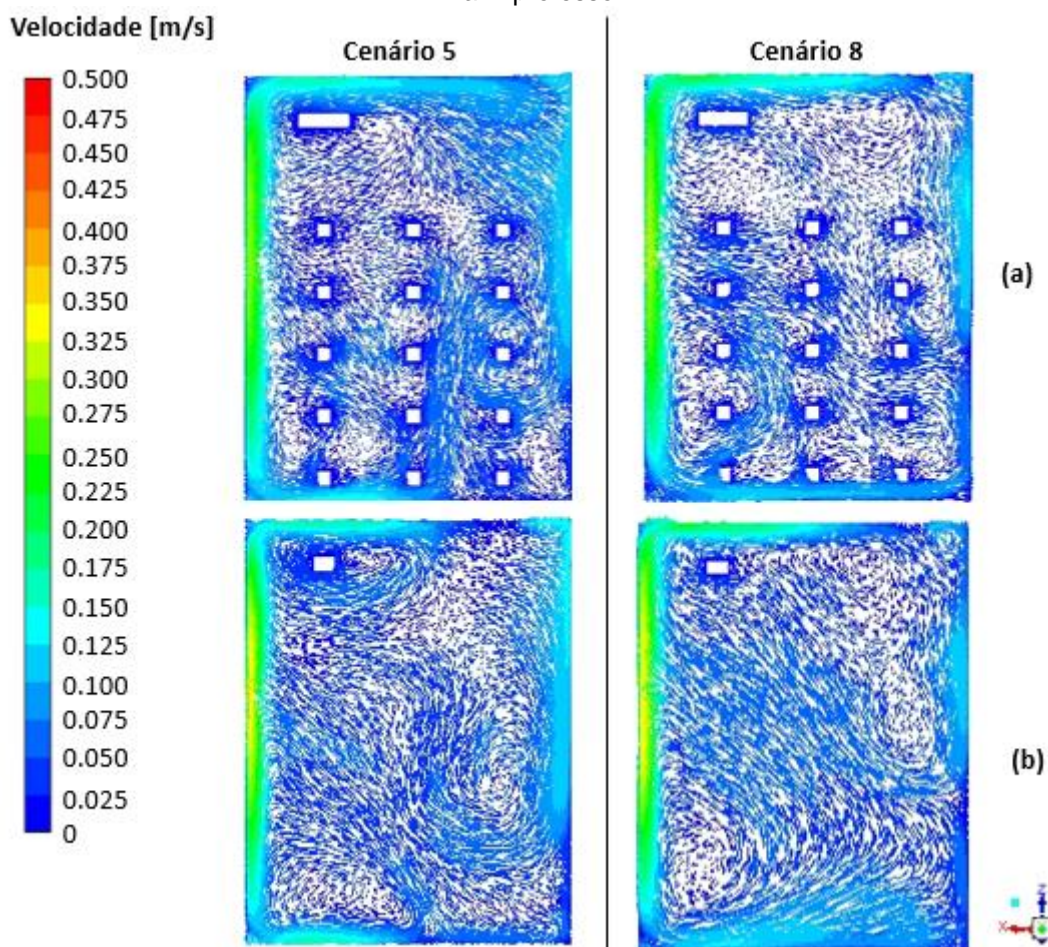
Figura 44: Contornos de concentração de CO₂ para os cenários 5 e 8 nos planos (a) "nariz-alunos" e (b) "nariz-professor"



A figura abaixo mostra os vetores coloridos pela velocidade para dois planos distintos, onde é possível verificar a diferença do padrão de escoamento formado entre os cenários 5 e 8. Tal padrão corrobora com o fato da maioria das plumas de concentração estarem direcionadas para a diagonal esquerda da sala.

Além disso, é possível verificar ainda o porquê das plumas geradas próximas aos ocupantes 11, 12 e 13 são maiores para o cenário 8. Enquanto no cenário 5 há uma zona de maior velocidade que atinge esses ocupantes, no cenário 8 esses se encontram em zonas de baixas velocidades, o que prejudica a dispersão do CO₂ emitido por eles.

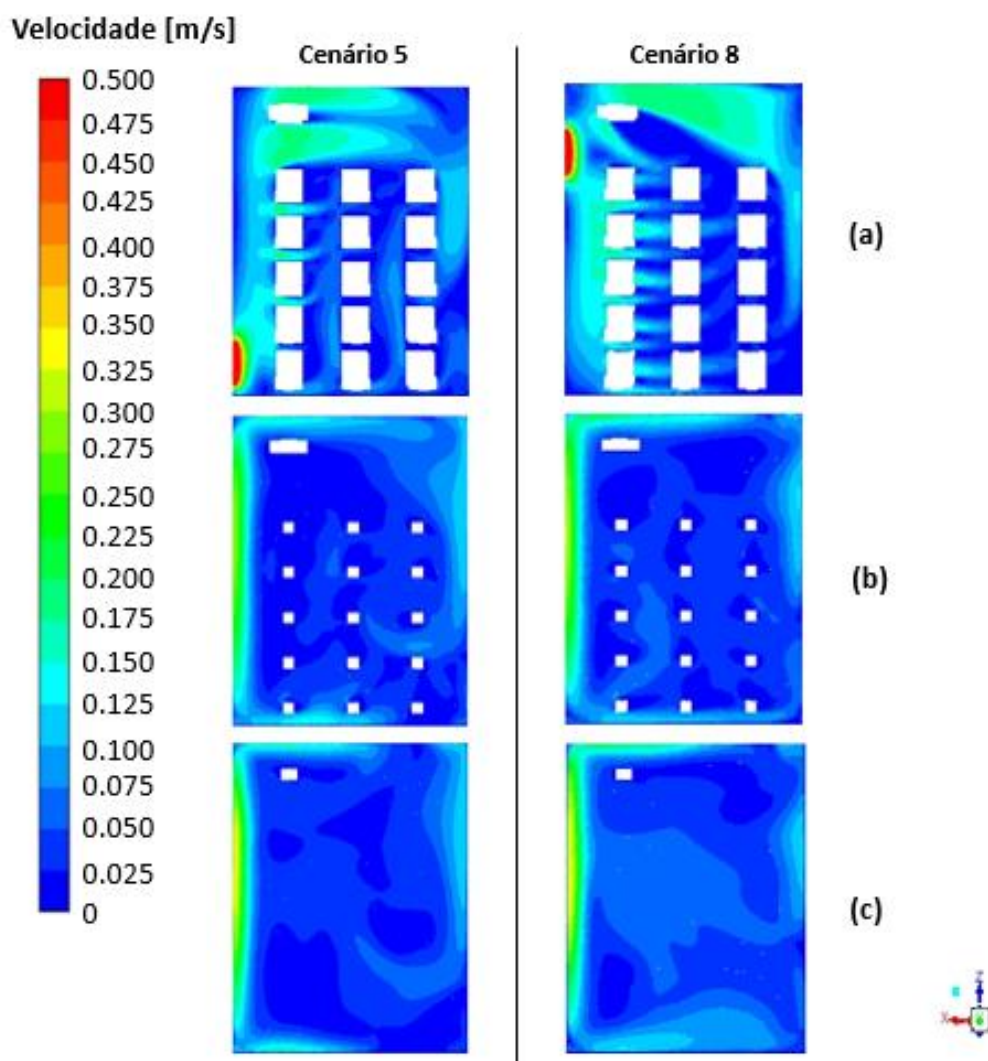
Figura 45: Vetores coloridos pela velocidade para os cenários 5 e 8 no plano (a) "nariz-aluno" e (b) "nariz professor"



Observa-se também que há uma diferença no escoamento que passa próximo ao ponto em que o monitor estava instalado (canto direito da parte da frente da sala). No cenário 5, as velocidades experimentadas pelo monitor são superiores às do cenário 8, porém, devido ao padrão de escoamento, poucas partículas de CO_2 atingem o local, não sendo criado um ponto de maior retenção.

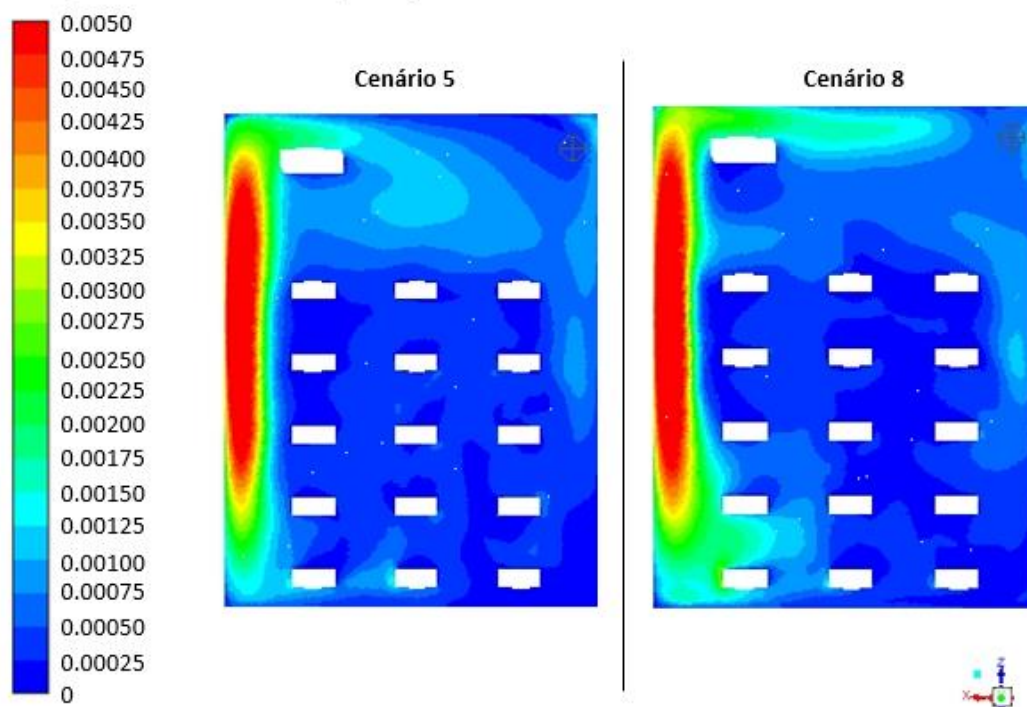
Apesar de alterar o padrão de escoamento, o campo de velocidades permanece similar, não havendo ganhos significativos neste quesito. Todos os ocupantes ainda estão em zonas cuja velocidade é inferior ao valor máximo estabelecido pela Resolução Anvisa nº 9.

Figura 46: Contornos de velocidade para os cenários 5 e 8 nos planos (a) "0.1-chao", (b) "nariz-alunos" e (c) "nariz-professor"



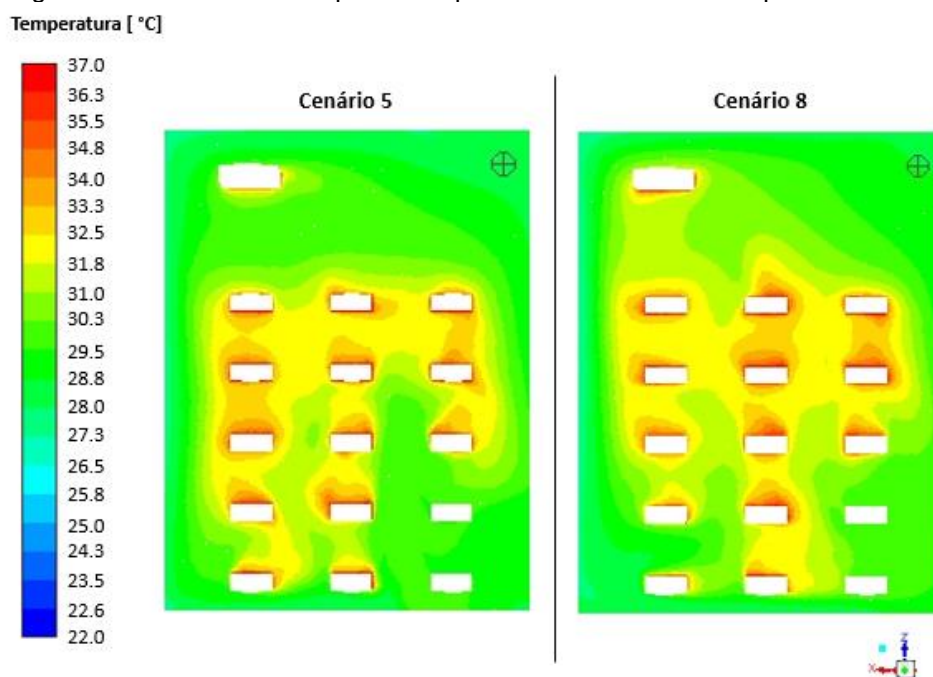
O contorno de energia cinética turbulenta também indica que não houve alteração significativa dos níveis de turbulência verificados na sala, o que colabora com os resultados similares de concentração próximos encontrados para os dois cenários.

Figura 47: Contorno de energia cinética turbulenta para os cenários 5 e 8 no plano “monitor”
Energia cinética turbulenta [m²/s²]



Por fim, quando observado os contornos de temperaturas, verifica-se que o cenário 8 se mostrou menos eficiente para a remoção do calor, visto que a zona de maior temperatura é mais extensa. Todos os alunos, excetuando-se os das posições 4 e 5, estão em zonas nas quais a temperatura pode atingir até 33°C, o que é acima do limite recomendável pela Anvisa. Tal situação, acompanhada de baixas velocidades do ar, pode levar a desconfortos térmicos que podem prejudicar a capacidade de concentração e aprendizado.

Figura 48: Contorno de temperaturas para os cenários 5 e 8 no plano "monitor"



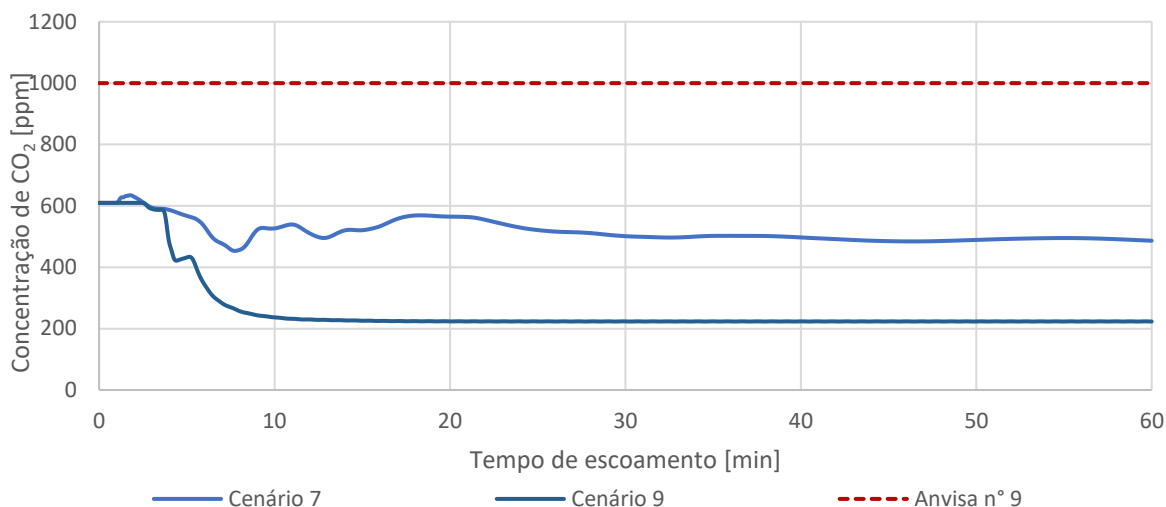
Os dois cenários avaliados geraram condições ambientais análogas, apresentando apenas pequenas diferenças quanto às concentrações de CO₂ e a temperatura experimentada pelos ocupantes.

5.3.2.2 Cenário 9: Porta em outra posição e mantida aberta, juntamente com as janelas

Para este caso, também se utilizou a nova geometria em que a porta se localiza na parte da frente da sala, sendo que, dessa vez, essa foi mantida aberta, juntamente com as janelas. Os resultados obtidos para este cenário foram comparados ao do cenário 7 a fim de verificar os ganhos gerados pela alteração do local da porta.

O Gráfico 9 apresenta a evolução temporal da concentração de CO₂ para o cenário 9.

Gráfico 9: Evolução temporal da concentração de CO₂ estimada pelo modelo para os cenários 7 e 9 no ponto em que o sensor foi instalado

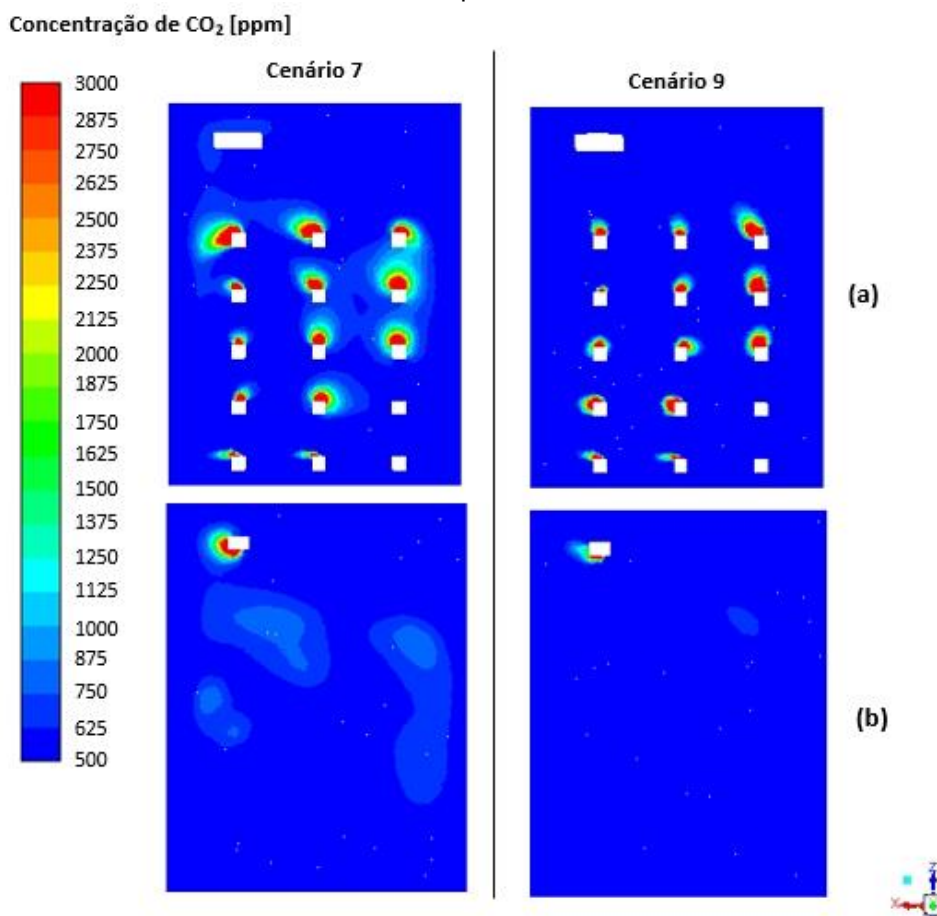


Nota-se que a dinâmica da concentração de CO₂, em específico para o ponto em que o monitor foi instalado, são bastante distintas entre os dois cenários, porém, após certo período de escoamento, ambos atingem um valor de estabilidade. Diante da concentração final obtida para o cenário 9, espera-se que haja uma boa ventilação na sala.

A fim de melhor compreender os efeitos gerados pela abertura da porta em outra posição, foi verificado os contornos de concentração de CO₂, velocidade e temperatura.

Observando o contorno de concentrações, é possível constatar que, a alteração do local da porta leva a um cenário cujas concentrações de CO₂ são inferiores quando comparado ao cenário em que é mantida a geometria inicial, que corresponde ao cenário 7. Além disso, os níveis de CO₂ da sala permanecem mais homogêneos e as regiões de maior concentração criada próxima aos ocupantes também são menores. Tais situações indicam que a troca de local da porta proporciona uma melhor dispersão dos poluentes.

Figura 49: Contornos de concentração de CO₂ para os cenários 7 e 9 no plano (a) "nariz-aluno" e (b) "nariz-professor"

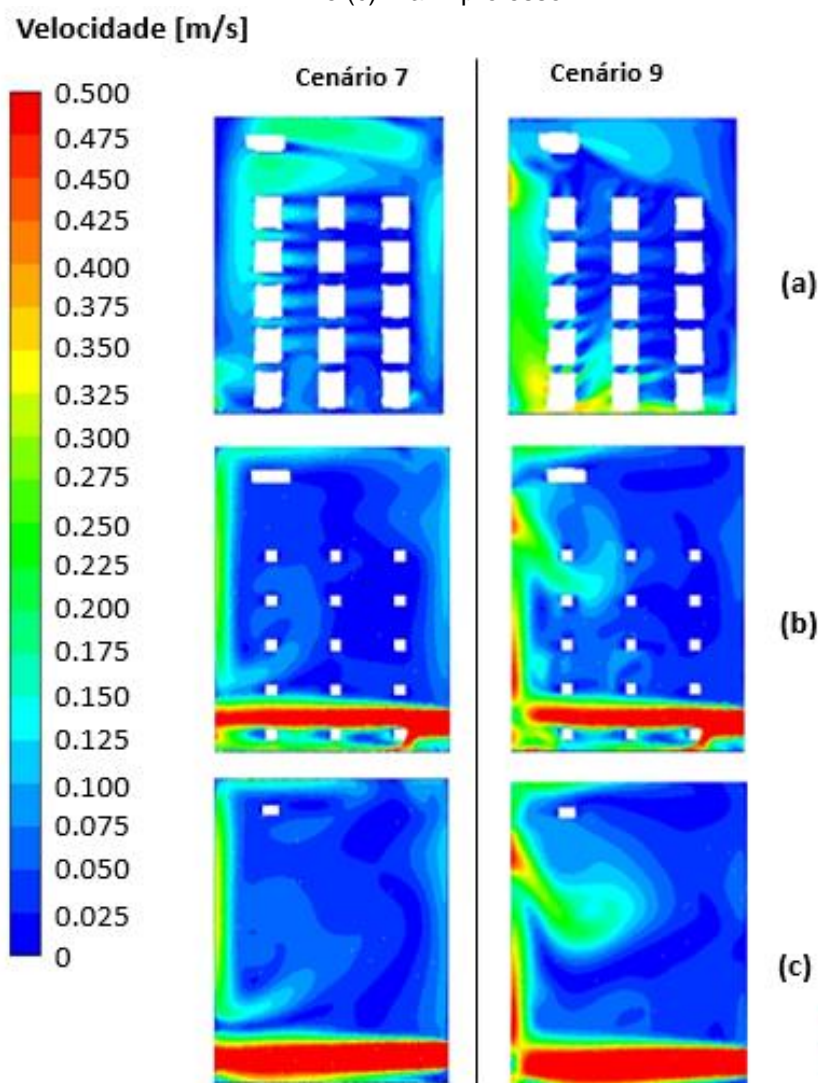


Observa-se um aumento da zona de maiores velocidades gerada do lado esquerdo da sala, o que colabora com a dispersão do CO₂ emitido pelos estudantes. Isso ocorre, pois, ao alterar a porta de local, evita-se a ocorrência do curto-circuito conforme observado no cenário 7, em que a maior parte do escoamento proveniente da janela saía diretamente pela porta, sem que adentrasse a sala.

No cenário 9, o escoamento proveniente da janela encontra a parede lateral esquerda e é obrigado a desviar, seguindo para a direita em direção à frente da sala. Isso, conseqüentemente, aumenta e melhora a circulação de ar na sala, proporcionando resultados satisfatórios de dispersão de poluentes.

Quando sobrepostos os contornos de velocidades e concentração, é possível verificar que os casos em que as zonas de maiores concentrações de CO₂ reduziram de tamanho, correspondem, em sua maioria, justamente às zonas que tiveram a velocidade aumentada devido à troca da posição da porta.

Figura 50: Contorno de velocidade para os cenários 7 e 9 nos planos (a) "0.1-chao", (b) "nariz-aluno" e (c) "nariz-professor"

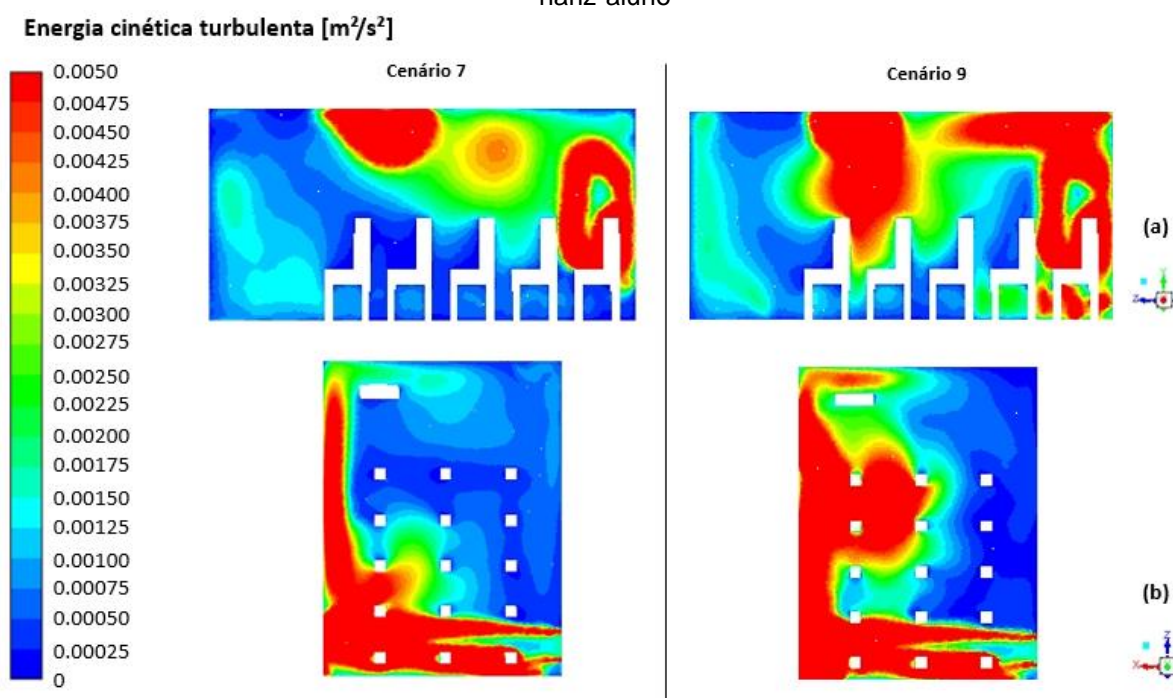


Conforme verificado também para o cenário 7, no cenário 9 os ocupantes na direção da janela (posições 5, 10 e 15) estão em zonas cuja velocidade está acima do recomendável pela Anvisa. Ainda, foram criadas outras zonas de velocidades acima do recomendável, expondo outros ocupantes, anteriormente não expostos, a velocidades acima de 0,25 m/s, como ocorre com os alunos das posições 1 e 2.

Como verificado nos demais casos, as zonas que possuem maiores velocidades normalmente estão associadas à maiores níveis de turbulência e conseqüentemente melhor dispersão dos poluentes presentes. Os contornos de energia cinética turbulenta comprovam que, para o cenário 9, houve um aumento dos níveis de turbulência.

Quando comparado tal variável entre os cenários 7 e 9, constata-se que, os ocupantes da fileira 1 agora estão em zonas de maior nível turbulento, o que influenciou diretamente no tamanho das zonas de maior concentração de CO₂ criada em suas proximidades, reduzindo-as significativamente.

Figura 51: Contorno de energia cinética turbulenta para os cenários 7 e 9 no plano (a) "fileira-2" e (b) "nariz-aluno"

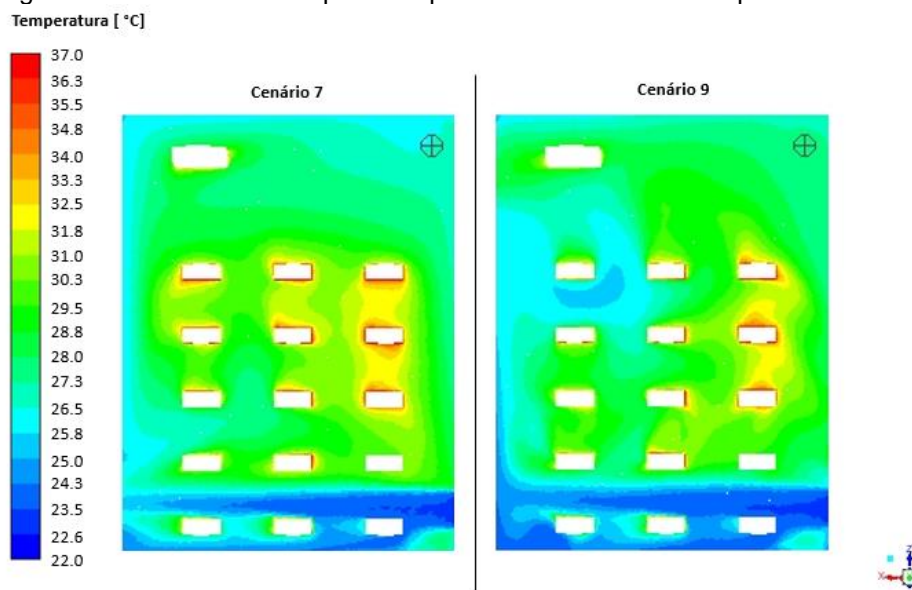


Apesar dos níveis de turbulência terem aumentado na parte esquerda da sala, foi observado uma redução da velocidade e da turbulência na região frontal do lado direito da sala. Tal situação prejudicou a dispersão do CO₂ emitido pelos ocupantes 11, 12 e 13, mesmo assim permanecem melhor quando comparado ao cenário 7.

Já quanto à temperatura, os dois casos se mostram muito próximos, havendo um pequeno ganho no cenário 9 visto que a temperatura para alguns ocupantes, como os das posições 1, 2, 6 e 7, agora estão sob uma faixa de 24,3°C a 26,5°C. Já os ocupantes das posições 5, 10 e 15 estão em zonas cuja temperatura é de até 25°C. Em ambos os casos, a faixa de temperaturas é considerada adequada pela Resolução Anvisa n° 9.

Apesar disto, o restante da sala ainda se apresenta sob temperatura média de 28,8 °C, podendo chegar, em algumas regiões, até 32,5 °C, o que pode levar à sensações de calor.

Figura 52: Contorno de temperatura para os cenários 7 e 9 no plano "monitor"



Então, constata-se que o cenário 9 apresentou melhores resultados quando comparados ao cenário 7, visto que levou a uma melhor dispersão do CO₂ emitido pelos ocupantes, manteve a temperatura média da sala na mesma faixa que a do cenário 7 e as velocidades do ar estimadas não se encontram muito acima do limite estabelecido pela Resolução Anvisa n° 9. Porém, a sensação de conforto térmico depende de cada ocupante e vale ressaltar que, quando associados altas velocidades do ar com temperaturas mais amenas ou altas temperaturas com velocidades do ar mais baixa, pode-se gerar desconforto, o que é prejudicial a capacidade de concentração dos ocupantes.

Ainda, conforme levantado para o cenário 7, tal redução de concentrações apenas foi possível uma vez que não foi considerada a presença de CO₂ no escoamento proveniente do ambiente externo.

6 CONCLUSÃO

Neste trabalho de conclusão de curso foi estudada a dinâmica de dispersão do CO₂ emitido por ocupantes numa sala de aula.

Primeiramente, realizou-se a validação do modelo proposto ao reproduzir o estudo experimental conduzido por Zheng *et al* (2022). Foram modelados três cenários cuja diferença consistia na velocidade de entrada no domínio, sem alterações na geometria. Foi possível perceber que a dispersão dos poluentes emitidos pelos ocupantes em um ambiente fechado está diretamente relacionada a velocidade e aos níveis de turbulência encontrados no ambiente, sendo que a dispersão ocorre de forma mais eficiente para aqueles casos em que tais variáveis apresentam maiores valores.

No estudo de caso, uma sala de aula foi escolhida e tratada como cenário base do estudo. Para determinação de certas condições iniciais e de contorno, também foi realizada uma campanha experimental

Para o estudo de caso, foram propostos, ao todo, 6 cenários, sendo que estes diferiam apenas por algumas condições de contorno, como a direção e a velocidade de entrada de ar no domínio. Além desses casos, ainda foram propostos 3 cenários visando a melhoria da ventilação na sala.

O modelo CFD que foi utilizado para condução das modelagens foi o método das médias de Reynolds (RANS) com o modelo de turbulência *k-ε* visto que é um modelo mais simples, apresenta bons resultados e é amplamente utilizado em estudos de modelagem de escoamento em ambientes interiores.

Durante a campanha experimental, foi realizada a medição *in-situ* das concentrações de CO₂ na sala de aula sob as mesmas condições em que certos cenários foram modelados de forma a proporcionar uma comparação direta dos resultados. De acordo com o monitorado pelo sensor, houve um grande acúmulo de deste poluente na sala, chegando a atingir níveis de 3500 ppm.

Entretanto, para o ponto em que o sensor foi instalado, o modelo não gerou resultados compatíveis, em alguns casos apresentando até 90% de diferença entre os valores. Porém, quando observado todo o domínio, sendo considerado os contornos de concentração e demais variáveis, observa-se que em diversos cenários os ocupantes

estão expostos a concentrações superiores a 3000 ppm, o que é condizente com o observado na campanha experimental. Não foi possível identificar um ponto único em que houvesse a concentração do poluente. Ressalta-se que tais níveis de concentração podem levar a prejuízos na capacidade cognitiva e de aprendizagem dos ocupantes.

Devido ao padrão de escoamento formado na sala de aula dos diversos cenários, o poluente não foi acumulado no canto em que o sensor estava instalado, mas sim nas proximidades dos ocupantes.

Vale ressaltar que, no estudo de caso, o escoamento se tornou muito complexo, uma vez que foram inseridos muitos ocupantes, que funcionam como obstáculos ao escoamento. Tal complexidade não foi observada no caso de validação, dado que os dois ocupantes estavam posicionados no início da sala abaixo da entrada de ar. Dessa forma, a presença deles no domínio não influenciou diretamente no escoamento principal.

Constatou-se também que a representação do domínio de forma mais simplificada (G-I) é viável, em razão dos resultados obtidos para tal geometria serem muito próximos àqueles obtidos quando utilizada a geometria refinada, com a implementação dos espaços abaixo dos alunos (G-II). Esse refinamento da geometria pode, inclusive, ter levado a uma maior demanda computacional para a realização das modelagens.

Em geral, os cenários em que a entrada de ar se dava a 45° da face do ar-condicionado, se mostraram menos eficientes quando comparados àqueles cuja entrada de ar se dava perpendicularmente. Os cenários 3 e 6 apresentaram maiores concentrações de CO₂ e maiores temperaturas médias, alinhados ainda com menor velocidade do ar em todo o domínio.

Além disso, como esperado, os cenários cuja velocidade de entrada no domínio é maior apresentaram maior eficiência de remoção térmica e de poluentes, sendo o cenário 2 o mais eficiente.

Apesar do cenário 2 já resultar em condições positivas, não sendo necessário a implementação imediata ações de melhoria, as melhorias propostas se mostraram eficientes, reduzindo as concentrações quando comparados ao seu cenário inicial.

O cenário 7 é uma boa alternativa de redução da concentração de CO₂ e melhor adequação dos parâmetros de conforto sem custos adicionais envolvidos e de fácil implementação.

Foi constatado ainda que a alteração de local da porta levou a uma efetiva melhoria na qualidade da sala de aula. O cenário 9 se mostrou mais eficiente quando comparado ao cenário 7, sendo possível observar concentrações de CO₂, em níveis inferiores. Entretanto, as características de velocidade do ar e temperatura do ar se mantiveram similares entre os cenários. Já o cenário 8, não apresentou grandes melhorias quando comparado ao cenário 5, apresentando contornos de concentração e níveis médios parecidos.

De forma geral, a abertura das janelas e da porta proporcionou uma maior velocidade do ar no domínio, o que auxiliou na diluição do CO₂ e na manutenção do conforto térmico dos ocupantes.

Por fim, conclui-se que modelar escoamentos em ambientes interiores pode ser um desafio, visto que a presença de pequenos objetos ou a variação das condições de contorno podem alterar significativamente o padrão do escoamento do ambiente, modificando também, conseqüentemente, suas características relacionadas à conforto e saúde dos ocupantes. Além disso, consta-se a necessidade de implementação desta análise ainda em fase de projeto, para que, tais ambientes de tornem mais adequados à ocupação por longos períodos.

Vale ressaltar ainda alguns pontos que podem ser observados como recomendações para futuros trabalhos na área, sendo elas:

- Monitorar mais pontos *in-situ* para melhor resolução espacial das concentrações obtidas experimentalmente
- Aplicar formulários para verificação de aceitabilidade térmica dos ocupantes
- Implementar cenários levando em consideração a troca de calor dos ocupantes e equipamentos com o ambiente;
- Modelar outros casos, incluindo ventiladores de teto, visto que são alternativas viáveis economicamente
- Realização de um teste de malha, para correta verificação da qualidade da malha e real independência dos resultados.

REFERÊNCIAS

ABDUL-WAHAB, S. A. et al. A review of standards and guidelines set by international bodies for the parameters of indoor air quality. **Atmospheric Pollution Research**, v. 6, n. 5, p. 751–767, 2015. DOI 10.5094/APR.2015.084.

ABREU, C. F. C. **O Ambiente Interior e a Saúde dos Ocupantes de Edifícios de Habitação**. 2010, 298 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia da Universidade da Beira Interior, Covilhã, 2010.

AEROQUAL. **Series 200/300/500 User Guide**. Nova Zelândia, 2021. Disponível em: <https://support.aeroqual.com/Document/h245Wet3NxrJIHa/Series+500%2C+300+and+200+user+guide.pdf>. Acesso em: 10 jun 2022.

AGARWAL, T. et al. CFD simulations to study the effect of ventilation rate on 220Rn concentration distribution in a test house. **Radiation Physics and Chemistry**, v. 162, p. 82–89, 2019. DOI 10.1016/j.radphyschem.2019.04.018.

ALREBI, O. F. et al. Airflow dynamics in an emergency department: A CFD simulation study to analyse COVID-19 dispersion. **Alexandria Engineering Journal**, v. 61, p. 3435–3445, 2022. DOI 10.1016/j.aej.2021.08.062.

ANNESI-MAESANO, I. et al. Indoor Air Quality and Sources in Schools and Related Health Effects. **Journal of Toxicology and Environmental Health - Part B**, v. 16, n. 8, p. 491–550, 2013. DOI 10.1080/10937404.2013.853609.

ANSES. **Valeurs Guides de Qualité d’Air Intérieur (VGAi) - Présentation et travaux de l’Agence**. Disponível em: <https://www.anses.fr/fr/content/valeurs-guides-de-qualite-d-air-interieur-vgai#:~:text=Les valeurs guides de l'état des connaissances actuelles>. Acesso em: 6 set. 2021.

ANSYS. **ANSYS Fluent User’ s Guide Release 15.0**. 2013.

ANSYS. **ANSYS Meshing User’s Guide**. 2010.

ANVISA. Resolução ANVISA nº 176 de 2000 – Orientações Técnica Elaborada por Grupo Técnico Assessor sobre Padrões Referenciais de Qualidade do Ar Interior em Ambientes Climatizados Artificialmente de Uso Público e Coletivo. **Diário Oficial da União**, 24 out 2000.

ANVISA. Resolução ANVISA nº 9 de 2003 – Padrões Referenciais de Qualidade do Ar Interior em Ambientes Climatizados Artificialmente de Uso Público e Coletivo. **Diário Oficial da União**, n. 14, 20 jan 2003.

APA. **Impacte da poluição atmosférica na saúde**. Disponível em: <https://www.eea.europa.eu/pt/sinai-da-aea/sinai-2013/infografia/impacte-da-poluicao-atmosferica-na-saude-2/view>. Acesso em: 29 jun. 2021.

APA. **Qualidade do Ar em Espaços Interiores-Um Guia Técnico**. p. 1–53, 2009. Disponível em: https://webstorage.cienciaviva.pt/public/pt.cienciaviva.www/divulgacao/Manual_QAI_APA_Maio2010.pdf. Acesso em: 09 de ago. 2021.

ASHRAE. **ASHRAE Standard - Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy**. 2010, 354 p.

ASHRAE. HVAC System Analysis and Selection. In: ASHRAE. **Handbook HVAC Systems and Equipment**, 2016, cap. 1, p. 3-12.

AZUMA, K. et al. Effects of low-level inhalation exposure to carbon dioxide in indoor environments: A short review on human health and psychomotor performance. **Environment International**, v. 121, p. 51–56, ago. 2018. DOI 10.1016/j.envint.2018.08.059.

BARRADAS, A. C. M. **Avaliação do desempenho do OpenFOAM em estudos de ventilação natural**. 2016. 97 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica na especialidade de Energia e Ambiente) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra, 2016.

BASTURK, S. B.; DANCER, C. E. J.; MCNALLY, T. Field measurements on indoor air quality of a residential building in Xi'an under different ventilation modes in winter. **Journal of Building Engineering**, v. 42, p. 103040, 2021. DOI 10.1016/j.job.2021.103040.

BEVILAQUA, C. P. et al. Análise da ventilação natural: Simulações CFD e ensaios em um modelo físico reduzido. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, v. 10, p. e019022, mai. 2019. DOI 10.20396/parc.v10i0.8652835.

BLAZEK, J. **Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications**. 3. ed. Kindlington: Elsevier, 2001. 470 p.

BRASINDOOR. **Histórico**. 2021. Disponível em: <http://www.brasindoor.com.br/historico.php>. Acesso em: 06 set 2021.

BSRIA. **The illustrated guide to Ventilation**. 2009. Disponível em: https://www.bsria.com/uk/product/WrmJxn/illustrated_guide_to_ventilation_bg_22009_a15d25e1/. Acesso em: 15 ago 2021.

CERTIFICAÇÃO ENERGÉTICA. **Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior nos Edifícios**. 2021. Disponível em: <https://www.certificacaoenergetica.com/certificacaoenergetica/sce/>. Acesso em: 6 set. 2021.

CHAUHAN, N. et al. Measurements and CFD modeling of indoor thoron distribution. **Journal of Environmental Radioactivity**, v. 136, p. 105-111, 2014

CHEN, Z.; XIN, J.; LIU, P. Air quality and thermal comfort analysis of kitchen environment with CFD simulation and experimental calibration. **Building and Environment**, v. 172, n. 106691, 11 p., 2020. DOI 10.1016/j.buildenv.2020.106691.

CONAMA. Resolução CONAMA nº 436, de 26 de dez. de 2011. Estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas instaladas ou com pedido de licença de instalação anteriores a 02 de janeiro de 2007. **Diário Oficial da União**: Seção 1, Brasília, DF, ano 2011, n. 247, p. 304, 26 dez. 2011.

COSTA, M. F. B.; COSTA, M. A. F. A qualidade do ar de interiores e a saúde humana. **InterfacEHS-Revista de Gestão Integrada em Saúde do Trabalho e Meio Ambiente**, v. 1, n. 2, p. 1–10, dez. 2006.

DE VECCHI, R. **Condições de Conforto Térmico e Aceitabilidade da Velocidade do Ar em Salas de Aula com Ventiladores de Teto para o Clima de Florianópolis/SC**. 2011, 142 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

DUKE, M. Book Reviews. **Architectural Science Review**, v. 50, n. 1, p. 83–90, 2007. DOI 10.3763/asre.2007.5012.

EPA. **Energy Saving Plus Health: Indoor Air Quality Guidelines for School Building Upgrades**. 2014. Disponível em: https://www.epa.gov/sites/default/files/2014-10/documents/energy_savings_plus_health_guideline.pdf. Acesso em: 04 ago. 2021.

EPA. **National Ambient Air Quality Standards**. 2012. Disponível em: <www.epa.gov>. Acesso em: 7 set. 2021.

FAKHOURY, N. A. **Avaliação da Qualidade do Ar Interior em Ambientes Acadêmicos: um estudo de caso**. 2017. 198 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

FERREIRA, A. M. C. **Qualidade do Ar Interior em Escolas e Saúde das Crianças**. 2014. 393 p. Tese (Doutorado em Ciências da Saúde) – Faculdade de Medicina, Universidade de Coimbra, Coimbra, 2014.

FERREIRA, A. M. C.; CARDOSO, S. M. Exploratory study of air quality in elementary schools, Coimbra, Portugal. **Revista de Saude Publica**, v. 47, n. 6, p. 1059–1068, mar. 2013. DOI 10.1590/S0034-8910.2013047004810.

FERZIGER, J. H.; PERIC, M. **Computational Methods for Fluid Dynamics**. 3. ed. Berlin; Heidelberg; New York; Barcelona; Hong Kong; London; Milan; Paris; Tokyo: Springer, 2002.

FOX, R. W. et al. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. Tradução: Ricardo N. N. K e Luiz M. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC Editora, 2018.

FRANÇA. **Loi n° 2010-788 du 12 juillet 2010 portant engagement national pour l'environnement**. 2010.

GOK, K. et al. Comparison of effects of different screw materials in the triangle fixation of femoral neck fractures. **Journal of Materials Science: Materials in Medicine**, v. 28, n. 5, 2017. DOI 10.1007/s10856-017-5890-y.

HEALTH CANADA. **Indoor Air Reference Levels**. 2018 Disponível em: <https://www.canada.ca/en/health-canada/services/publications/healthy-living/indoor-air-reference-levels.html>. Acesso em: 7 set. 2021.

HEALTH CANADA. **Residential indoor air quality guidelines**. 2022. Disponível em: <https://www.canada.ca/en/health-canada/services/air-quality/residential-indoor-air-quality-guidelines.html>. Acesso em: 7 jun. 2022.

HEINRICH, Joachim. Influence of indoor factors in dwellings on the development of childhood asthma. **International Journal of Hygiene and Environmental Health**, v. 214, n. 1, p. 1–25, ago. 2011. DOI 10.1016/j.ijheh.2010.08.009.

HIGUERO, T. La importancia de la calidad del aire interior. *In*: Comunidade de Madrid. **Guía de Calidad del Aire Interior**. Madri: Arias Montano Comunicación, 2016. cap. 1, p. 13-17.

HSE. **General Ventilation in The Workplace: Guidance for Employers**. 16 p., 2000. Disponível em: https://www.ucu.org.uk/media/1358/General-ventilation---guidance-for-employers-HSG202/pdf/HSG202_-_Ventilation.pdf. Acesso em: 25 jun. 2021.

INCROPERA, F. P. et al. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. Tradução: Fernando L. P. P e Eduardo M. Q. 6ª edição ed. Rio de Janeiro: LTC Editora, 2014.

INSTRUTHERM. **Manual de Instruções Termo-Anemômetro Digital Modelo TAFR-200**. São Paulo, 2021. Disponível em: <https://www.instrutherm.com.br/media/hexaattachment/products/attachments/TAFR-200.pdf>. Acesso em: 10 jun 2022.

JURELIONIS, A.; SEDUIKYTE, L. Indoor environmental conditions in Lithuanian Schools. **Environmental Engineering**, p. 883–839, 2008.

KIM, J. L. et al. Current asthma and respiratory symptoms among pupils in relation to dietary factors and allergens in the school environment. **Indoor Air**, v. 15, n. 3, p. 170–182, 2005. DOI 10.1111/j.1600-0668.2005.00334.x.

KONSTANTINOU, C. et al. Assessment of indoor and outdoor air quality in primary schools of Cyprus during the COVID – 19 pandemic measures in May – July 2021. **Heliyon**, v. 8, p. e09354, 2022. DOI 10.1016/j.heliyon.2022.e09354.

LI, X. J.; ZHOU, R. P.; KONOVESSIS, D. CFD analysis of natural gas dispersion in engine room space based on multi-factor coupling. **Ocean Engineering**, v. 111, p. 524-532, 2016. DOI 10.1016/j.oceaneng.2015.11.018.

LIU, J. et al. A review of CFD analysis methods for personalized ventilation (PV) in indoor built environments. **Sustainability**, v. 11, n. 4166, 33 p., 2019. DOI 10.3390/su11154166.

LÓPEZ, D. P. P. **Simulação Computacional de Cfd de um Pequeno Trocador de Calor De Casco e Tubo**. 2017, p. 84. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Energias) – Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2017.

MACINTYRE, A. J. **Ventilação Industrial e Controle da Poluição**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC Editora, 1990, 403 p.

MALALASEKERA, W; VERSTEEG, H. K. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics**. 2 ed Harlow: Pearson, 2007. 503 p.

MENDELL, M. J.; HEATH, G. A. Do indoor pollutants and thermal conditions in schools influence student performance? A critical review of the literature. **Indoor Air**, v. 15, n. 1, p. 27–52, 2004. DOI 10.1111/j.1600-0668.2004.00320.x.

MENDELL, M. J.; SMITH, A. H. Consistent pattern of elevated symptoms in air-conditioned office buildings: A reanalysis of epidemiologic studies. **American Journal of Public Health**, v. 80, n. 10, p. 1193–1199, 1990.

MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE ET SOLIDAIRE; MINISTÈRE DES SOLIDARITÉS ET DE LA SANTÉ. **Guide Pratique pour une Meilleure Qualité de l’Air Dans Les Lieux Accueillant Des Enfants et Adolescents**, 2019. Disponível em: <https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/Guide-complet-QAI-web.pdf>. Acesso em: 21 set 2021.

MIRZAI, M. et al. COVID-19 spread in a classroom equipped with partition – A CFD approach. **Journal of Hazardous Materials**, v. 420, n. 126587, 18 p., 2021. DOI 10.1016/j.jhazmat.2021.126587.

MOHAMADI, F.; FAZELI, A. A Review on Applications of CFD Modeling in COVID-19 Pandemic. **Archives of Computational Methods in Engineering**, 2022. DOI 10.1007/s11831-021-09706-3.

MORAIS, J. M. S. C.; LABAKI, L. 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.” **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 17, n. 1, p. 223–244, jan./mar. 2017. DOI 10.1590/s1678-86212017000100133.

MORA-PÉREZ, M.; GUILLEN-GUILLAMÓN, I.; LÓPEZ-JIMÉNEZ, A. P. A CFD study for evaluating the effects of natural ventilation on indoor comfort conditions. **AIMS Environmental Science**, v. 4, n. 2, p. 289–309, 2017. DOI 10.3934/environsci.2017.2.289.

MOTAMED, 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. 103397, 16 p., 2022. DOI 10.1016/j.scs.2021.103397.

NASCIMENTO, G C. **Avaliação Da Qualidade Do Ar Em Ambientes Internos : Salas de Aula**. 2008, 156 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

PAGEL, E. **Qualidade do ar interno da Estação Antártica Comandante Ferraz (EACF) e sua relação com os materiais de construção e as atividades humanas**. 2015, 183 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2015.

PANAGOPOULOS, I. K. et al. A CFD simulation study of VOC and formaldehyde indoor air pollution dispersion in an apartment as part of an indoor pollution management plan. **Aerosol and Air Quality Research**, v. 11, n. 6, p. 758–762, 2011. DOI 10.4209/aaqr.2010.11.0092.

PARLAMENTO EUROPEU. **Resolução 2018/2792 – Uma Europa que protege: ar puro para todos**. 2019.

PERSILY, A. K. Evaluating Building IAQ and Ventilation with Indoor Carbon Dioxide. **ASHRAE**, 1997.

PORTUGAL. **Decreto-Lei n.º 78 de 04 de abril de 2006** - Estabelece que os Estados membros da União Europeia devem implementar um sistema de certificação energética de forma a informar o cidadão sobre a qualidade térmica dos edifícios. 2006.

QUADROS, M. E. **Qualidade do Ar em Ambientes Internos Hospitalares: Parâmetros Físico-Químicos e Microbiológicos**. 2008. 135 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

SAKAMOTO, M. et al. CO2 emission rates from sedentary subjects under controlled laboratory conditions. **Building and Environment**, v. 211, n. 108735, 9 p. 2022. DOI 10.1016/j.buildenv.2021.108735.

SANTOS, M. L. C. O. **Qualidade do ar em ambientes internos e uma análise crítica da atual legislação: Estudo de caso em uma instituição de ensino**. 2017, 104 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Sanitária e Ambiental) – Instituto Federal do Espírito Santo, Vitória, 2017.

SANTOS, U. P. et al. Sick building syndrome in bank employees. **Revista de saúde pública**, v. 26, n. 6, p. 400–404, 1992. DOI 10.1590/s0034-89101992000600005.

SCE. **Nota Técnica - NT-SCE - 02 - Metodologia para auditorias periódicas de QAI em edifícios existentes no Âmbito do RSECE**. p. 1–50, 2009.

SCHIRMER, W. N. et al. A poluição do ar em ambientes internos e a síndrome dos edifícios doentes. **Ciência e Saúde Coletiva**, v. 16, p. 3583-3590, ago. 2011. DOI 10.1590/S1413-81232011000900026.

SEYAM, S. Types of HVAC Systems. In: KANDELOUSI, M. S. **HVAC System**, Londres: IntechOpen, 2018, cap. 4, p. 49-66. DOI 10.5772/intechopen.78942

SHAUGHNESSY, R. J. et al. A preliminary study on the association between ventilation rates in classrooms and student performance. **Indoor Air**, v. 16, n. 6, p. 465–468, jan./mar. 2006. DOI 10.1111/j.1600-0668.2006.00440.x.

SIDDIQUI, M.; JAYANTI, S.; SWAMINATHAN, T. CFD analysis of dense gas dispersion in indoor environment for risk assessment and risk mitigation. *Journal of Hazardous Materials*, v. 209-210, p. 177-185, 2012. DOI 10.1016/j.jhazmat.2012.01.007.

SONG, J.; MENG, X. The Improvement of Ventilation Design in School Buildings Using CFD Simulation. **Procedia Engineering**, v. 121, p. 1475–1481, 2015. DOI 10.1016/j.proeng.2015.09.073.

THORSTENSEN, E. et al. Air pollution sources and indoor air quality in schools. **Proceedings of Indoor Air**, p. 531–536, 1990.

UMWELT BUNDESAMT. **German Committee on Indoor Air Guide Values**. 2021. Disponível em: <https://www.umweltbundesamt.de/en/topics/health/commissions-working-groups/german-committee-on-indoor-air-guide-values#minutes-of-air-meetings>. Acesso em: 6 set. 2021.

VARELLA, J. Motta morre após 12 dias de internação: aos 57 anos, ministro morreu de insuficiência respiratória às 23h45 depois de insucesso no combate à infecção. **Folha de São Paulo**, São Paulo, 15 out 1997. Disponível em: <https://www1.folha.uol.com.br/fsp/brasil/fc20049806.htm>. Acesso em: 06 set 2021.

VELASCO, M. L. Z. **Estudo Exploratório da Qualidade do ar Interior em Escolas Públicas de Ensino Fundamental**. 2020. 142 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2020.

VENTURINI, V. M. **Análise do Escoamento em Ambientes internos com variação de posições de entrada de ar para otimização da ventilação**. 2020, 73 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2020.

WHO. **Air Quality Guidelines: Global Update 2005**. 1 ed. Copenhagen: Druckpartner Moser, 2006. 484 p.

WHO. **Guidelines for Air Quality: Selected Pollutants**, Copenhagen, 2010.

WISCOSIN DHS. **Carbon Dioxide**. 2022. Disponível em: <https://www.dhs.wisconsin.gov/chemical/carbondioxide.htm#:~:text=Exposure%20to%20CO2%20can%20produce,coma%2C%20asphyxia%2C%20and%20convulsions>. Acesso em: 24 jun. 2022.

YANG, L.; YE, M.; HE, B. J. CFD simulation research on residential indoor air quality. **Science of the Total Environment**, v. 472, p. 1137–1144, 2014. DOI 10.1016/j.scitotenv.2013.11.118.

ZHAO, Y.; FENG, Y.; MA, L. Numerical evaluation on indoor environment quality during high numbers of occupied passengers in the departure hall of an airport terminal. **Journal of Building Engineering**, v. 51, n. 104276, 21 p., 2022. DOI 10.1016/j.jobbe.2022.104276.

ZHENG, J. et al. Study on long-term variation characteristics of indoor CO₂ concentrations based on a data-driven method. **Energy and Buildings**, v. 256, n. 111760, 9 p., dez. 2021. DOI 10.1016/j.enbuild.2021.111760.