



UNIVERSIDADE
ESTADUAL DE LONDRINA

GABRIEL HIDEO TSURUKAVA BRAMBILLA

**VENTILAÇÃO NATURAL
EM AMBIENTE DE HIS:
CALIBRAÇÃO DE
MODELO DE
FLUIDODINÂMICA
COMPUTACIONAL (CFD)
COM BASE EM DADOS
EXPERIMENTAIS**

GABRIEL HIDEO TSURUKAVA BRAMBILLA

**VENTILAÇÃO NATURAL
EM AMBIENTE DE HIS:
CALIBRAÇÃO DE
MODELO DE
FLUIDODINÂMICA
COMPUTACIONAL (CFD)
COM BASE EM DADOS
EXPERIMENTAIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual de Londrina - UEL, como requisito para a obtenção do título de Mestre.

Linha de Pesquisa: Tecnologia e Gestão na Construção Civil.

Orientadora: Prof.^a Dra. Camila Gregório Atem.

Londrina
2026

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UEL

B815v Brambilla, Gabriel Hideo Tsurukava.

Ventilação Natural em Ambiente de HIS: Calibração de Modelo de Fluidodinâmica Computacional (CFD) com Base em Dados Experimentais / Gabriel Hideo Tsurukava Brambilla. - Londrina, 2026.
112 f. : il.

Orientador: Camila Gregório Atem.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual de Londrina, Centro de Tecnologia e Urbanismo, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2026.

Inclui bibliografia.

1. Calibração - Tese. 2. Simulação CFD - Tese. 3. Ventilação natural - Tese. 4. Gás traçador - Tese. I. Atem, Camila Gregório. II. Universidade Estadual de Londrina. Centro de Tecnologia e Urbanismo. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

CDU 62

VENTILAÇÃO NATURAL EM AMBIENTE DE HIS: CALIBRAÇÃO DE MODELO DE FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL (CFD) COM BASE EM DADOS EXPERIMENTAIS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual de Londrina - UEL, como requisito à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a Dra. Camila Gregório Atem
Universidade Estadual de Londrina - UEL

Prof.^a Dra. Thalita Gorban Ferreira Giglio
Universidade Estadual de Londrina - UEL

Prof.^a Dra. Marieli Azoia Lukiantchuki
Universidade Estadual de Maringá - UEM

Londrina, 15 de maio de 2026.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha família e à minha namorada, pelo constante apoio, incentivo aos estudos e estímulo à minha entrada no Programa de Pós-Graduação.

Aos colegas do curso e do laboratório E3sLAB por toda a convivência e troca de conhecimento ao decorrer desta etapa.

À Universidade Estadual de Londrina e ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil pela oportunidade acadêmica e toda a sua infraestrutura disponibilizada.

À minha orientadora, por toda dedicação, apoio e contribuições ao longo do trabalho.

Às professoras da banca, pelas contribuições e sugestões que enriqueceram o trabalho.

Por fim, à CAPES pelo apoio financeiro e fomento à minha pesquisa, essenciais para a realização do trabalho.

BRAMBILLA, Gabriel Hideo Tsurukava. **Ventilação natural em ambiente de HIS: calibração de modelo de fluidodinâmica computacional (CFD) com base em dados experimentais**. 2026. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2026.

RESUMO

A ventilação natural representa uma importante estratégia passiva com eficácia comprovada na literatura, sendo relevante na busca pelo conforto térmico dos usuários, melhoria de qualidade de ar e destacando-se por seu baixo custo e fácil aplicação. A análise desse fenômeno por meio de simulações de fluidodinâmica computacional (CFD) possui grande potencial, especialmente pela sua praticidade e flexibilidade em testar múltiplos cenários. Para que as simulações sejam utilizadas como instrumento de projeto desta estratégia natural, faz-se necessário a calibração de modelos que possam espelhar a realidade. Observa-se, no entanto que na literatura há poucos trabalhos que realizam medições da ventilação em ambientes não controlados reais e confrontam estes dados com simulações CFD. Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo a calibração de um modelo de simulação computacional de ventilação natural, a partir de dados experimentais obtidos por meio ensaio com gás traçador, visando avaliar a capacidade do modelo em reproduzir o comportamento do escoamento do ar do cômodo principal de uma habitação de interesse social (HIS). A simulação foi realizada através do *software* versão estudantil 2025 Ansys Fluent em protótipo de HIS localizado na Universidade Estadual de Londrina. O método inclui a calibração do modelo por meio da taxa de renovação de ar (ACH) obtida em ensaio experimental com gás traçador CO₂ em escala real e condições de campo, além da análise da sensibilidade do modelo frente à velocidade e ao ângulo de incidência do vento, bem como a avaliação qualitativa do fluxo do escoamento interno. Os valores de ACH simulados apresentaram a mesma ordem de grandeza dos resultados experimentais, com melhor concordância nas simulações com velocidades do vento de 0,2 m/s e 0,3 m/s, atingindo diferenças percentuais de 0,7%, 1,8% e 5,2%. Por outro lado, observou-se elevada variação nos casos com menores velocidades do vento (0,03 m/s e 0,06 m/s) com diferenças percentuais de até 67,7% e 80,3% em casos extremos, indicando limitações na calibração nessas condições. Dessa forma, a calibração foi alcançada de forma parcial, com potencial de aprimoramento mediante refinamento das condições de contorno e redução de incertezas associadas ao ensaio experimental e modelo numérico.

Palavras-chave: Calibração; ensaio gás traçador CO₂; HIS; simulação CFD; ventilação natural.

BRAMBILLA, Gabriel Hideo Tsurukava. **Natural Ventilation in Social Housing: Calibration of a Computational Fluid Dynamics (CFD) Model Based on Experimental Data**. 2026. 112 pp. Dissertation (Master's degree in Civil Engineering) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2026.

ABSTRACT

Natural ventilation represents an important passive strategy with proven effectiveness in the literature, being relevant in the pursuit of thermal comfort for users, improved air quality, and standing out for its low cost and ease of application. The analysis of this phenomenon through computational fluid dynamics (CFD) simulations has great potential, especially due to its practicality and flexibility in testing multiple scenarios. For simulations to be used as a design tool for this natural strategy, it is necessary to calibrate models that can reflect reality. However, it is observed that there are few studies in the literature that measure ventilation in real uncontrolled environments and compare these data with CFD simulations. In this context, the present work aimed to calibrate a computational simulation model of natural ventilation, based on experimental data obtained through a tracer gas test, in order to evaluate the model's ability to reproduce the airflow behavior of the main room of a social housing unit. The simulation was performed using the student version 2025 Ansys Fluent software in a prototype of a social housing unit located at the State University of Londrina. The method includes calibrating the model using the air exchange rate (ACH) obtained from an experimental test with CO₂ tracer gas at full scale and under field conditions, as well as analyzing the model's sensitivity to wind speed and angle of incidence, and a qualitative assessment of the internal flow. The simulated ACH values showed the same order of magnitude as the experimental results, with better agreement in simulations with wind speeds of 0.2 m/s and 0.3 m/s, reaching percentage differences of 0.7%, 1.8%, and 5.2%. On the other hand, high variation was observed in cases with lower wind speeds (0.03 m/s and 0.06 m/s), with percentage differences of up to 67.7% and 80.3% in extreme cases, indicating limitations in calibration under these conditions. Thus, calibration was only partially achieved, with potential for improvement through refinement of boundary conditions and reduction of uncertainties associated with the experimental test and numerical model.

Key-words: Calibration; CFD simulation; natural ventilation; tracer gas decay CO₂.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Etapas de uma simulação CFD.....	37
Figura 2 – Processo de calibração	42
Figura 3 – Montagem da habitação de sistema wood-frame.....	47
Figura 4 – Laboratório de Eficiência Energética e Sustentabilidade nas Edificações (E3sLab)	48
Figura 5 – Elevações com as respectivas orientações em relação aos pontos cardeais de cada face.	48
Figura 6 – Planta baixa do objeto de estudo	49
Figura 7 – Janela J1 tipo maxim-air – fachada da cozinha.....	50
Figura 8 – Janela J2 de correr – fachada da entrada principal.....	51
Figura 9 – Fachada da entrada principal	51
Figura 10 –Fachada da cozinha	52
Figura 11 –Dados da estação meteorológica de Londrina	53
Figura 12 –Rosa dos ventos das direções do vento na região.....	53
Figura 13 – Taxa de ventilação (ACH) obtida em cada ensaio.....	55
Figura 14 – Fluxograma dos casos analisados	57
Figura 15 –Representação das direções do vento consideradas.....	58
Figura 16 –Modelagem geométrica do objeto de estudo.....	63
Figura 17 –Modelagem geométrica do objeto de estudo – vista inferior	63
Figura 18 –Domínio considerado	64
Figura 19 – Detalhe das janelas J1 e J2	65
Figura 20 –Exemplo de malha gerada	67
Figura 21 –Malha gerada na região das janelas e grades com <i>inflation</i>	67
Figura 22 –Valores referência de métricas de <i>skewness</i> e <i>orthogonal quality</i>	68
Figura 23 – Regiões da <i>Law of the wall</i>	69
Figura 24 –Faixa de valores de y^+ - Caso 3.1	75
Figura 25 –Comparativo escoamento interno casos 17.1 e 21	89
Figura 26 –Comparativo escoamento interno casos 19.1 e 23	90
Figura 27 –Comparativo escoamento interno casos 20.1 e 24.	91

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Percentual de abertura de referência para ventilação	22
Tabela 2 – Resumo dos resultados obtidos na literatura consultada	46
Tabela 3 – Resumo das esquadrias e ambientes analisados nos estudos	50
Tabela 4 – Taxa de ventilação média por configuração de abertura.....	55
Tabela 5 – Referências de valores de z_0	61
Tabela 6 – Comparativo valores de velocidade estimados e medidos.....	61
Tabela 7 – Dados das malhas utilizadas – Primeira etapa.....	72
Tabela 8 – Caso com maior variação de ACH em função da malha.....	73
Tabela 9 – Coeficientes y^+ obtidos - Primeira etapa.	74
Tabela 10 – Coeficientes y^+ obtidos – Casos Adicionais Primeira etapa.	76
Tabela 11 – Comparativo de variação de ACH das simulações e experimentos	78
Tabela 12 – Impacto da abordagem LES no ACH estudado.....	80
Tabela 13 – Dados das malhas utilizadas – Segunda etapa.....	83
Tabela 14 – Coeficientes y^+ obtidos - Segunda etapa	84
Tabela 15 – Impacto do gradeamento nos valores de ACH obtidos	87
Tabela 16 – Casos com fluxo de escoamento interno avaliados	88

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Coeficiente de espaço urbano
A_{ef}	Área efetiva de ventilação
A_{efO}	Área efetiva de um orifício circular
AFR	Air Flow Rate (Taxa de fluxo de ar em massa)
ANVISA	Agência Nacional de Vigilância Sanitária
CCEE	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
C_d	Coeficiente de descarga
C_{dO}	Coeficiente de descarga de um orifício circular
C_{ext}	Concentração do gás traçador no exterior (ppm)
CFD	Computational Fluid Dynamics (Fluidodinâmica computacional)
C_p	Coeficiente de pressão do vento
DES	Detached Eddy Simulation
E3sLab	Laboratório de Eficiência Energética e Sustentabilidade nas Edificações
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
IAQ	Indoor Air Quality (Qualidade de ar interno)
INF	Cenário de taxa de infiltração
K	Coeficiente de espaço urbano
LES	Large Eddy Simulation
N	Número de renovações de ar
PFR	Purging Flow Rate
Q	Vazão volumétrica (m^3/s)
RANS	Reynolds-averaged Navier-Stokes
Rel k- ϵ	Modelo k- ϵ realizable
RNG k- ϵ	Modelo k- ϵ de renormalization group
RSM	Reynolds Stress Model

SGAR	State of Global Air Report
SST k- ω	Modelo k- ϵ shear stress transform
Std k- ϵ	Modelo k- ϵ Standard
UEL	Universidade Estadual de Londrina
V ₁₀	Velocidade do vento a 10 metros de altura medido na estação meteorológica (m/s)
VC	Cenário de ventilação cruzada
VU	Cenário de ventilação unilateral
V _z	Velocidade do vento (m/s)
Z	Altura da cumeeira (m)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	OBJETIVO GERAL.....	16
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
2.1	APLICAÇÕES DE VENTILAÇÃO NATURAL	18
2.2	MECANISMOS DE VENTILAÇÃO NATURAL	19
2.3	QUALIDADE DE AR INTERNO (IAQ) E TAXA DE RENOVAÇÃO DE AR (ACH)	20
2.4	NORMATIVAS	21
2.5	FATORES DE INFLUÊNCIA NA VENTILAÇÃO NATURAL	22
2.5.1	Air Flow Rate (AFR)	23
2.5.2	Coeficiente de Descarga (C_d).....	23
2.5.3	Coeficiente de Pressão do Vento (C_P)	24
2.5.4	Velocidade do Vento (V_z)	25
2.5.5	Área Efetiva de Ventilação (A_{ef})	26
2.5.6	Temperatura.....	28
2.5.7	Umidade	28
2.6	MÉTODOS DE AFERIÇÃO E ANÁLISE	29
2.6.1	Métodos Experimentais.....	29
2.6.1.1	Túneis de vento.....	30
2.6.1.2	Método do gás traçador CO_2	30
2.6.2	Simulação por Fluidodinâmica Computacional (CFD).....	32
2.6.2.1	Abordagens CFD.....	33
2.6.2.2	Modelos de turbulência	35
2.6.2.3	Etapas da simulação	37
2.6.2.3.1	<i>Modelagem geométrica</i>	38
2.6.2.3.2	<i>Definição de malha e domínio</i>	38
2.6.2.3.3	<i>Simulação e pós-processamento</i>	40
2.6.2.4	Verificação, calibração e validação do modelo	42
3	MÉTODO	47
3.1	OBJETO DE ESTUDO	47

3.1.1	Análise Climática.....	52
3.2	ENSAIO DO GÁS TRAÇADOR CO ₂	54
3.3	SIMULAÇÃO CFD	55
3.3.1	Primeira Etapa de Simulações	56
3.3.2	Segunda Etapa de Simulações	57
3.3.3	Variáveis Analisadas	58
3.3.4	Etapas de Simulação	62
3.3.4.1	Modelagem geométrica	62
3.3.4.2	Configuração da malha	66
3.3.4.3	Configuração do solver	69
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	72
4.1	MÉTRICAS DE MALHA – PRIMEIRA ETAPA.....	72
4.2	TAXA DE RENOVAÇÃO DE AR (ACH) – PRIMEIRA ETAPA	77
4.3	CUSTO COMPUTACIONAL – PRIMEIRA ETAPA	81
4.4	MÉTRICAS DE MALHA – SEGUNDA ETAPA	82
4.5	TAXA DE RENOVAÇÃO DE AR (ACH) – SEGUNDA ETAPA	86
4.6	ANÁLISE QUALITATIVA DO ESCOAMENTO INTERNO	87
4.7	CUSTO COMPUTACIONAL – SEGUNDA ETAPA	92
5	CONCLUSÕES	93
	REFERÊNCIAS.....	97
	APÊNDICES.....	108
	APÊNDICE A – RESULTADOS PRIMEIRA ETAPA.....	108
	APÊNDICE B – RESULTADOS SEGUNDA ETAPA.....	111

1. INTRODUÇÃO

A ventilação natural é uma estratégia passiva comprovadamente eficaz na promoção de conforto térmico aos usuários de edificações, podendo mitigar ou até mesmo eliminar a necessidade de climatização mecânica, quando prevista desde as etapas iniciais do projeto (Toledo, 1999; Lamberts *et al.*, 2014).

A mitigação do uso de climatização mecânica ganha relevância em cenário nacional, uma vez que o consumo de ventiladores e aparelhos de ar-condicionado e, conseqüentemente, o seu consumo energético se encontram em uma crescente significativa nos últimos anos. O consumo energético de ar-condicionado no período de 2005 a 2017 triplicou, alcançando uma representação, no ano de 2019, de quase 20% dos dados de consumo energético brasileiro (EPE, 2020; Doria *et al.*, 2021).

Dados mais recentes da Associação Nacional de Fabricantes de Produtos Eletroeletrônicos apontam que no primeiro semestre de 2023 ocorreu um crescimento na venda de unidades do modelo de ar-condicionado split de 16% quando comparado ao ano anterior. Além disso, ventiladores de mesa apresentaram um aumento de vendas de 34% e os de coluna 18% durante o mesmo período avaliado. No segundo semestre de 2023, com a tendência de aumento das temperaturas no Brasil, o crescimento se manteve, atingindo um pico de aumento de compras de aparelhos de ar-condicionado de 38%, segundo dados da Associação Brasileira de Refrigeração, Ar-condicionado, Ventilação e Aquecimento (ABRAVA). Já no ano de 2024, a associação constatou um crescimento de 36% nas vendas de aparelhos de ar-condicionado no país, ao passo que estimou outra expansão na casa dos 30% em 2025, consolidando o crescimento no cenário nacional atual.

Por outro lado, Cândido *et al.* (2008) reforçam que, na maior parte do território nacional, a principal alternativa ao resfriamento mecânico é a adoção da ventilação natural associada a dispositivos de proteção solar.

Bittencourt e Cândido (2008) destacam a importância da ventilação natural na realidade nacional, especialmente para a população de baixa renda, que não dispõe dos recursos necessários para a aquisição de aparelhos de refrigeração nem para a sua operação. Com isso, os autores ressaltam o potencial papel social da ventilação natural como estratégia de promoção do conforto térmico para a maior parte da população, além de ressaltar a escassez de bibliografia do tema, principalmente aplicado à realidade brasileira.

Estudos de Tabatcheik (2021) e Smaniotto Junior (2024) relatam a alta padronização de projetos de Habitações de Interesse Social (HIS) de programas governamentais, incluindo a orientação das aberturas. Dado fato implica na ausência de considerações climáticas locais, ocasionando prejuízo no desempenho térmico das edificações. A ventilação natural é citada como uma das principais estratégias passivas negligenciadas em projetos, não sendo incorporada de forma satisfatória com um grande potencial subaproveitado.

Adicionalmente, a ventilação natural adequada e eficiente é um fator chave na saúde pública. De acordo com estudos de 2024 da *State of Global Air Report* (SGAR), é estimado 8,1 milhões de mortes prematuras anuais ao redor do mundo em decorrência da vivência em locais com excessiva poluição no ar. Outro ponto a ser levantado é a sua importância na atenuação da transmissão de doenças por aerossóis, que ganhou destaque recente devido à pandemia de COVID-19, gerando a publicação de diversos estudos no período de 2021 a 2023 (Liu, S; Deng, Z, 2023; Wang, F *et al.*, 2023; Zhao, X, *et al.*, 2023).

Diante dos aspectos apresentados: conforto, energético, social e saúde pública, estudos de ventilação natural se mostram necessários, especialmente no contexto nacional, buscando uma maior otimização e aumento de eficiência na aplicação desta estratégia.

Os métodos de quantificação da ventilação natural mais utilizados na literatura consistem em métodos experimentais e métodos que fazem uso de simulações computacionais. O principal exemplo da categoria experimental consiste em estudos com túneis de vento, conhecidos por implicar uma maior robustez e confiabilidade nos resultados ao custo de onerosa infraestrutura e pouca flexibilidade. Com menor, mas ainda elevada confiabilidade, destacam-se os ensaios experimentais com gás traçador que envolvem custos significativamente inferiores quando comparados aos túneis de vento, mantendo-se como uma alternativa viável para a avaliação da ventilação (Sakiyama *et al.*, 2020; Wang e Chen, 2012).

Em relação às simulações, a elevada rapidez e flexibilidade são pontos fortes da ferramenta. Adicionalmente, uma vez calibrados e validados, os modelos servem como referência para simulações em projetos futuros, assim como aplicações em diferentes ambientes e condições de estudo semelhantes (Niu, S; Wang, A; Jin, Xing, 2022). A partir destes modelos pode-se, por exemplo, realizar simulações paramétricas e estudos de customização em massa de aberturas em HIS otimizando

a eficácia da estratégia de ventilação cruzada (Loche *et al.*, 2026).

Contudo, destaca-se que as simulações requerem um alto nível de expertise na operação dos *softwares*, além de custos com licenças e elevado entendimento técnico de mecânica dos fluidos. Nota-se também que um dos maiores desafios na aplicação da metodologia de fluidodinâmica computacional é o processo de calibração e validação da simulação (Hajdukiewicz *et al.*, 2013; Hajdukiewicz *et al.*, 2024). Os métodos mais aceitos de validação na literatura são a validação estatística e a validação experimental, sendo essa última, a mais consolidada (Vilas Boas e Vatauvuk, 2018).

É importante diferenciar o processo de calibração do modelo com o de validação. Jiang *et al.* (2004) e Hajdukiewicz *et al.* (2013) adotam o entendimento que o processo de calibração envolve o ajuste sistemático de parâmetros e condições de contorno da simulação CFD com base em método experimental já executado, enquanto o processo de validação relaciona a capacidade preditiva do modelo frente à demais variáveis independentes de um modelo já calibrado anteriormente. Observa-se que o processo de validação é significativamente mais complexo e rigoroso que o processo de calibração, sendo comumente realizado em conjunto com ensaios experimentais robustos de túneis de vento sob condições altamente controladas (Oberkampf e Trucano, 2002).

Com isso, o presente estudo utiliza simulações computacionais de caráter CFD (Computational Fluid Dynamics), usando como parâmetros e condições de contorno dados obtidos pelos estudos experimentais de gás traçador de Decker *et al.* (2023) com o intuito de calibrar as simulações realizadas.

O uso de dados de ensaios experimentais de Decker *et al.* (2023) se mostra de grande importância para justificar e calibrar os resultados das análises previstas neste trabalho, uma vez que o uso de uma técnica de calibração adequada e confiável, como a experimental, possibilita uma grande diminuição de possíveis incertezas e erros ao final da simulação (Persily, 2016; Sakiyama *et al.*, 2020). Kumar *et al.* (2021) destacam a importância de uma abordagem experimental nos processos de calibração e validação, sendo essencial para o seu êxito.

No contexto internacional, destacam-se pesquisas com forte enfoque nos processos de validação de simulações CFD aplicadas à ventilação natural, os quais demandam condições experimentais altamente controladas em laboratório e metodologia robusta. Hassan *et al.* (2020) e Prakash (2020) exemplificam estudos de

validação conduzidos por meio de experimentos em túneis de vento, enquanto Bu *et al.* (2019) e Liu *et al.* (2024) alcançaram a validação de modelos CFD a partir de ensaios experimentais com gás traçador.

No contexto nacional, o número de pesquisas relacionadas ao tema expandiu-se nos últimos anos, com enfoque em metodologias de menor complexidade e menor custo, buscando métodos experimentais mais acessíveis para a realidade brasileira, marcada por limitações de infraestrutura. Nesse cenário, destacam-se estudos recentes que empregaram ensaios experimentais em mesas d'água, devido a ser um método mais acessível e de fácil visualização para padrão de escoamento, como apresentados por Ribeiro *et al.* (2024); Custodio *et al.* (2023) e Silva *et al.* (2025).

Diante desse contexto, a presente pesquisa se mostra relevante por buscar a calibração de um modelo CFD com base em dados experimentais obtidos por ensaios de menor complexidade e custo, quando comparados aos realizados em túneis de vento, aplicados a um ambiente de Habitação de Interesse Social em escala local. Adicionalmente, a calibração do modelo baseada em dados obtidos em condições reais de campo, ou seja, fora de ambientes laboratoriais controlados, configura um diferencial do estudo, por aproximar os resultados simulados das condições reais locais.

1.1 OBJETIVO GERAL

Calibrar um modelo de simulação de fluidodinâmica computacional (CFD), com base no parâmetro de taxa de renovação de ar por hora (ACH), obtido por meio de ensaios experimentais com gás traçador de CO₂, visando avaliar a capacidade do modelo em reproduzir o comportamento do escoamento de ar do cômodo principal de uma habitação de interesse social (HIS).

1.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

- Avaliar o comportamento do modelo frente a diferentes variáveis, incluindo o refinamento da malha, o ângulo de incidência e a velocidade do vento, a presença de gradeamento nas aberturas e a escolha da abordagem de modelagem de turbulência (LES ou RANS).

- Avaliar qualitativamente o fluxo de escoamento interno.
- Contribuir com futuros estudos em CFD que priorizem a ventilação natural em HIS.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 APLICAÇÕES DE VENTILAÇÃO NATURAL

A ventilação natural é uma alternativa eficiente para a melhora do conforto térmico nos mais variados tipos de residências e recintos além de contribuir para a redução do consumo de energia mecânica para refrigeração de ambientes (Sha e Qi, 2020; Karimimoshaver *et al.*, 2023; Prakash, 2023). Adelikhah *et al.* (2023) apontam que em 2022 as pessoas gastaram aproximadamente 80% do seu tempo confinadas em ambientes internos como escritórios, salas de aula e residências. Isso evidencia o quanto uma adequada ventilação natural pode impactar diretamente na qualidade de vida de cada indivíduo. Em ambientes localizados em climas quentes e úmidos, sua importância se destaca ainda mais a ponto de ser uma das principais estratégias a ser adotada em estudos de conforto térmico na literatura (Jayasree *et al.*, 2021).

No Brasil, estudos de Sallal *et al.* (2012) e Asfour (2010) apontam a ventilação natural como uma das principais estratégias bioclimáticas. Lamberts *et al.* (2014), indicam a ventilação natural como a segunda estratégia bioclimática passiva mais importante em aplicação no país, sendo ultrapassada apenas pelo sombreamento.

O desempenho da ventilação natural depende de fatores externos e internos. Na grande maioria das vezes, os fatores externos estão fora do controle dos projetistas e por isso, o grande foco deve ser em torno dos fatores internos de ambientes (Belpoliti *et al.*, 2024). Liu e Lee (2020) citam os maiores fatores internos de impacto na ventilação natural: o *layout* da construção, posicionamento das aberturas na edificação e a sua orientação em relação ao vento.

Zhong *et al.* (2019) destacam a grande importância de considerar estratégias de ventilação natural desde a fase de concepção do projeto, para assim atingir desempenho satisfatório. Moraes (2017) enfatiza que caso o projeto da edificação não tenha priorizado a ventilação natural, dificilmente a edificação dispensará o uso de ventilação mecânica. Adicionalmente, a autora destaca a importância de estudos de ventilação natural como forma de predição do seu desempenho em escalas reais, economizando futuros gastos necessários para adaptação à normas vigentes. Belpoliti *et al.* (2024) evidenciam estudos que ilustram o impacto que diferentes *designs* e aberturas de janelas causam na ventilação natural, repercutindo diretamente na velocidade do ar, temperatura do ambiente e número de renovações do ar.

Além da sua aplicação no conforto térmico, a ventilação natural possui uma

grande contribuição no quesito higiênico. Scherer e Grigoletti (2023) classificam a ventilação higiênica como a que possui caráter permanente, sendo potencializada quando ocorre por aberturas elevadas. O aumento de número de renovações de ar do ambiente contribui para a qualidade do ar interno, do inglês *indoor air quality* (IAQ), de modo a reduzir e até mesmo evitar a transmissão de doenças por aerossóis (Jones *et al.*, 2020; Hou *et al.*, 2021).

A recente pandemia de COVID-19 desencadeou um maior número de estudos na área de modo a explorar o potencial da ventilação natural como mitigação da transmissão de patologias pelo ar (Liu e Deng, 2023; Liu *et al.*, 2024; Portarapillo *et al.*, 2024). Portarapillo *et al.* (2024) estudaram a probabilidade de infecção por um agente patológico aéreo em um ambiente com diferentes configurações de distâncias, ventilação natural, tempo e uso de máscaras de proteção pelos ocupantes. Logo após o uso de máscaras, a ventilação natural se mostrou o principal fator de impacto na probabilidade de infecção. Uma velocidade de entrada de ar da ordem de 0,9 m/s no ambiente, com usuários distantes a três metros da fonte contaminadora equipada com máscara FFP2, por um período de quinze minutos resultou em uma probabilidade estimada de contaminação de 11,2%. O mesmo caso, porém, sem a ventilação natural de entrada do ambiente, alcançou uma probabilidade de contaminação da ordem dos 25%. Liu e Deng (2023) e Liu *et al.* (2024) também alcançaram resultados semelhantes, destacando o potencial da ventilação na mitigação da transmissão de doenças por aerossóis.

2.2 MECANISMOS DE VENTILAÇÃO NATURAL

A literatura apresenta diversas configurações e mecanismos de ventilação natural, sendo os principais a ventilação natural cruzada, unilateral e efeito chaminé. Dentre os mecanismos mencionados, a ventilação natural cruzada se destaca em possuir a maior eficiência em número de renovações de ar por hora (Zhang *et al.*, 2020). Seu funcionamento consiste na presença de aberturas em faces opostas do ambiente, de modo que o ar flua de uma face de entrada para outra face de saída devido à diferença de pressão (Scherer e Masutti, 2019). As aberturas podem ser tanto na configuração janela-janela ou porta-janela e possuem um melhor funcionamento quando se atinge o efeito por meio de uma fachada a outra dentro da edificação. Contudo, apesar de ser uma solução de baixo custo e boa eficiência, ela tende a gerar algumas zonas de baixa circulação de ar dentro do ambiente,

dependendo dos objetos, divisões, áreas e ângulos de aberturas presentes no interior da edificação, necessitando ser cuidadosamente analisada (Christmann, *et al.*, 2015).

Já a estratégia de ventilação natural unilateral consiste na existência de aberturas no interior de um ambiente em apenas uma única face, tendo sua eficiência reduzida quando comparada a ventilação cruzada. Com isso, é uma solução que deve ser priorizada em função da impossibilidade da cruzada, podendo ser aplicada de forma satisfatória em casos de pequenos ambientes (Rodrigues, 2008).

Por fim, um efeito conhecido e explorado na literatura em estudos da área de ventilação natural é o efeito chaminé. O fenômeno ocorre quando há massas de ar com diferentes temperaturas, de modo que o ar mais aquecido se expande, reduzindo sua massa específica e ficando mais leve, com tendência de ascensão em relação ao ar mais frio, de maior massa específica. Consequentemente são geradas zonas de pressões diferentes no ambiente, ocasionando o deslocamento de massas de ar (Christmann, *et al.*, 2015).

2.3 QUALIDADE DE AR INTERNO (IAQ) E TAXA DE RENOVAÇÃO DE AR (ACH)

A qualidade do ar interno (IAQ) é influenciada por diversos fatores, sendo os principais: a taxa de renovação do ar e concentração de poluentes e gases. Com isso, o seu monitoramento consiste na definição de limites mínimos de número de renovações do ar e limites máximos aceitáveis de concentração de poluentes e gases no ar. Os poluentes mais usuais são os materiais particulados de 1 e 2,5 μm (PM_{10} e $\text{PM}_{2,5}$), enquanto os gases mais usuais na normativa são o monóxido e dióxido de carbono (CO e CO_2).

A taxa de renovação de ar representa o número de vezes que o ar de um ambiente é renovado por um determinado período (em inglês, Air Changes per Hour – ACH), sendo uma métrica de fácil interpretação e aplicação para análise de ventilação natural em ambientes fechados (Costola, *et al.*, 2009; Sakiyama *et al.*, 2020). Além disso, o ACH é frequentemente utilizado como parâmetro analisado em processos de validação e calibração de modelos CFD com estudos experimentais (Wang e Chen, 2012; Kusotova, *et al.*, 2019). Em casos normativos, este parâmetro é habitualmente associado ao número mínimo de renovações de ar necessário por pessoa, sendo representada em unidades de L/s por pessoa. Uma taxa de ventilação natural satisfatória é essencial para atingir parâmetros de qualidade de ar interna (IAQ), regulando a concentração de poluentes e gases indesejáveis (Liu *et al.*, 2024).

Materiais particulados PM₁ e PM_{2.5} são encontrados em altas concentração no ar em ambientes urbanos e industriais. A principal fonte de emissão é a queima de combustíveis fósseis pelos mais variados usos. Entre os efeitos adversos para a saúde, destaca-se desde irritações em mucosas e problemas respiratórios em concentrações baixas a até riscos de câncer e acidente vascular cerebral (AVC) em altas concentrações (Tikul *et al.*, 2022).

O CO₂ é um componente liberado continuamente pelo fenômeno da respiração, portanto é comum medir altas taxas de concentração de CO₂ em locais de alta presença de pessoas (Muelas *et al.*, 2022). Apesar de ser um gás comum, altas taxas de concentração podem oferecer riscos à saúde e, portanto, devem ser monitoradas. Concentrações acima de 1000 ppm causam sonolência aos ocupantes, com alguns podendo apresentar sintomas de fadiga ocular, rinite alérgica e dermatite atópica, enquanto concentrações elevadas a partir de 3000 ppm são conhecidas por causar hipertensão arterial, dores de cabeça e tonturas (Cho *et al.*, 2023).

2.4 NORMATIVAS

No início de 2021, durante o auge da pandemia de COVID-19 nas Américas, a Organização Pan-Americana da Saúde em conjunto com a Organização Mundial de Saúde (OMS) publicou um roteiro de especificações e recomendações para boa ventilação em ambientes internos. Nesse documento é definido um requisito mínimo de taxa de ventilação de ambientes residenciais de 10 L/s por pessoa equivalente a 36 m³/h. Esse valor foi inspirado pela norma europeia EN 16798-7: Ventilation for buildings – Calculation methods for the determination of air flow rates in buildings (2017), e sustentado pela norma norte-americana ASHRAE 24-2015: Guide line – Ventilation and indoor air quality in low-rise residential buildings. Por meio da resolução nº 09 de 2003, a agência nacional de vigilância sanitária (ANVISA) regulamenta uma taxa mínima de renovação de ar 7,5 L/s, equivalente a 27 m³/h para ambientes internos climatizados, além de definir uma concentração máxima de CO₂ de 1000 ppm (Muelas *et al.*, 2022; Tikul, *et al.*, 2022 Liu, *et al.*, 2024).

Apesar de ser uma norma que trata sobre condicionamento de ar em ambientes climatizados, a norma brasileira NBR 16401-3: Instalações de condicionamento de ar – Sistemas centrais e unitários – Parte 3: Qualidade do ar interior (2024), abrange em seu escopo informações relevantes ao tema. A norma estipula taxas mínimas de renovação de ar por pessoa de 27 m³/h para ambientes

internos de escritórios e residenciais, 30 m³/h para ambientes comerciais e 40 m³/h para ambientes hospitalares. Já para a concentração máxima de CO₂ em ambiente interno, a norma opta por considerar uma concentração máxima de 1000 ppm enquanto estabelece limites máximos de 50 µg/m³ e 25 µg/m³ para PM₁ e PM_{2,5} respectivamente. Esses valores representam limites para atingir um ar interior de qualidade aceitável, o qual a normativa define como: ar que não contém poluentes em concentração prejudicial à saúde ou ao bem-estar e que é percebido como satisfatório pela grande maioria (80% ou mais) dos ocupantes do recinto. Além disso, a NBR 15575-4: Edificações habitacionais – Desempenho parte 4: Requisitos para os sistemas de vedações internas e externas (2021), faz uma pequena menção na necessidade de uma área de abertura mínima para ventilação natural nas residências, sendo os valores recomendados dependentes da zona bioclimática da qual se encontra o recinto e da área de piso (tabela 1).

Tabela 1: Percentual de abertura de referência para ventilação.

Percentual de abertura para ventilação ($P_{V,APP}$)		
%		
ZB ^a 1 a 7	ZB 8 - Região Norte do Brasil	ZB 8 - Regiões Nordeste e Sudeste do Brasil
$P_{V,APP} \geq 7,0$ % da área de piso	$P_{V,APP} \geq 12,0$ % da área de piso	$P_{V,APP} \geq 8,0$ % da área de piso
^a ZB é a zona bioclimática, definida pela ABNT NBR 15220-3. Unidades habitacionais com APP que adotarem valores de percentual de abertura para ventilação inferiores aos limites desta Tabela devem ser avaliadas por meio do procedimento de simulação computacional, conforme a ABNT NBR 15575-1:2021, 11.4. NOTA Exclusivamente na aplicação desta Tabela, os APP relativos a quarto com <i>closet</i> podem considerar como área de piso ($A_{p,APP}$) somente o espaço delimitado pela ocupação do quarto, excluindo-se a área do <i>closet</i>.		

Fonte: NBR 15575-4, 2021.

Dentre os limites apresentados, nota-se que o limite mais restritivo para ambientes residenciais é apresentado pelo roteiro de especificações e recomendações para boa ventilação em ambientes internos da Organização Pan-americana de Saúde com o valor de 36 m³/h por pessoa. Isso se deve possivelmente ao caráter pandêmico o qual fazia presente durante a publicação, contudo, normas internacionais como a EN 16798-7 já definiam esses valores anteriormente à pandemia.

2.5 FATORES DE INFLUÊNCIA NA VENTILAÇÃO NATURAL

A seguir são discutidos alguns fatores que influenciam diretamente a

ventilação natural e sua taxa de renovação de ar por hora (do inglês, air changes per hour, ACH) em ambientes fechados.

2.5.1 Air Flow Rate (AFR)

A taxa de vazão de ar do ambiente (do inglês, air flow rate, AFR), representa a vazão de ar que entra por determinada abertura. Na literatura, este parâmetro já foi estimado indiretamente por Loura, *et al.* (2005) por meio da velocidade do vento medida no ponto central da abertura com auxílio de anemômetros. Contudo, Cóstola (2006) ressalta a imprecisão desta metodologia, recomendando a sua medição de forma indireta por métodos experimentais como de gás traçador.

A fórmula de cálculo deste parâmetro é definida como:

$$AFR = V * ACH \quad (1)$$

Onde:

AFR é a taxa de vazão de ar do ambiente em m³/h, V representa o volume do ambiente em m³ e por fim, ACH é o número de renovações de ar no ambiente por hora em h⁻¹.

Ressalta-se a correlação direta entre os parâmetros de AFR e ACH, portanto, os demais parâmetros citados a seguir neste tópico impactam diretamente em ambas as variáveis.

2.5.2 Coeficiente de Descarga (C_d)

Andrade (2013) define o coeficiente de descarga (C_d) como a razão entre a vazão de escoamento real (Q_{real}) e vazão de escoamento teórico ideal (Q_{teórica ideal}), ilustrada pela equação 2.

$$C_d = \frac{Q_{real}}{Q_{teórica\ ideal}} \quad (2)$$

A vazão teórica ideal representa o caso em que a pressão exercida pelo vento se converte integralmente em fluxo de escoamento, fato que não ocorre na vazão real. Em casos práticos, uma parte da energia do escoamento sofre perdas, sendo dissipada em forma de calor e turbulência. Esta diferença é contabilizada nos modelos por meio do coeficiente de descarga.

Estudos de Chu *et al.* (2009) sobre ventilação natural cruzada indicaram que

o coeficiente de descarga depende do ângulo de incidência do vento, além da direção do fluxo de ar incidente e a velocidade do vento, ao mesmo tempo que não foram detectadas influências significativas da turbulência externa e porosidade da parede.

Para Andrade (2013) esta variável se torna problemática de estimar com precisão por depender diretamente da orientação do vento e do sentido do fluxo na abertura, sendo fatores sujeitos a grande variabilidade ao decorrer do tempo. Adicionalmente, o autor ressalta a dificuldade de considerar este fator durante as simulações CFD, sendo uma fonte potencial de erros e incertezas. Este coeficiente é utilizado na estimativa de área efetiva da abertura, impactando diretamente na taxa de renovação de ar do ambiente e será visto com mais detalhes no tópico 2.6.5.

2.5.3 Coeficiente de Pressão do Vento (C_p)

O intuito desse coeficiente C_p é normalizar a pressão pontual local com a pressão dinâmica, sendo definido como a razão entre a diferença da pressão estática medida em dado ponto na envoltória e a pressão estática de referência do escoamento sobre a pressão dinâmica do fluido incidente (Anderson, 2011; Munson, *et al.*, 2013; Blocken, 2015). A equação 3 a seguir ilustra o cálculo deste coeficiente.

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{q_\infty} \quad (3)$$

Onde:

p é a pressão estática pontual da envoltória, p_∞ representa a pressão estática do escoamento de referência (do ambiente) e q_∞ é a pressão dinâmica de fluxo de ar não perturbado (escoamento livre).

Andrade (2013) ressalta que este coeficiente está estreitamente relacionado à forma do edifício, porosidade da parede, direção do vento, velocidade do vento e sua densidade. O principal meio de estimar este coeficiente é por meio de ensaios experimentais, porém alguns *softwares* CFD tem implementado como ferramenta o uso de equações semiempíricas para a estimativa deste coeficiente em suas simulações. Apesar do uso de equações semiempíricas poder funcionar em alguns casos, o seu uso é limitado a determinadas configurações simples de ambientes e possuem uma precisão consideravelmente abaixo dos coeficientes originários de ensaios experimentais, sendo, portanto, mais uma possível fonte de incerteza dos

resultados das simulações (Andrade, 2013).

O software utilizado como solver no desenvolvimento deste trabalho, o *ANSYS Fluent*, não requer a definição explícita como parâmetro de entrada, pois este parâmetro é calculado implicitamente durante a solução numérica a partir das condições de contorno e modelagem utilizada (Ansys, 2023).

2.5.4 Velocidade do Vento (V_z)

Este é um dos principais fatores de influência na ventilação natural e impacta em ambos os coeficientes apresentados anteriormente (Teppner *et al.*, 2014). O seu monitoramento na literatura é realizado por meio de anemômetros, que convertem o movimento do vento em dados numéricos a serem convertidos em valores de velocidade (Cóstola, 2006).

Há diversos tipos de anemômetros disponíveis, com grande variação de complexidade e precisão. Em simulações CFD, é uma das principais condições de contorno utilizadas (Duarte Junior, 2023). Maiores detalhes sobre condições de contorno são discutidos no tópico 2.7.2.3.3.

Andrade (2013) destaca a dificuldade do monitoramento adequado da velocidade do vento, sendo uma variável com alta sensibilidade às condições do ambiente. Os locais de medição e a margem de variação aceitável variam dentro da literatura. Saha *et al.* (2020) em seu estudo, utilizaram anemômetros de fio quente de alta precisão em um ambiente em pequena escala controlado e considerou aceitável uma variação de 3% entre os valores medidos em intervalos de até dez minutos. Lança *et al.* (2021) por sua vez, também utilizou anemômetros de fio quente e aceitaram uma variação de velocidade de até 15% em pontos críticos do ambiente.

Lamberts e Pereira (2014) dissertam sobre uma equação de velocidade do vento calculada a partir de um ponto no qual a velocidade do vento é conhecida, sendo esse ponto medido pelas estações meteorológicas mais próximas. Neste equacionamento são levados em consideração coeficientes relacionados à topografia do terreno e entorno do ambiente. Contudo, esta abordagem é apenas um método simplificado sujeito a diversos erros e incertezas presentes na distância entre o ponto conhecido e o ponto de interesse, não sendo recomendada em estudos que necessitam de uma maior confiabilidade.

2.5.5 Área Efetiva de Ventilação (A_{ef})

A área da abertura das esquadrias é mais um fator decisivo na ventilação natural. A princípio, Lamberts *et al.* (2013) classificam a área de abertura referente ao tipo de esquadria utilizada. Esta classificação é simples e intuitiva, considerando que uma janela do tipo guilhotina possui uma abertura máxima de 50%, a esquadria possuirá apenas 50% de área útil para ventilação, enquanto uma basculante terá sua área útil relacionada ao seu ângulo de abertura, ao mesmo tempo que uma janela do tipo maxim-ar que consegue abrir quase que totalmente, terá sua abertura útil próxima dos 100%.

Contudo, destaca-se que alguns tipos de esquadrias quando abertas, possuem componentes externos atuando como obstáculo para a ventilação, como é o caso da própria janela tipo maxim-ar. Além disso, da teoria dos orifícios é possível notar que ao passar por uma abertura, o fluido tende a sofrer um estreitamento aumentando sua velocidade e reduzindo a área efetiva de passagem, sendo ela menor que a área de abertura (Heiselberg e Sandberg, 2006).

Como forma de contornar estas falhas, a literatura sugere o uso de um coeficiente de descarga (C_d) que ao multiplicar a área livre da abertura, tende a ponderar estas imperfeições e resultar em uma área efetiva de ventilação mais próxima da realidade (Flourentzou *et al.*, 1998).

Publicações já dos anos 90 como de Flourentzou *et al.* (1998) procuram estimar coeficientes de descarga por estratégias experimentais para determinados tipos de esquadrias e aberturas. Com o decorrer do tempo, ensaios mais sofisticados surgiram, estimando coeficientes com maior precisão para casos mais complexos, como os trabalhos de Heiselberg e Sandberg (2006) e Yi *et al.* (2018). Porém, casos em que partes da esquadria prejudicam o fluxo da ventilação quando abertas e que envolvem ângulos de abertura ou de giro como as janelas pivotantes, continuam sendo casos desafiadores de estimar um coeficiente de descarga adequado (Yi *et al.*, 2018).

Outra estratégia para obter a área efetiva de ventilação é por meio de ensaios laboratoriais específicos para cada esquadria. Esta metodologia é incentivada a ser feita pelo próprio fabricante de esquadrias através da metodologia da norma europeia EN 13141. Apesar deste método gerar os resultados mais confiáveis, ele possui algumas limitações como: elevado custo envolvido e alta especificidade para determinadas esquadrias. Adicionalmente, Fernandes *et al.* (2020) destacam a

dificuldade em encontrar esquadrias não europeias submetidas a este método ou similar.

Como alternativa simplificada para casos em que se tenha dificuldade em obter o coeficiente de descarga (C_d), Jones *et al.* (2016) dissertam sobre a possibilidade de igualar a área efetiva (A_{ef}) da abertura com a área efetiva de um orifício circular (A_{eqO}) que possua a mesma vazão da área efetiva (A_{ef}) sob condições iguais de pressão. Esta igualdade é mostrada na equação (4).

$$A_a * C_d = A_{eqO} * C_{dO} \quad (4)$$

Onde:

A_a representa a área de abertura da esquadria, C_d representa o coeficiente de descarga desta esquadria, sendo uma variável desconhecida, A_{eqO} representa a área equivalente de um orifício circular com a mesma vazão da área efetiva da abertura (A_{ef}) e C_{dO} é o coeficiente de descarga de um orifício circular, sendo uma constante conhecida em laboratório com um valor aproximado de 0,61. Nota-se que o termo ($A_a * C_d$) é equivalente à área efetiva de abertura (A_{ef}), sendo a principal variável de interesse em estudos de ventilação. Substituindo os termos por A_{ef} e isolando A_{eqO} , é possível alcançar a equação 5, a qual possibilita o cálculo da área efetiva (A_{ef}) apenas conhecendo o valor de sua área equivalente de orifício circular (A_{eqO}) e a constante C_{dO} de 0,61.

$$A_{eqO} = \frac{A_{ef}}{C_{dO}} \quad (5)$$

Os autores salientam que esta simplificação possui desempenho satisfatório para estimar a área efetiva de ventilação (A_{ef}) apenas em casos simples e de fluxos unidirecionais, possuindo uma tendência de aumento na imprecisão quanto maior a complexidade da abertura estudada. Por isso, o autor ainda recomenda, sempre que possível, a obtenção do coeficiente de descarga (C_d) pelos métodos tradicionais em casos mais complexos.

Para casos em que há a existência de múltiplas aberturas simultâneas na mesma fachada, Jones *et al.* (2016) também fornece um método de ponderação de áreas efetivas (A_{efs}) ilustrado pela equação 6 a seguir.

$$\frac{1}{A_{eft}^2} = \sum_{i=1}^j \left(\frac{1}{A_{efi}} \right)^2 \quad (6)$$

Onde:

A_{eft} é a área efetiva total atuante na fachada, j é o número máximo de aberturas presentes e A_{efi} é a área efetiva de cada abertura individual.

2.5.6 Temperatura

A temperatura está intrinsicamente ligada ao mecanismo de ventilação natural por efeito chaminé, porém ainda influencia os demais mecanismos de ventilação. Adicionalmente, devido à ligeira diferença de densidade entre o ar quente e o ar frio o monitoramento de temperatura pode impactar o coeficiente de pressão do vento (C_P). (Larsen, 2008).

O monitoramento da temperatura interna permite atestar a aplicação da ventilação natural como estratégia passiva de conforto térmico. Porém, vale ressaltar que a temperatura interna depende adicionalmente das propriedades térmicas dos materiais da edificação, como: a resistência térmica, capacidade térmica, atraso térmico entre outros; além da própria existência de usuários e equipamentos dissipadores de energia no ambiente (Batista, 2005).

Lança *et al.* (2021) destacam os valores de temperatura do ar nas aberturas da edificação como principal condição de contorno utilizada em suas simulações CFD.

Em conjunto com a umidade, a temperatura interna está relacionada ao efeito de empuxo (*buoyancy* do inglês), sendo o principal fenômeno por trás do efeito chaminé (Gan, 2006).

2.5.7 Umidade

A umidade relativa do ar é um parâmetro muitas vezes secundário em análises de ventilação natural, mas possui influência na temperatura, empuxo e consequentemente no conforto térmico. Nem sempre o seu monitoramento é feito na literatura, porém, quando ocorre, protímetros são a principal ferramenta para a medição deste parâmetro.

Em estudos mais específicos de ventilação, como o caso de Al-Rawi (2022) e de Wei, *et al.* (2010), a umidade adquiriu destaque. O primeiro autor estudou a qualidade do ar (IAQ) por meio da ventilação natural em uma residência australiana em uma região com uma umidade relativa do ar elevada constante. Neste trabalho, o

autor classificou a alta umidade como a grande causa de desconforto, focando seus esforços em medidas de atenuação deste parâmetro.

Já no estudo de Wei, *et al.* (2010) foi testado a influência de diferentes parâmetros na ventilação natural cruzada, sendo a umidade um deles. No estudo, os autores concluíram que umidades em nível superior a 60% ocasionam 0,4°C de aumento de temperatura a cada incremento de 10% em seu valor impactando no conforto térmico.

2.6 MÉTODOS DE AFERIÇÃO E ANÁLISE

Zhang *et al.* (2021) destacam os empecilhos ao analisar a ventilação natural, devido à dificuldade na quantificação e controle dos parâmetros relacionados, como velocidade do vento, pressão e efeitos de turbulência. O mesmo estudo aponta como principais metodologias adotadas na literatura: modelos analíticos, modelos de rede de fluxo, ensaios experimentais como de túneis de vento ou gás traçador e simulações computacionais fluidodinâmicas (CFD).

A análise por meio de métodos experimentais e as por meio de simulações CFD vêm ganhando destaque na literatura, sendo frequentemente encontrados trabalhos que façam uso de uma, ou até mesmo ambas as metodologias (Persily, 2016; Sakiyama *et al.*, 2020; Liu *et al.*, 2024; Xinyu, 2024). Metodologias experimentais são conhecidas por gerar resultados de grande nível de confiabilidade, enquanto simulações CFD são populares pela sua praticidade (Hoof *et al.*, 2017). Morais (2017) indica que simulações CFD tendem a se destacar em popularidade em estudos futuros devido a um aumento de capacidade computacional, desenvolvimento de interfaces mais amigáveis, um aumento na precisão e confiabilidade de *softwares* relacionados. Com isso, é dado um enfoque maior nessas duas categorias de metodologia a seguir.

2.6.1 Métodos Experimentais

Apesar de métodos experimentais muitas vezes serem recomendados nos estudos (Persily, 2016; Saha *et al.*, 2020; Liu *et al.*, 2024), deve-se atentar que pequenos erros de planejamento, execução e imperfeições podem acarretar erros extremamente significativos, chegando na casa dos 100% (Fiedler *et al.*, 2014). Este fato ocorre devido à grande sensibilidade presente no monitoramento de parâmetros

de ventilação natural, necessitando um controle rígido e cauteloso na sua aplicação (Yi *et al.*, 2022).

É importante enfatizar que há diversos métodos experimentais de análise de ventilação natural utilizados na literatura (Sakiyama *et al.*, 2020), contudo, é destacado nessa revisão os métodos de ensaio de gás traçador e túneis de vento.

2.6.1.1 Túneis de vento

Ensaio de túneis de vento possuem uma grande relevância em análises de ventilação natural. Uma das suas principais aplicação consiste na função de validação de experimentos de simulações CFD (Sakiyama *et al.*, 2020). O procedimento fundamenta-se em criar um protótipo de ambiente controlado com o objeto de estudo em seu interior, que irá simular a ventilação por meio de ventilação mecânica controlada. Com isso, os parâmetros de interesse são medidos em pontos estratégicos por meio de sensores. Essa metodologia é conhecida por produzir resultados robustos, porém com custos significativos, configuração limitada e demandar um alto cuidado na montagem do experimento (Sakiyama *et al.*, 2020; Prakash, 2023).

Prakash (2023) aponta algumas dificuldades na execução do seu ensaio experimental de túnel de vento. Apesar do ambiente controlado, o autor cita a complexidade em atingir e manter o real número de Reynolds esperado com exatidão durante o ensaio. É importante notar que o número de Reynolds é o principal parâmetro adimensional que caracteriza o regime de escoamento de um fluido e possui estreita relação com o comportamento do fluido. Adicionalmente, o pesquisador destaca a importância de se atentar à detalhes como a possibilidade do objeto de estudo em contato com a ventilação forçada e a superfície do interior do túnel de vento poder ocasionar vórtices indesejáveis devido à compressão do fluido nessas regiões, que não são condizentes com a situação real ocasionando erros significativos.

2.6.1.2 Método do gás traçador CO₂

O método do gás traçador é um método experimental que consiste no monitoramento da concentração de um gás em um ambiente por determinado intervalo de tempo. O detalhamento do método é descrito pela norma internacional ASTM E741 (2017) e é dividido em três possíveis abordagens. A primeira é por meio

do decaimento da concentração do gás, onde é injetado uma determinada concentração e é feito o monitoramento da sua concentração ao longo do tempo por sensores instalados em locais estratégicos. Já a segunda e a terceira abordagem são a injeção e concentração constante de gás, respectivamente. Few (2019) relata o maior custo envolvido em equipamentos necessários para a execução dessas duas abordagens, além de sua maior complexidade, enquanto a abordagem de decaimento é mais simples, menos custosa e ainda sim possui resultados confiáveis e relevantes, sendo a abordagem recomendada na maioria dos casos.

Cardoso *et al.* (2020) destaca a equação (7) utilizada na norma internacional ASTM-E741 para um típico ensaio de gás traçador por decaimento. A equação é baseada no princípio de balanço de massas e parte do pressuposto que a temperatura interna e externa, assim como a velocidade do vento da abertura de entrada são aproximadamente constantes e o gás traçador está perfeitamente misturado com o ar do recinto.

Estudos de Almeida *et al.* (2020) apontam que o fator temperatura não impacta significativamente em ensaios de gás traçadores de ventilação natural quando a diferença de temperatura interna e externa é menor que 3°C.

$$V * \frac{dC_t}{dt} = G + Q * C_{ext} - Q * C_{(t)} \quad (7)$$

Onde:

V é o volume do ambiente em m³, C_(t) é a concentração do gás traçador em determinado intervalo de tempo em ppm, t é o tempo em segundos, G é a produção do gás traçador do interior em cm³/s, Q é taxa de renovação do ar em m³/s e C_{ext} é a concentração do gás traçador no exterior em ppm. Persily (2016) destaca o nível de confiabilidade desta metodologia, considerando-a uma das mais robustas, sendo contemplada em normas internacionais.

O gás traçador utilizado pode variar na literatura, contudo, o CO₂ é um dos gases mais presente nessa metodologia. Isso se deve pelo CO₂ possuir características vantajosas ao método como: ser um gás não tóxico, não inflamável, não reativo com o ambiente, possuir facilidade na medição da concentração com instrumentação de baixo custo e possuir boa capacidade de se misturar ao ar, por ter densidade similar (Cui *et al.*, 2015; Few 2019). Além disso, o CO₂ é produto da respiração, podendo utilizar o próprio CO₂ emitido pelos ocupantes como gás traçador a ser monitorado (Roulet e Foradini, 2002).

Em relação ao intervalo de tempo monitorado, intervalos curtos (de poucos minutos a duas horas) tendem a gerar resultados expressivos para análise do comportamento de dispersão de poluentes pontuais, porém podem não possuir robustez suficiente para análise da ventilação natural como um todo do objeto de estudo. Intervalos longos de análise (dias, semanas e até meses), por outro lado, tendem a gerar resultados sólidos, porém a interpretação dos resultados é desafiadora pela taxa de ventilação possuir uma inclinação natural a instabilidade e variação ao decorrer do tempo (Bornehag *et al.*, 2005). Por isso, é mais usual considerar um tempo de análise intermediário, sendo já suficiente para alcançar resultados de significativa confiabilidade (Few, 2019).

Roulet e Foradini (2002) indicam algumas limitações no uso da metodologia de gás traçador. A principal limitação é relacionada à sua aplicação em objetos de estudos com múltiplos ambientes, como por exemplo uma residência com diversos cômodos com múltiplas aberturas. Nesse caso, a abordagem de gás traçador tende a ser dificultada pela complexidade envolvida, prejudicando o monitoramento adequado e impactando nos resultados (Few, 2019). A principal consequência disso é que a aplicação do método parte do pressuposto do ambiente ser considerado como uma zona única, ou seja, considerando que ocorra apenas troca de ar do ambiente analisado com o meio exterior, sem a influência outros ambientes internos. Few (2019) destaca que até é possível a aplicação do método em múltiplas zonas simultâneas, porém é extremamente incomum estudos com essa abordagem na literatura, pelo alto custo e complexidade envolvida, tornando inviável na maioria das vezes. Adicionalmente, Persily (2016) salienta que cada ensaio de gás traçador está significativamente suscetível às condições climáticas e *layouts* do ambiente, não sendo adequado extrapolações de dados para diferentes configurações.

Uma grande aplicação de ensaios de gás traçador é a possibilidade de realizá-los em conjunto com análises de simulação CFD. Dessa forma, é possível comparar os resultados de ambas as análises com o intuito de calibrar e até mesmo validar o modelo computacional. Detalhes sobre a validação e calibração de modelos são discutidas no tópico 2.6.2.4 (Persily, 2016; Saha *et al.*, 2020; Park *et al.*, 2022).

2.6.2 Simulação por Fluidodinâmica Computacional (CFD)

A simulação CFD (Computational Fluid Dynamics, em inglês) é uma metodologia de análise de fluídos com auxílio computacional utilizada para as mais

diversas aplicações em situações de escoamento dos mais variados fluídos. É uma estratégia explorada nas áreas das engenharias mecânica, aeronáutica, automotiva, civil e até biomédica (Sakiyama *et al.*, 2020; Duarte Junior, 2023). A aplicação em projetos torna a simulação CFD uma ótima ferramenta preditiva, podendo estimar e otimizar parâmetros antes mesmo de executar a edificação, produto, automóvel, ou qualquer objeto de estudo, sendo de grande valia do ponto de vista financeiro (Sakiyama *et al.*, 2020).

Quando comparada com as demais abordagens, possui como grande vantagem a sua velocidade, flexibilidade e baixo custo (Hoof *et al.*, 2017). É comum que estudos que fazem uso de CFD busquem a otimização de ambientes e configurações em conjunto com abordagens experimentais (Zhang *et al.*, 2019; Kumar *et al.*, 2021), de modo a alcançar modelos calibrados ou até validados, podendo servir como fonte de futuros estudos na área (Saha *et al.*, 2020). Jiao *et al.* (2019) destacam como principais contribuições das simulações CFD em estudos de ventilação a capacidade de estimar a pressão do ar, velocidade, temperatura e calcular a concentração de gases e contaminantes do ambiente.

O princípio de funcionamento fundamenta-se na resolução de equações de Navier-Stokes, continuidade, conservação do movimento (segunda lei de Newton) e conservação de energia que relacionam o fluído analisado em conjunto com o objeto de estudo e as condições de contorno inseridas. Condições de contorno são os valores conhecidos de determinada variável em algum ponto, sendo essenciais para a resolução das equações através de auxílio computacional. Um exemplo usual de condição de contorno são os valores conhecidos da temperatura e velocidade do vento nas aberturas (Hassan *et al.*, 2020; Sakiyama *et al.*, 2020).

Dentre os *softwares* CFD disponíveis no mercado, destacam-se o CFX e Fluent da empresa Ansys, Phoenix e o de código aberto OpenFOAM (Jasak, 2009; Sakiyama *et al.*, 2020).

2.6.2.1 Abordagens CFD

Existem diversas abordagens de simulações CFD na literatura, porém três merecem destaques, a Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS), a Large Eddy Simulation (LES) e a Detached Eddy Simulation (DES), discutidas a seguir.

A abordagem RANS é a mais antiga entre as três e objetiva decompor uma quantidade instantânea de escoamento de fluído em quantidades média e flutuantes

em intervalos de tempo as quais são submetidas às equações de Navier-Stokes. (Ferziger e Peric, 2002). Dentro da abordagem RANS, ainda existem duas subdivisões possíveis de serem adotadas.

A primeira subdivisão dentro da abordagem RANS, consiste em um aprimoramento dela com o uso do modelo de estresse de Reynolds, (do inglês, Reynolds Stress Model, RSM). Nessa abordagem mais moderna é realizada a introdução de diversas equações de transporte adicionais, garantindo uma maior precisão nos resultados em razão de elevado custo computacional (Guo e Ding, 2008). Durante a pesquisa dessa revisão, não foi encontrado nenhum estudo de ventilação natural que optou por essa abordagem.

A segunda subdivisão parte das hipóteses de Boussinesq. Nessa linha de raciocínio são assumidas algumas simplificações nas propriedades do fluido de modo a facilitar o cálculo da viscosidade em regime turbulento. É importante destacar que essa viscosidade é causada pelo momento, movimento e transporte do fluido em regime turbulento no ambiente e é uma das variáveis mais desafiadoras de estimar (Ferziger e Peric, 2002). Realizada a simplificação, é necessário a aplicação de algum modelo de turbulência para enfim resolver as equações de transportes necessárias.

Dentre os modelos existentes, os mais comuns são o modelo de zero equação (modelo mais simplificado) e o de duas equações representado por modelos $k-\epsilon$ e $k-\omega$. Nota-se que as letras $k-\epsilon$ e $k-\omega$ representam as duas variáveis a serem resolvidas pelas equações de transporte aplicadas nesse modelo (Ferziger e Peric, 2002; Marshall *et al.*, 2004). Os modelos de turbulência advindos dessa abordagem são discutidos em detalhes no tópico seguinte 2.6.2.2.

Além do método RANS, a técnica de Large Eddy Simulation (LES) possui bastante aplicação em estudos da área de edificações (Wilcox, 2006; Sakiyama *et al.*, 2020). Seu grande diferencial é a ideia de remover pequenas escalas de fluxo do sistema, que julgar desprezível, através de uma operação de filtragem e adicionar seus efeitos por meio de modelos de submalha já conhecidos. Com isso, as escalas maiores e de maior importância da rede de fluxo são priorizadas na resolução de equações, ao passo que o custo computacional das escalas menores é reduzido (Sakiyama *et al.*, 2020).

Apesar de possuir uma ideia de otimizar a simulação, o método LES possui um maior custo computacional que abordagens RANS, pelo fato de a filtragem ocasionar um custo computacional significativo no processo. Contudo, a abordagem

LES é conhecida pela tendência a gerar resultados mais precisos com a realidade que a sua contraparte RANS (Sakiyama *et al.*, 2020; Biroun e Mazzei, 2024).

Por fim, a técnica Detached Eddy Simulation (DES) é uma das técnicas mais avançadas e sofisticadas possuindo como premissa a junção da abordagem RANS e LES. A metodologia mescla o uso da técnica RANS em locais com escalas menores e, principalmente, em locais próximos de outros objetos com limites sólidos em contato com o fluido, com o uso da metodologia LES nos demais locais. O seu uso computacional é um meio termo entre a abordagem RANS e a puramente LES e possui uma tendência de crescimento à medida que os *softwares* CFD se tornam mais sofisticados (Wilcox, 2006; Sakiyama *et al.*, 2020).

Para Kumar *et al.* (2021), no caso específico de análise de ventilação, modelos CFD baseados na metodologia RANS são os mais promissores, com resultados de precisão satisfatória já comprovados em recentes estudos, apesar de ser ultrapassado por metodologias LES e DES. Contudo, o estudo enfatiza que a condução de ensaios experimentais em conjunto com simulações é fundamental para a validação dos resultados, sendo mais relevante a associação com modelos RANS do que o emprego de metodologias de maior custo computacional desprovidas de validação experimental.

Um trabalho que ilustra a maior precisão da abordagem LES, é o de Bu *et al.* (2019). No estudo, os autores analisaram a ventilação natural de um ambiente residencial exposto à ventilação unilateral. Foram analisados os indicadores de *air flow rate* (AFR) relacionado à taxa de ventilação que ultrapassa as aberturas de entrada e o indicador *purging flow rate* (PFR), relacionado à taxa de ventilação tradicional, sendo a taxa de renovação de ar ambiente. Quando comparado com os resultados obtidos pelo ensaio experimental de túnel de vento, os valores resultados da abordagem LES alcançaram um nível de precisão superior a 30% para o indicador AFR e de 10% em relação ao PFR que a abordagem RANS.

2.6.2.2 Modelos de Turbulência

Dentre os modelos de turbulência utilizados na metodologia RANS, os modelos de duas variáveis merecem destaque, mais especificamente os modelos $k-\epsilon$ e $k-\omega$. A nomenclatura de ambos os modelos se refere as variáveis a serem resolvidas adicionalmente as equações de conservação e continuidade tradicionais da metodologia RANS, por meio de equações diferenciais parciais (EDPs).

A variável k presente em ambos os modelos representa a energia cinética turbulenta, enquanto a variável ε representa a taxa de dissipação de energia cinética e ω é relacionada a taxa específica de dissipação de energia cinética unitária (Menter, 1998). Na prática, ambas variáveis ε e ω são relacionadas à dissipação da energia cinética k . Comparativamente, o modelo $k-\omega$ tende a gerar resultados mais precisos em condições de gradientes de pressões adversas e em regiões próximas a objetos, enquanto $k-\varepsilon$ é recomendado para situações de gradiente de pressões controlados (Wilcox, 2006).

O modelo mais comum a ser utilizado em simulações é o $k-\varepsilon$, que conta com diversas variações consistindo em pequenas adaptações para um melhor funcionamento em determinada situação (Ferziger e Peric, 2002). As variações mais comuns do modelo $k-\varepsilon$ são: standard (Std $k-\varepsilon$), renormalization group (RNG $k-\varepsilon$) e realizable $k-\varepsilon$ model (Rel $k-\varepsilon$) e a variação the shear stress transform (SST $k-\omega$) (Wilcox, 2006; Kumar *et al.*, 2021).

A principal diferença do modelo Std $k-\varepsilon$ e o modelo SST $k-\omega$ é que o segundo trabalha com uma abordagem $k-\omega$ quando próximo de superfícies, buscando a melhor performance do modelo $k-\omega$ nesses locais (Wilcox, 1988). Já o modelo RNG $k-\varepsilon$ tende a performar melhor para escoamento de fluídos rotativos (Yakhot *et al.*, 1992). Por fim, o modelo Rel $k-\varepsilon$ é a variação mais moderna e possui melhor desempenho em situações de alta turbulência, com elevada complexidade, em razão de maior custo computacional (Wilcox, 2006). Jayasree *et al.* (2021) apontam a definição do modelo de turbulência adequado nas simulações como algo desafiador. Os autores ressaltam que cada modelo é preferível para dada situação, sendo extremamente difícil definir um único modelo que consiga performar melhor para os mais diversos casos.

Kumar *et al.* (2021) conduziram a validação de uma simulação CFD com base em um ensaio experimental em pequena escala de um apartamento residencial de Mumbai, Índia. Para a determinação dos coeficientes de pressão C_p , o estudo não concluiu diferenças significativas advindas da diferença dos modelos de turbulência, porém o mesmo não ocorreu para as velocidades do vento. Entre os quatro modelos de turbulência utilizados, os modelos de SST $k-\omega$ e o RNG $k-\varepsilon$ superestimaram os valores de velocidade, enquanto os resultados dos modelos Rel $k-\varepsilon$ e Std $k-\varepsilon$ apresentaram resultados mais condizentes com os ensaios experimentais, julgando-os como modelos mais adequados para o objeto de estudo.

Por outro lado, Kusotova *et al.* (2019) estudaram a simulação CFD de um ambiente residencial com persianas nas janelas por meio dos modelos de turbulência RNG $k-\varepsilon$ e SST $k-\omega$. Ao validar as simulações com os resultados do ensaio de túnel de vento, obtiveram dados satisfatórios com ambos os modelos de turbulência. Prakash (2023) por sua vez atingiu resultados com menos de 5% de variação por meio de simulação CFD com o modelo de turbulência SST $k-\omega$ quando comparado com os resultados do modelo experimental de túnel de vento. Para o autor, os resultados obtidos das simulações foram muito positivos e o suficientes para a validação de seu modelo.

2.6.2.3 Etapas da simulação

Jiao *et al.* (2019) ilustram as etapas cruciais de uma típica análise por simulação CFD na área de ventilação natural (Figura 1). Para os autores, as simulações partem de um ciclo que deve ser feito inúmeras vezes, sempre otimizando a geometria, malha, condições de contorno e abordagens até que atinja resultados satisfatórios. Uma das grandes contribuições esperadas de um modelo de simulação CFD é que os seus resultados atinjam um grau de precisão suficiente com a realidade para serem validados (Few, 2019; Hassan *et al.*, 2020). A seguir são dados mais detalhes de cada etapa da simulação.

Figura 1: Etapas de uma simulação CFD.



Fonte: Adaptado de Jiao *et al.* 2019.

2.6.2.3.1 Modelagem geométrica

A primeira etapa de qualquer simulação CFD consiste na modelagem geométrica do objeto de estudo. O termo *software* CFD, muitas vezes está associado apenas ao *software* relacionado à resolução das equações de fluidodinâmica, conhecido como *solver*. Alguns *softwares* CFD mais modernos possuem a capacidade de realizar todas as etapas por si só, porém, é comum o uso de diferentes *softwares* auxiliares compatíveis com o *solver* para a realização das tarefas de modelagem geométrica e geração de malha de forma segregada. Alguns exemplos de programas utilizados para essas etapas são: *SpaceClaim*, *SolidWorks*, *DesignBuilder*, alguns *softwares* da AutoDesk, entre outros (Sakiyama *et al.*, 2020; Jiao *et al.*, 2019; Duarte Junior, 2023).

Um detalhe importante na etapa de modelagem geométrica é a necessidade de priorizar apenas os elementos com maior relevância para a simulação. A adição de muitos detalhes de pequena grandeza tende a gerar pouca influência no resultado, apenas contribuindo para a geração de malhas mais densas e consequentemente causando um elevado custo computacional excessivo. Por isso, é recomendado a simplificação da geometria, retirando pequenos objetos e detalhes desprezíveis para o resultado (Wilcox, 2006; Duarte Junior, 2023).

2.6.2.3.2 Definição de malha e domínio

Definida a geometria do objeto de estudo, o próximo passo é a extração do volume do fluido (também conhecido como domínio do fluido). A seguir, o domínio é dividido por pequenas parcelas de subdomínio, com tamanhos, formatos e estruturas variadas gerando o que é conhecido como malha (em inglês, *mesh*) (Almohammadi *et al.*, 2013). Essa divisão é necessária para a aplicação das condições de contorno em cada subdomínio, de modo a simular um desempenho condizente com o fenômeno na realidade. Na prática, pode ser vista como uma aplicação do método dos volumes finitos (MVF), aplicando a resolução das equações necessárias do método RANS em cada volume de controle (Wilcox, 2006).

Os formatos mais usuais de malhas são a poliédrica, hexaédrica, tetraédrica e prismática (Wilcox, 2006). O formato poliédrico é conhecido por possuir o melhor ajuste no domínio, sendo adotado preferencialmente pelos *softwares* mais modernos. As malhas tetraédricas exigem menos desempenho computacional apresentando um desempenho satisfatório no domínio, porém ajustes próximos a superfícies podem ser

falhos, sendo recomendado o seu uso em conjunto com elementos prismáticos nessas situações (Almohammadi *et al.*, 2013; Seeni *et al.*, 2020; Duarte Junior, 2023).

A densidade de uma malha está diretamente relacionada aos parâmetros de formato, número de nós, de elementos (ou células) e seu tamanho médio. O refinamento da malha impacta substancialmente no tempo de processamento requerido para a análise do *solver* subsequente. Contudo, uma malha com um maior número de elementos com menor tamanho médio, não necessariamente indica uma malha mais precisa. Para saber a qualidade da malha deve-se analisar alguns indicadores, além de executar o teste de independência de malha (Wilcox, 2006).

Dois indicadores iniciais de qualidade de malha merecem destaque, sendo eles o indicador de distorção (*skewness*) e o de qualidade ortogonal (*orthogonal quality*). O indicador de *skewness* é descrito como o quão adequado o formato adotado de um elemento está quando comparado com o formato de elemento ideal para dada situação. É calculado como a razão entre a área do elemento adotado com a área de um triângulo equilátero ideal e varia entre 0 e 1. Quanto menor o valor deste indicador, mais a malha se aproxima do ideal (Malmir, 2019; Seeni *et al.*, 2020).

Já o indicador *orthogonal quality* representa o quão próximo os ângulos entre elementos adjacentes da malha estão de um ângulo reto. Assim como o indicador *skewness*, o *orthogonal quality* varia no intervalo de 0 a 1, porém, para este indicador valores maiores representam um melhor refinamento de malha. Destaca-se que valores baixos deste indicador tendem a apresentar problemas de convergência para a simulação posterior (Malmir, 2019; Seeni *et al.*, 2020).

O teste de independência de malha é essencial para garantir a não interferência significativa das características da malha na simulação. Para isso, deve-se testar malhas com diferentes tamanhos de elementos, diminuindo seu tamanho a cada nova tentativa de modo que os resultados pós simulação convirjam até um critério de parada pré-definido (Wilcox, 2006). Detalhes sobre convergência de parâmetros são vistos no tópico seguinte 2.7.2.3.3.

É de entendimento comum que adotar elementos grandes tendem a gerar resultados imprecisos, pois dificilmente o comportamento de um único grande elemento será homogêneo. Ao mesmo tempo, entende-se que adotar elementos menores na malha tende a gerar resultados mais precisos com a realidade, porém após um certo ponto, os resultados apresentam uma propensão à convergência. Desse modo, diminuir o tamanho dos elementos não surtirá efeito significativo nos

resultados e assim a simulação estará independente da malha adotada, não havendo necessidade de maiores refinamentos da malha (Almohammadi *et al.*, 2013; Seenii *et al.*, 2020).

Outra métrica de malha tradicionalmente utilizada para avaliação de malha é o coeficiente adimensional y^+ . Diferente das outras métricas de malha discutidas anteriormente, que analisam estritamente o parâmetro geométrico da malha, o y^+ leva em consideração o fluxo do escoamento em adicional à geometria da malha. Conceitualmente, o parâmetro relaciona características de tensão cisalhante, densidade e viscosidade com a distância da superfície. Contudo, destaca-se que a métrica se mostra viável apenas em regiões de fluxo próximas a parede além de poder ser aplicada em escoamentos com número de Reynolds elevados (Wilcox, 1988; Versteeg e Malalasekera, 2007; Davidson, 2015; Ansys, 2023). As equações 8 e 9 a seguir ilustram o cálculo envolvido.

$$u_t = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (8)$$

$$y^+ = \frac{y \cdot u_t}{\nu} \quad (9)$$

Onde:

τ_w representa a tensão de cisalhamento da superfície em Pa, ρ ilustra a densidade do fluido em kg/m³, u_t a velocidade de atrito em m/s, y representa a distância da superfície até o centro do primeiro elemento da malha em metros, ν a viscosidade cinemática do fluido em m²/s e por fim, y^+ é o parâmetro adimensional que expressa a distância y da superfície em função da subcamada viscosa do fluido.

2.6.2.3.3 Simulação e pós-processamento

Definida a malha adotada, o próximo passo é a configuração do *solver* CFD para assim realizar a simulação. É durante esta etapa que é definido o modelo de turbulência adotado, as condições de contorno e definido os critérios de parada da convergência.

Duarte Junior (2023) define algumas variáveis recomendadas para uso como condições de contorno. Casos em que há conhecimento da velocidade, vazão

mássica e pressão total, tanto nos pontos de entrada (*inlet*) ou nos de saída (*outlet*), possuem a tendência de resultar em dados robustos e de alta precisão. Já os casos que as únicas condições de contorno são pressões totais e estáticas, não são recomendados devido a maior propensão de incertezas e devem ser evitados. Quanto maior número de condições de contorno utilizadas, melhor a precisão do modelo (Giles *et al.*, 1997; Zawawi *et al.*, 2018).

A convergência de uma simulação CFD está relacionada ao processo de convergência iterativa. Fletcher (2000) define convergência iterativa como sendo um processo de refinamento sucessivo com o intuito de alcançar a solução exata de um sistema de equações discretizado, sendo interrompido por um critério de parada pré-estabelecido.

Em simulações CFD, os critérios de parada (ou de convergência) são relacionados aos valores de resíduos (residuals do inglês). Neste contexto, os resíduos são definidos como a diferença entre os valores de determinada variável encontrado entre subdomínios de elementos vizinhos. Idealmente, os valores de dada variável não deveriam apresentar variações entre subdomínios vizinhos, contudo, simulações CFD tendem a resultar em aproximações numéricas devido à sua complexidade. Consequentemente, quanto menor o valor de um resíduo, mais a simulação se aproxima do evento real (Zawawi *et al.*, 2018; Liu, *et al.*, 2019).

Os principais resíduos utilizados como critério de parada são: os de momentos em cada eixo, de balanço de massa, de continuidade e os das variáveis k (energia cinética turbulenta) e ε , ω (relacionados à taxa de dissipação de energia cinética), (Ramponi e Blocken, 2012; Liu, *et al.*, 2019).

Kumar *et al.* (2021) assumiram obter a convergência dos modelos a partir de resíduos de ordem inferiores a 10^{-6} para os momentos nos eixos x, y e z e resíduos inferiores a 10^{-4} para k , ε , ω de continuidade.

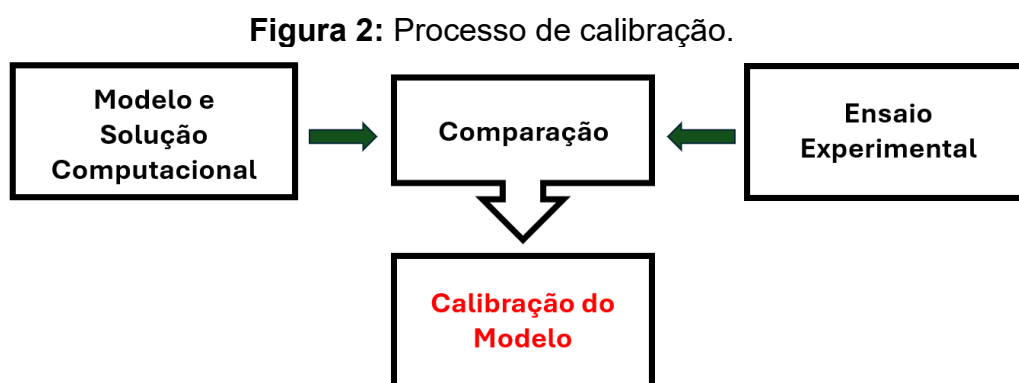
Por fim, por meio do pós-processamento é possível visualizar os resultados da simulação. Durante esta etapa são gerados gráficos, imagens, vetores e animações que ilustram o comportamento do fluido, além dos valores dos parâmetros de interesse. O aspecto visual desta etapa beneficia o entendimento do fenômeno, contribuindo para a detecção de possíveis irregularidades no lançamento da simulação, além de poder evidenciar visualmente as variáveis e linhas de fluxo de interesse (Berger e Cristie, 2015; Duarte Junior, 2023).

2.6.2.4 Verificação, calibração e validação do modelo

Oberkampf e Trucano (2002) descrevem a verificação como: o processo de determinar se o modelo implementado pelo desenvolvedor corresponde com precisão ao conceito de cálculo da estratégia de solução do problema de fluidodinâmica. O processo de verificação depende da identificação, quantificação e redução dos erros do modelo de cálculo desenvolvido. Com isso, o processo de verificação é um problema matemático e computacional, não necessitando de comparação experimental para ser executado.

Os autores ressaltam a diferenciação do processo de calibração como sendo: o ajuste sistemático de parâmetros e condições de contorno do modelo simulado, de modo que represente melhor a realidade com base em modelos experimentais (figura 2).

Nota-se que o processo de calibração não possui enfoque inicial em predição, sendo um processo de reduzida complexidade e precisão quando comparado ao processo de validação. Assim, considerando as limitações de infraestrutura para o desenvolvimento deste trabalho, optou-se por objetivar apenas o processo de calibração do modelo.



Fonte: Adaptado de Oberkampf e Trucano, 2002.

Na literatura, observa-se que a maioria dos estudos se concentra no processo de validação, geralmente conduzido sob condições altamente controladas e em ambientes laboratoriais com infraestrutura sofisticada (Oberkampf e Trucano, 2002; Blocken, 2014). Nesse contexto, optou-se por dar maior enfoque ao processo de validação na revisão de literatura, por se tratar da abordagem predominante nos estudos existentes.

Por outro lado, o processo de validação envolve tanto o olhar matemático quanto o físico. Oberkampf e Trucano (2002) definem a validação como sendo o processo de determinação do grau de precisão que um modelo CFD possui quando comparado com a perspectiva do fenômeno no mundo real, gerando capacidade preditiva do fenômeno. Para isso, primeiramente deve-se identificar e quantificar os possíveis erros e incertezas do modelo computacional para em seguida comparar preferencialmente com os resultados de modelos experimentais para assim atingir a validação. Nesse ponto os autores destacam que ensaios experimentais não são necessariamente considerados como mais precisos que as simulações CFD, apenas possuem maior confiabilidade com o mundo real em termos de processo de validação, podendo ainda serem passíveis de falhas.

Na literatura constam diversas estratégias para validar modelos computacionais, contudo, nenhum deles é unânime (Oberkampf e Trucano, 2002; Vilas Boas e Vatauvuk, 2018). Ao mesmo tempo, nenhuma estratégia possui padronização em sua aplicação, com isso, o processo de validação se torna muitas vezes a etapa mais nebulosa no processo de simulações CFD, podendo muitas vezes respingar na credibilidade do modelo adotado (Vilas Boas e Vatauvuk, 2018).

Vilas Boas e Vatauvuk (2018) estudaram as principais estratégias utilizadas para validação na literatura. Seu trabalho foi dividido em dois tipos de técnicas.

A primeira técnica é a validação por meio da estatística. Nessa técnica são utilizadas as ferramentas tradicionais de estatística como testes de hipóteses, intervalos de confiança, entre outros parâmetros. Oberkampf e Trucano (2002) destacam a dificuldade na identificação e quantificação de erros sistemáticos nessa abordagem, tendo um impacto significativo nos resultados, não sendo a técnica mais recomendada.

A segunda técnica é a validação por meio dos ensaios experimentais, sendo a técnica mais comum para validação na literatura. Sargent (2013) cita algumas técnicas experimentais adotadas na validação de modelos. As principais são: comparação direta com outros modelos e testes de validade do evento. Respectivamente, a primeira técnica é relacionada à comparação direta com modelos já validados e consolidados na literatura, enquanto a segunda sugere a comparação dos resultados do modelo computacional com um evento experimental.

Em relação ao tipo de ensaio experimental para validação em estudos de ventilação natural especificamente, os ensaios mais comuns são: os de túneis de

vento, gás traçador e velocimetria por imagem de partículas (particle image velocimetry – PIV) (Jayasree *et al.*, 2021, Zhang *et al.*, 2021, Park *et al.*, 2022).

Hassan, *et al.* (2020) estudaram a ventilação natural em um corredor urbano por meio de simulação CFD e um ensaio experimental de túnel de vento. Na grande maioria dos casos estudados, a diferença entre os resultados das duas abordagens no quesito ACH foi de menos que 10%, exceto por casos isolados que resultaram em até 15% de diferença. Para os autores, esta margem de erro foi adequada para considerar a validação do modelo.

Já o estudo de Prakash (2020) apontou diferenças na ordem de 5% entre o ensaio experimental e a simulação CFD, quando avaliado o parâmetro de ACH. Seu estudo objetivou a ventilação natural em residências com variações no telhado em conjunto com um ensaio experimental de túnel de vento. Esta pequena diferença de resultados possibilitaram a validação da simulação pelo autor.

Liu, *et al.* (2024) abordaram a ventilação natural unilateral com diferentes áreas de aberturas de janela em seu estudo. O ensaio experimental adotado foi o de gás traçador CO₂ em conjunto com simulações CFD. Destaca-se que os resultados alcançaram uma variação da concentração do gás CO₂ entre o medido e o simulado nas casas de 7,9%, 8,7% e 56,4% dependendo da localização do ponto aferido. Os locais com maiores diferenças na medição eram os próximos da abertura, sujeitos a elevada turbulência, e os locais considerados em zonas mortas de ventilação do ambiente. No mais, a curva de decaimento de ambas as análises apresentou comportamentos consistentes e isso foi suficiente para a validação do modelo por parte dos autores.

Bu *et al.* (2019) durante a análise de ventilação natural cruzada de protótipo de ambiente urbano constataram uma diferença da ordem de 10% a 20% na taxa de renovação de ar estimada (ACH) entre o ensaio experimental de gás traçador e a simulação CFD, ao fim do estudo as variações encontradas foram consideradas satisfatórias e suficientes para a validação do modelo por parte dos autores. Além disso, em regiões próximas as aberturas os autores constataram uma diferença de até 40% na concentração PPM resultante do modelo numérico e do ensaio experimental, evidenciando elevada sensibilidade destas zonas em ensaios de gás traçador na calibração de modelos numéricos.

Estudos conduzidos por Teppner *et al.* (2014) investigaram o comportamento da taxa de renovação de ar (ACH) em ambientes residenciais sob ventilação natural,

considerando diferentes condições de escoamento induzido pelo vento, incluindo variações na velocidade, direção do vento, diferentes configurações de janelas (totalmente abertas ou parcialmente) e temperatura. O estudo foi desenvolvido a partir de modelos em escala reduzida e em escala real, submetidos a ensaios controlados em túneis de vento e posteriormente com gás traçador, cujos resultados obtidos foram posteriormente comparados com simulações numéricas por CFD. As direções do vento analisadas incluíram 0°, 33°, 90° e 180°, possibilitando avaliar a influência do ângulo de incidência no desempenho de ventilação.

Como principais resultados, os autores consideraram uma boa concordância entre os valores de ACH obtidos experimentalmente pelo ensaio de túnel de vento e numericamente por simulações CFD, com diferenças de resultados de ACHs variando entre -23,8% a +33,9%, dependendo das condições de escoamento e da configuração de janela analisada. Para a pressão na fachada, foram observados desvios de até 25% entre medições e simulações. Adicionalmente, os autores concluíram que a ventilação induzida pelo vento exerce influência significativamente superior à ventilação por efeitos térmicos, evidenciando que a velocidade e a direção do vento são os principais fatores determinantes do ACH em ambientes ventilados naturalmente.

Jiang *et al.* (2004) investigaram diferentes cenários de ventilação natural unilateral e cruzada, utilizando ensaios experimentais em túnel de vento com modelos reduzidos. O estudo teve como foco principal a validação de simulações CFD aplicadas à ventilação natural com foco no parâmetro de ACH, bem como a comparação entre diferentes abordagens numéricas, RANS e LES. Como principais conclusões, destacou-se a superior concordância apresentada pelas simulações LES em relação aos dados experimentais, com discrepâncias inferiores a 5% em grande parte das regiões analisadas e estimativas de ACH mais próximas dos valores medidos. Em contrapartida, as simulações RANS apresentaram tendência à superestimação das taxas de renovação de ar e menor capacidade de representar adequadamente zonas de recirculação e efeitos transientes do escoamento resultando em diferenças maiores que 10%.

Hwang e Gorré (2023) analisaram a ventilação natural cruzada de uma residência de único ambiente inserida em ambiente urbano denso. Os autores realizaram monitoramento em condições reais de uso durante quinze dias contínuos, utilizando ensaio experimental com gás traçador para estimativa das taxas de

renovação de ar. A metodologia contemplou diferentes configurações de aberturas, assim como a comparação entre períodos diurnos e noturnos. A abordagem utilizada foi a LES, com malha computacional robusta de aproximadamente 21 milhões de elementos. Como principais resultados, destacaram-se diferenças entre os valores de ACH simulados e experimentais variando de aproximadamente -12,8% até +37%, evidenciando a complexidade inerente à modelagem da ventilação natural em ambientes urbanos reais, mesmo com uso de técnicas avançadas de simulação e extenso monitoramento.

A tabela 2 a seguir ilustra um resumo dos principais resultados encontrados na literatura.

Tabela 2: Resumo dos resultados obtidos na literatura consultada.

Autores	Método experimental	Parâmetro analisado	Variação Máxima no modelo (%)
Hassan, <i>et al.</i> (2020)	Túnel de vento	ACH	± 15
Prakash (2020)	Túnel de vento	ACH	± 5
Liu, <i>et al.</i> (2024)	Gás traçador	Conc Gás PPM	$\pm 56,4$
Bu, <i>et al.</i> (2019)	Gás traçador	Conc Gás PPM	± 40
Bu, <i>et al.</i> (2019)	Gás traçador	ACH	± 10 a $+20$
Teppner <i>et al.</i> (2014)	Túnel de vento	ACH	-23,8 a $+33,9$
Jiang <i>et al.</i> (2004)	Túnel de vento	ACH	± 5 (LES) e ± 15 (RANS)
Hwang e Gorlé (2023)	Gás traçador	ACH	-12,8 a $+37$

Fonte: o próprio autor.

Observa-se que na grande maioria dos estudos apresentados o foco era o processo de validação do modelo CFD, com ensaios experimentais conduzidos em condições altamente controladas em laboratório. Em contraste, o presente trabalho tem como objetivo a calibração do modelo CFD a partir de resultados de taxa de renovação de ar (ACH) obtidos por meio de ensaios com gás traçador realizados em condições reais de campo, possuindo por característica uma maior variabilidade e menor controle de parâmetros. Essa abordagem busca uma maior representatividade das condições de ventilação natural em condições de campo, sendo detalhado no tópico de métodos a seguir.

3. MÉTODO

Para uma melhor didática, o método é dividido em três tópicos: o primeiro referente ao detalhamento do objeto de estudo, o segundo relacionado ao ensaio experimental de gás traçador de CO₂ e por fim, a metodologia utilizada na simulação CFD, versão estudantil 2025 de *SpaceClaim*, *Meshing* e *Fluent*, do pacote *Ansys*.

3.1 OBJETO DE ESTUDO

A residência analisada consiste em um modelo de habitação de interesse social (HIS) presente no programa de habitação federal do Brasil de nome “Minha Casa, Minha Vida”. O sistema construtivo utilizado foi o wood-frame, montado em apenas um dia pela empresa Tecverde de Araucária-PR, com exceção da fundação (Agência UEL, 2013).

Atualmente, a residência desempenha o papel de Laboratório de Eficiência Energética e Sustentabilidade das Edificações, também conhecido como E3sLab, no campus da Universidade Estadual de Londrina. Esse laboratório é utilizado pelos estudantes dos cursos de graduação e pós-graduação de Arquitetura e Urbanismo e Engenharia Civil.

A residência possui uma área de 40,75m² e um pé-direito de 2,55m. Os cômodos são divididos em uma sala integrada com cozinha e área social de 20,28m², um pequeno banheiro de 3,55m² e dois dormitórios, sendo um maior de 9,22m² e um menor de 7,70m².

A seguir são apresentadas as figuras 3, 4, 5 e 6 que ilustram desde o processo de montagem até a condição atual do objeto de estudo e detalhes do projeto.

Figura 3: Montagem da habitação de sistema wood-frame.



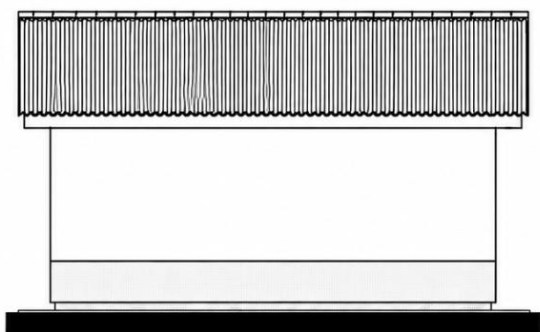
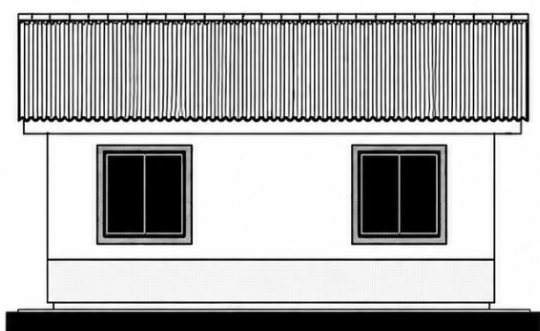
Fonte: Agência UEL de notícias, 2013.

Figura 4: Laboratório de Eficiência Energética e Sustentabilidade nas Edificações (E3sLab).

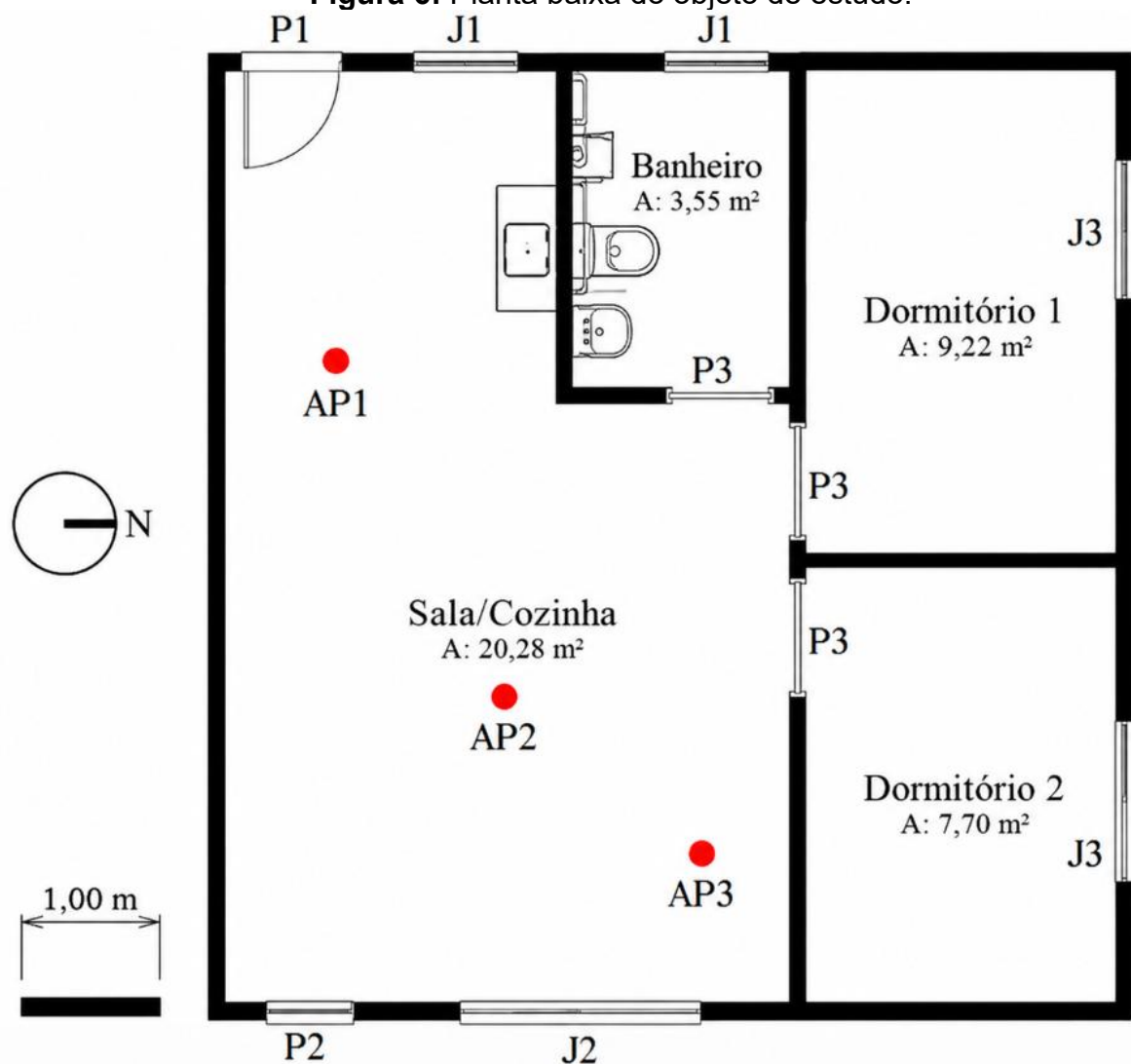


Fonte: PPGE Civ, DCCI – UEL.

Figura 5: Elevações com as respectivas orientações em relação aos pontos cardeais de cada face.



Fonte: Adaptado de notas de aula, disciplina Desempenho térmico em edificações, professora Thalita Gorbán Ferreira Giglio.

Figura 6: Planta baixa do objeto de estudo.

Fonte: Adaptado de Nunes, *et al.* (2020).

Em relação as esquadrias, as janelas do banheiro e da área social, representadas por J1 na figura 6, são do tipo *maxim-air* com dimensões aproximadas de 0,50m por 0,53m, sendo posicionadas a partir de uma altura de 1,50m e com um ângulo máximo de abertura de 56°. Já a janela da entrada principal, representada por J2 na figura 6 é do tipo de correr e apresenta dimensões de 1,60m por 1,20m, possuindo uma área livre de abertura de 0,78m². Por fim, as janelas J3 dos dormitórios são de correr e possuem dimensões de 1,20m por 1,20m. Enquanto as portas P1, P2 e P3 são todas delimitadas por 0,80m por 2,10m.

A tabela 3 a seguir resume os dados da esquadria e ambiente analisados, ao passo que as figuras 7,8, 9 e 10 ilustram as janelas J1, J2 e as fachadas principais e a da cozinha, respectivamente.

Ressalta-se que o objeto principal de estudo, tanto do ensaio experimental de CO₂, quando o deste trabalho é a ventilação natural presente apenas do cômodo Sala/Cozinha, o qual possui aberturas representadas pela P1, P2, J1 e J2. A limitação desta análise é devido à complexidade em avaliar as taxas de ventilação natural de forma simultânea em todos os cômodos, tanto do ponto de vista do ensaio experimental de gás traçador, quanto de simulação CFD.

Tabela 3: Resumo das esquadrias e ambientes analisados nos estudos.

Esquadria	Tipo de Elemento	Dimensões (m)	Área (m ²)	Ambiente	Tipologia	Análise de ventilação	Condição de contorno
J1	Janela	0,50 x 0,53	0,27	Sala/Cozinha	Maxim-air	Sim	Outlet
J2	Janela	1,20 x 1,60	1,92	Sala/Cozinha	Correr	Sim	Inlet
J3	Janela	1,20 x 1,20	1,44	Dormitórios	Correr	Não	-
P1	Porta	0,80 x 2,10	1,68	Sala/Cozinha	-	Sim	Outlet
P2 e P3	Porta	0,80 x 2,10	1,68	Sala/Cozinha	-	Não	-

Fonte: o próprio autor.

Figura 7: Janela J1 tipo *maxim-ar* – fachada da cozinha.



Fonte: o próprio autor.

Figura 8: Janela J2 de correr – fachada da entrada principal.



Fonte: o próprio autor.

Figura 9: Fachada da entrada principal.



Fonte: o próprio autor.

Figura 10: Fachada da cozinha.



Fonte: o próprio autor.

3.1.1 Análise Climática

O objeto de estudo é localizado na cidade de Londrina-PR, presente na zona bioclimática 3B, de acordo com a NBR 15220-3 de 2024, possuindo como características predominantes estações bem definidas com clima quente e úmido no verão e invernos frios e secos. A mesma norma, em sua versão anterior de 2005, recomenda como principais estratégias bioclimáticas recomendadas nesta zona: a ventilação natural e o sombreamento.

A estação meteorológica mais próxima está localizada a cerca de 5 quilômetros, sendo monitorada pelo Instituto de Desenvolvimento Rural do Paraná (IDR-PR) a qual fornece dados pertinentes na realização deste trabalho, como a temperatura média máxima e mínima do ar, a umidade relativa, a direção predominante do vento e a velocidade do vento. A figura 11, a seguir, ilustra os dados referentes ao período de 1976 a 2019, enquanto a figura 12 ilustra a direção predominante do vento.

Figura 11: Dados da estação meteorológica de Londrina.

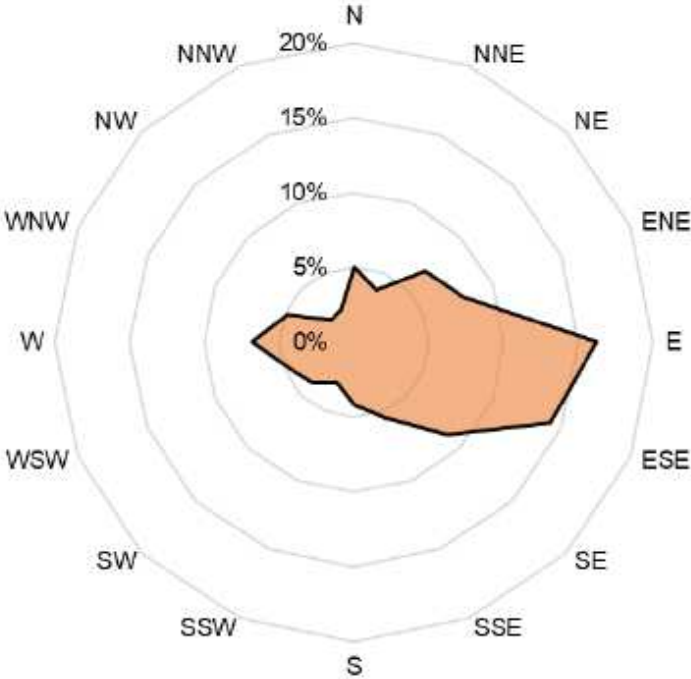
ESTACAO: LONDRINA / CODIGO: 02351003 / LAT: 23.22 S / LONG: 51.10 W / ALT: 585 M

PER. 1976/2019

MES	TEMPERATURA DO AR (.c)						U.REL		VENTO		PRECIPITACAO				EVAPOR.		INSOL.
	média máxima	média mínima	máxima abs	ano	min abs	ano	média comp	média %	dir pr.	m/s	total	máxima 24h	ano	dias chuva	total mm	total horas	
JAN	29,5	19,7	36,4	93/19	11,0	1980	23,9	77	E	2,4	223,9	232,8	2016	16	104,5	202,7	
FEV	29,8	19,7	38,0	2014	12,2	1987	24,0	76	E	2,2	187,1	93,6	1993	14	93,9	191,5	
MAR	29,6	18,9	37,0	2005	7,0	1987	23,5	73	E	2,2	137,6	124,6	1992	12	114,2	220,1	
ABR	28,0	16,8	34,9	2016	3,8	1999	21,7	71	E	2,2	108,0	151,2	1984	8	109,5	228,3	
MAI	24,4	13,7	32,5	2019	0,0	1979	18,4	74	E	2,1	116,6	87,6	2016	8	91,0	212,7	
JUN	23,1	12,1	30,3	2002	-1,0	1994	17,0	75	E	2,0	94,5	200,5	2012	8	78,7	203,2	
JUL	23,6	11,7	31,2	1977	-1,3	2000	17,0	69	E	2,2	71,3	91,8	2015	6	104,4	229,8	
AGO	25,9	12,9	34,8	1994	0,6	1984	18,8	62	E	2,4	54,1	91,4	2018	6	144,4	240,7	
SET	26,9	14,7	37,5	1988	1,9	2002	20,3	63	E	2,7	115,1	82,8	1998	9	151,6	205,9	
OUT	28,8	16,9	38,5	2014	8,0	1981	22,3	66	E	2,8	152,2	106,4	1994	11	156,7	220,6	
NOV	29,4	18,0	39,2	1985	9,8	1976	23,2	67	E	2,8	165,6	142,7	1992	11	149,1	226,5	
DEZ	29,5	19,2	36,4	1985	12,0	2001	23,8	72	E	2,5	205,8	117,1	1989	14	124,5	213,5	
ANO	27,4	16,2					21,2	70,5			1632			122	1423	2596	
EXT			39,2	1985	-1,3	2000						232,8	2016				

Fonte: IDR-PR, 2022, adaptado de Decker, et al. (2023).

Figura 12: Rosa dos ventos das direções do vento na região.



Fonte: IDR-PR, 2022, adaptado de Decker, et al. (2023).

A partir das figuras 11 e 12 é possível notar que o mês de fevereiro se caracterizou como o mês com maior temperatura média do período com o valor de 29,8°C e o mês de julho com a menor temperatura mínima média, com o valor de 11,7°C. Ao analisar a média geral da temperatura de todos os anos do período, observa-se um valor de 21,2°C.

Por último, é importante destacar os valores de velocidade do vento, que

variaram de 2,8m/s a até 2,0m/s na altura da estação meteorológica e a direção do vento predominante foi medida como a direção leste de forma unânime em todos os meses do ano.

3.2 ENSAIO DO GÁS TRAÇADOR CO₂

O método experimental usado como embasamento das simulações deste trabalho foi o ensaio de gás traçador CO₂, publicado por Decker, *et al.* (2023) intitulado “Medição da taxa de ventilação em uma HIS utilizando o método do gás traçador”, publicado em 2023.

A metodologia deste artigo consistiu na análise de três cenários de ventilação do ambiente, do cômodo principal Sala/cozinha apenas, sendo o cenário de taxa de infiltração (INF) o de ventilação cruzada (VC) e o de ventilação unilateral (VU). Em todos os cenários a porta principal P2 (porta na fachada leste) foi fechada, assim como as janelas dos dormitórios J3, a janela J1 do banheiro e as portas internas P3. Com intuito de garantir a estanqueidade do sistema o autor selou todas as portas com auxílio de fita adesiva, para evitar infiltrações. Nota-se que o ensaio contemplou apenas o cômodo principal da residência, composto pela sala e cozinha, não abordando os demais ambientes.

Foram integrados aos materiais do ensaio três detectores de CO₂ com termohigrômetro, modelo NDC02 da marca Next instrumentos com sistema de calibração automática e precisão de ± 50 ppm e $\pm 5\%$ na leitura.

A referência da execução do ensaio pautou-se na metodologia descrita nas normas ISO 12569 (2019) e ASTM E741 (2017) e foram utilizados os métodos de ensaio de multipontos e dois pontos, com seus resultados convergindo de forma satisfatória de acordo com os autores.

Para cada cenário foram realizados três ensaios, com exceção do cenário de ventilação cruzada que foi replicado quatro vezes. Durante o cenário de infiltração todas as esquadrias se encontravam fechadas, enquanto no de ventilação unilateral apenas a esquadria J2 da fachada leste estava aberta e no caso da ventilação cruzada, além da J2, ainda foram abertas as esquadrias P1 e J1 da fachada oeste.

Os resultados referentes ao número de renovações de ar (N) variaram de 0,20h⁻¹ a 0,56h⁻¹ nos ensaios de infiltração, 1,8h⁻¹ a 4,5h⁻¹ nos ensaios de ventilação unilateral e de 6,2h⁻¹ a 24,2h⁻¹ para os casos de ventilação cruzada e são ilustrados pela figura 13 a seguir. A média dessas leituras foram resumidas na tabela 4. Maiores

detalhes sobre o ensaio podem ser consultados no artigo por meio das referências no final do trabalho.

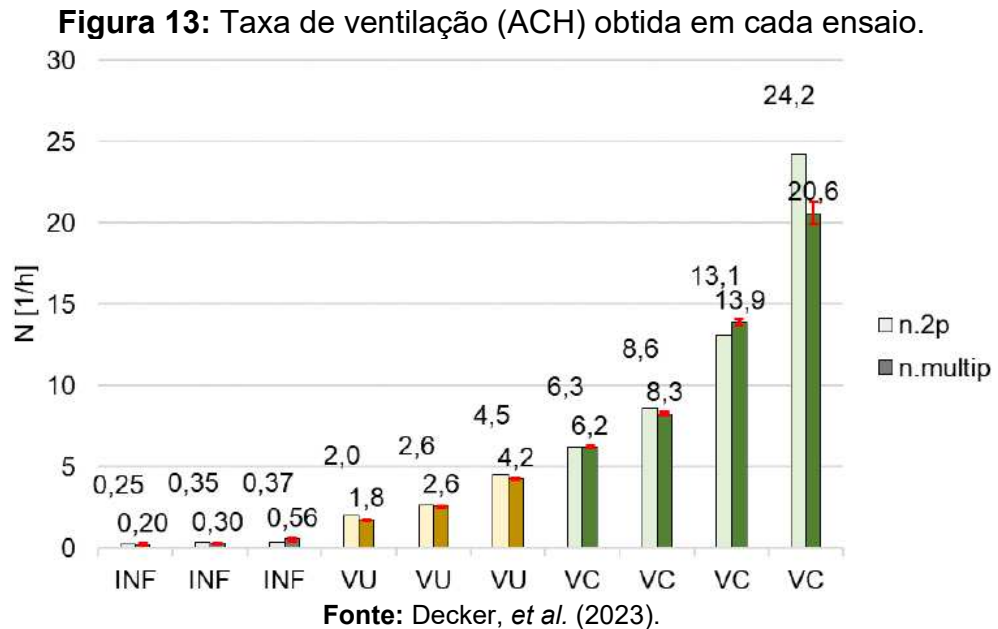


Tabela 4: Taxa de ventilação média por configuração de abertura.

Configuração de abertura	N (2p) [1/h]
INF	0,33
VC	13,03
VU	3,06

Fonte: adaptado de Decker, *et al.* (2023).

3.3 SIMULAÇÃO CFD

Para fins didáticos, são abordadas duas etapas de simulação. Detalhada as duas etapas, na sequência são explicadas as simplificações e medidas adotadas em cada etapa da simulação do objeto de estudo.

Em ambas as etapas de simulação foram feitos testes de independência de malha, com dois tamanhos de elementos de malha adicionais e foram analisados os as métricas de malha de *skewness*, *orthogonal quality* e y^+ , para casos específicos. Destaca-se novamente que a versão utilizada nas simulações foi a versão estudantil do pacote Ansys, softwares *SpaceClaim*, *Meshing* e *Fluent* versão 2025 R1 e as limitações desta versão impactaram diretamente na escolha dos tamanhos dos elementos da malha (limitação de um milhão de elementos). Neste contexto, os valores de tamanhos de malhas adotados na primeira etapa de simulações com

geometria simplificada (sem presença de gradeamento) foram de 0,06m, 0,08m e 0,10m, ao passo que os valores adotados na segunda etapa de simulações (presença de gradeamento) foram de 0,6m, 0,7m e 0,8m. Este assunto é abordado com maior profundidade no tópico 3.3.5.2 referente à modelagem da malha.

3.3.1 Primeira Etapa de Simulações

A primeira etapa de simulações consistiu no uso de geometria simplificada, sem modelagem do gradeamento, e em testes com determinadas variáveis analisadas neste estudo (vide tópico 3.3.3) com o intuito de calibrar o modelo CFD com o ensaio experimental de gás traçador. Inclui-se nesta primeira etapa os casos de simulações 1-12, apresentados no apêndice A.

Todos os casos simulados foram submetidos a duas simulações complementares, variando o tamanho de malha de modo a concluir o teste de independência de malha. Estas simulações adicionais são identificadas pelos subtópicos “caso X.1” e “caso X.2”, correspondendo ao caso original.

As variáveis analisadas são a velocidade do vento e ângulo de incidência do vento, considerando quatro grandezas de velocidade do vento e três para ângulo de incidência do vento e com abordagem padrão RANS-SST $k-\omega$. Maiores detalhes sobre cada variável são abordados no tópico 3.3.3 a seguir. Com base nos resultados obtidos na primeira etapa, foram selecionados quatro casos para a realização de novas análises, envolvendo simulações adicionais com abordagem LES (casos 13–16) e o desenvolvimento das simulações da segunda etapa do estudo. Os casos selecionados desta primeira etapa são os que resultaram em maiores taxas de ventilação, menor taxa e dois casos com taxas intermediárias.

Com isso, constam nesta primeira etapa: doze casos provenientes das simulações com as duas variáveis estudadas (ângulo de incidência e velocidade do vento), somado a quatro casos oriundos da abordagem LES nos casos selecionados, totalizando dezesseis simulações.

Destaca-se que, nesta primeira etapa, priorizou-se a realização de simulações com a abordagem padrão RANS-SST $k-\omega$ e com modelagem geométrica simplificada, com o objetivo de reduzir custo computacional. Esta estratégia possibilitou selecionar um número enxuto de casos a serem submetidos na segunda etapa de simulações, que conta com uma geometria mais detalhada (presença de gradeamento) e casos com uso de abordagem mais exigente (LES), exigindo um maior custo computacional.

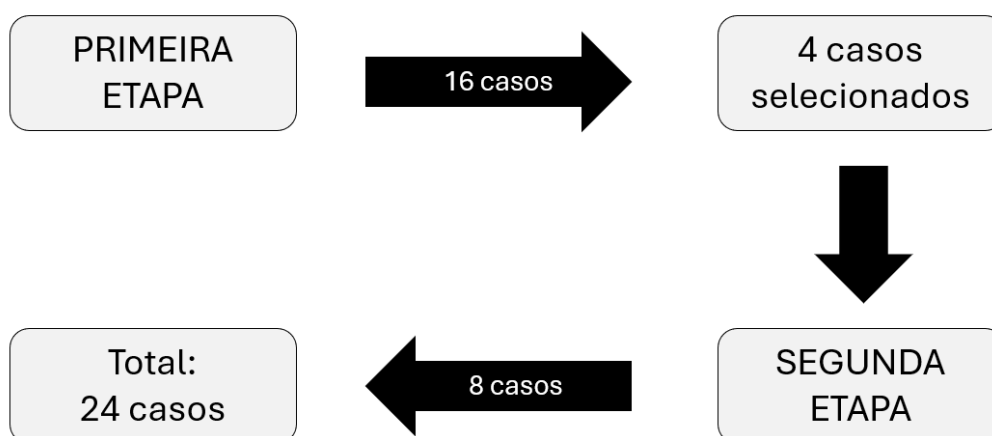
3.3.2 Segunda Etapa de Simulações

A segunda etapa de simulações consistiu na modelagem das grades das janelas e uso de abordagem LES comparativamente com a abordagem padrão RANS SST k- ω , de modo a verificar os impactos no escoamento interno e inclui os casos 17-24, do apêndice B. Com a nova geometria, foi necessário refazer o teste de independência de malha. Objetivando minimizar o número de simulações e custo computacional envolvido, nesta etapa calibrou-se apenas três casos de elementos de malha, para cada um dos quatro casos selecionados na primeira etapa, pelo modelo padrão RANS SST k- ω . Realizada o teste de independência de malha, selecionou-se a malha considerada mais adequada e simulou com a abordagem LES cada um dos quatro casos, sendo os resultados representados pelos casos 21-24.

Com isso, constam nesta segunda etapa: quatro casos provenientes da calibração dos quatro casos selecionados da primeira etapa com um novo teste de independência de malha somado a quatro casos adicionais em abordagem LES, totalizando oito novos casos. Ao se somar os casos da primeira etapa, obtém-se um número total de vinte e quatro casos.

Para uma melhor visualização, a figura 14 a seguir ilustra um fluxograma do processo de simulação.

Figura 14: Fluxograma dos casos analisados.



Fonte: o próprio autor.

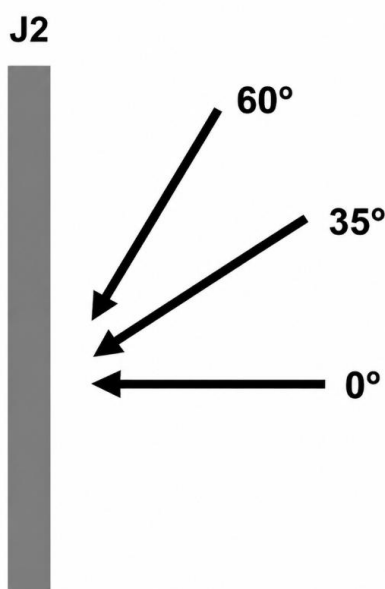
Adicionalmente, nesta segunda etapa realizou-se a análise quantitativa do fluxo de escoamento interno do ambiente, com comparações dos resultados obtidos pela abordagem RANS e pela abordagem LES. Nota-se que esta análise possui caráter complementar, haja vista que o ensaio experimental de gás traçador CO₂ do artigo de Decker, *et al.* (2023) não abrangeu este tipo de análise.

3.3.3 Variáveis Analisadas

Dentre as variáveis analisadas constam: três grandezas de direção do vento e quatro grandezas de velocidade do vento.

A direção do vento impacta diretamente no fluxo de ar que adentra o ambiente e consequentemente na taxa de ventilação (Teppner, *et al.*, 2014). O fato de o ambiente analisado não ser simétrico, tanto em configuração interna, quanto em configuração externa, torna o monitoramento desta variável essencial. Neste contexto definiu-se a análise dos ângulos de incidência nas direções 0° leste (vento dominante), 35° leste-nordeste e 60° leste-nordeste (condições intermediárias), ilustrada na figura 15. Como as condições locais referentes ao ângulo de incidência do vento não foram aferidas durante o ensaio experimental, optou-se por simular a condição ideal, com incidência perpendicular à fachada, assim como condições intermediárias. Essa estratégia buscou representar inclinações plausíveis para a situação real, considerando a influência do entorno, caracterizado pela presença de vegetação e da edificação do Centro de Tecnologia e Urbanismo da Universidade Estadual de Londrina.

Figura 15: Representação das direções do vento consideradas.



Fonte: o próprio autor.

Assim como a direção do vento, a velocidade do vento impacta diretamente na taxa de ventilação e deve ser analisada com mais detalhes, sendo uma variável principal indispensável. Decker, *et al.* (2023) mediram os valores de velocidade do vento por meio de um anemômetro de fio quente da marca Instrutherm, modelo TAFR-

190, com precisão $\pm 5\%$, durante o ensaio de gás traçador CO_2 a cada segundo na posição da esquadria de entrada J2. Destaca-se que o equipamento foi posicionado ao centro da esquadria, na fachada interna do ambiente. Em sua análise, os autores relataram uma grande variação nos dados, medindo valores máximos pontuais de curta duração (até dois segundos) de até 0,6m/s e mínimos pontuais de até 0,01m/s. Cerca de 95% das medições apresentaram valores na faixa de 0,03m/s a 0,30m/s. Dessa forma, devido à forte variação dos dados durante o período de duas horas de medição, houve grande dispersão nos valores de medição relatados. Esta variabilidade está associada ao fato de o estudo ter sido realizado em condições reais em campo, caracterizando um baixo controle das condições de ventilação natural, diferentemente dos ensaios conduzidos em ambientes laboratoriais controlados.

Adicionalmente, destaca-se que Decker *et al.* (2023) realizaram os ensaios no mês de maio. Ao consultar os autores para conhecimento do dia e horas que foram realizados os ensaios de ventilação cruzada, a base de dados do IDR-PR, indicou uma velocidade média do vento de 1,7 m/s, 2,1 m/s e 3,2 m/s nos horários específicos das medições.

É comum na literatura a estimativa da velocidade do vento utilizada nas simulações por meio de modelos semiempíricos, que buscam relacionar parâmetros de características do terreno, condições do entorno e altura da abertura de ventilação para a estimativa de uma velocidade do vento no local de interesse (Lamberts, 2013; Blocken, *et al.*, 2007; Sakiyama, *et al.*, 2020). A seguir são discutidos dois modelos de estimativa de velocidade: equação simplificada utilizada no trabalho de Lamberts, 2013 e o método da Camada Limite Atmosférica (CLA).

Ao utilizar a equação simplificada (8):

$$V_z = V_{10} * K * Z^A \quad (8)$$

Onde:

V_z é a velocidade do vento na altura de interesse, V_{10} é a velocidade do vento em uma altura de 10 metros, sendo esta altura padronizada das estações meteorológicas, Z é a altura da cumeeira em edificações de até dois andares e K e A são coeficientes relacionados ao entorno do ambiente, possuindo no caso de estudo valores de 0,40 e 0,25 respectivamente, correspondendo ao caso de espaço urbano.

Dentro do contexto deste trabalho, é possível obter uma $V_{z=1,5}$ de 0,93m/s

utilizando como valores de entrada: altura Z de 1,50m (altura da entrada de ventilação da janela J2) e um valor de 2,1m/s de V_{10} fornecido pelo IDR-PR na medição mensal. De modo similar, é possível obter uma $V_{z=1,5}$ de 0,75m/s ao adotar o valor V_{10} de 1,7m/s e um valor $V_{z=1,5}$ de 1,42 m/s ao adotar $V_{10} = 3,2$ m/s com base na medição diária do IDR-PR. Nota-se que todos os V_z calculados divergem significativamente dos valores medidos por Decker, *et al.* (2023) *in loco*.

Adicionalmente, a modelagem do perfil de velocidade do vento gerado pela Camada Limite Atmosférica se destaca como ferramenta preditiva para a obtenção de condições de contorno de velocidade em simulações CFD. A técnica considera a porção da camada da atmosfera que sofre influência da superfície terrestre, incorporando a rugosidade da superfície, atrito, turbulência e altura do perfil (Blocken, *et al.*, 2007; Holmes, 2007). O perfil de velocidade é plotado pela equação 9 a seguir.

$$U(z) = \frac{u_*}{k} * \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (9)$$

Onde:

$U(z)$ representa a função de velocidade do vento em torno da altura Z em m/s, u_* representa a velocidade de atrito em m/s, k representa a constante de von Kármán de valor 0,41, z a altura de medição de interesse sobre o solo e z_0 a rugosidade aerodinâmica do terreno.

Nota-se que a ferramenta possui algumas limitações. Schuster, 2021 disserta sobre efeitos térmicos que impactam em escoamento de ventos em baixas altitudes (de até 100 metros) e são desconsiderados no uso desta equação de perfil. Blocken, *et al.* (2007) também discutem ajustes e variações da fórmula de CLA, de modo a refletir melhores resultados.

A rugosidade aerodinâmica do terreno (z_0) possui valores sugeridos pelo EUROCODE (2005) resumidos pela tabela 5 a seguir.

Tabela 5: Referências de valores de z_0 .

Local (descrição)	z_0 (m)
Área urbana adensada	1
Área suburbana	0,3
Campo aberto	0,05
Terreno plano	0,01
Mar ou áreas costeiras	0,003

Fonte: Adaptado de EUROCODE (2005).

Adotando um coeficiente z_0 representativo para zonas urbanas de 1,0m e impondo as condições conhecidas de $U_{(10)} = 2,1\text{m/s}$ para um $z = 10\text{m}$, como fornecido pelo IDR-PR média horária, é possível obter uma velocidade de atrito u^* de 0,374m/s. Com este valor, repete-se o cálculo mantendo um z_0 de 1,0m e impondo uma altura z de interesse de 1,5m (altura da janela de entrada da ventilação no estudo), resultando em um valor de velocidade $U_{(1,5)}$ de aproximadamente 0,37m/s.

Adotando uma $U_{(10)} = 1,7\text{m/s}$, com base na medição diária de velocidade do vento do IDR-PR, é possível obter uma velocidade de atrito u^* de 0,303m/s e consequentemente, uma $U_{(1,5)} = 0,30\text{m/s}$, valor próximo de medições *in loco*.

Com isso, conclui-se que o método da Camada Limite Atmosférica (CLA) apresentou alta aproximação ao limite superior da faixa do maior número de medições *in loco* (medições na faixa de 0,03m/s a 0,30m/s). A tabela 6 a seguir ilustra os valores estimados comparado com os valores medidos *in loco*.

Tabela 6: Comparativo valores de velocidade estimados e medidos.

Método	Velocidade (m/s)	Variação - Limite superior
Medição <i>in loco</i>	0,03-0,30	-
Equação Simplificada	0,75	+150%
CLA	0,30	+0%

Fonte: o próprio autor.

Nota-se que a equação simplificada superestimou significativamente a velocidade do vento, apresentando valores aproximadamente 150% superiores ao limite máximo da faixa de velocidade medida. Por outro lado, o perfil logarítmico da camada limite atmosférica (CLA) apresentou resultados compatíveis com o limite superior observado experimentalmente.

Ressalta-se que durante o ensaio experimental existia a presença de grades

nas aberturas J2, sendo, portanto, um efeito indiretamente considerado nos valores de velocidade obtidos das medições que não é considerado durante a aplicação dos métodos de estimativa.

Considerando que o objetivo principal do trabalho é a calibração do modelo CFD com base em dados experimentais de ventilação, optou-se por definir quatro grandezas de velocidades analisadas nas simulações sendo: 0,03 m/s (limite inferior da faixa de medições), 0,3m/s (limite superior da faixa de medições e valor obtido pelo método CLA) e os valores intermediários de 0,06m/s e 0,20m/s. Destaca-se que a opção pelos valores intermediários dentro da faixa observada *in loco* busca uma melhor distribuição de valores de velocidade analisado.

3.3.4 Etapas da Simulação

A seguir são descritas todas as considerações, detalhes e simplificações que ocorreram nas etapas da simulação, em ordem semelhante à especificada no tópico da revisão bibliográfica. O *software* base utilizado nas etapas da simulação foi o Ansys versão estudantil 2025 R1 com o solver *Fluent*.

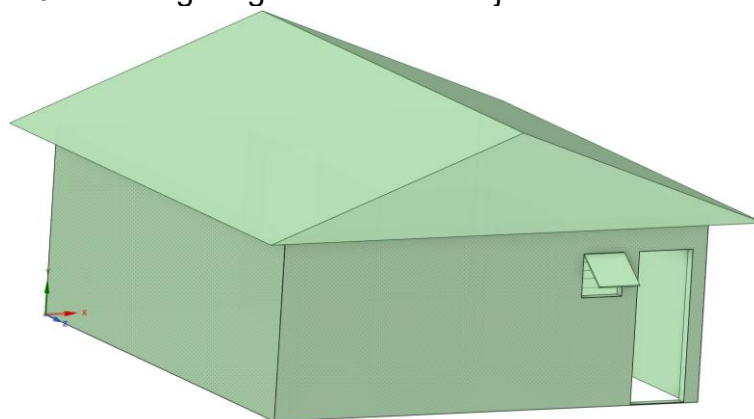
3.3.4.1 Modelagem geométrica

A partir das dimensões presentes em um arquivo dwg do AutoCad foi modelado diretamente no *software* integrado SpaceClaim do *workbench* da Ansys o objeto de estudo.

O telhado da edificação, com duas águas, possui uma altura de 1,40m com caimento aproximado de 3,70m para cada direção, gerando beirais laterais com 0,50m e beirais frontais e traseiros de 0,60m. A janela J2 de correr foi modelada considerando sua abertura máxima de 50%, enquanto a janela J1 maxim-air foi modelada em sua abertura maxim-air de 56° com uma espessura de 2 cm.

O volume aproximado da área interna da região integrada de sala e cozinha é de aproximadamente 43,31m³, considerando uma espessura de paredes internas de 14 cm. As figuras 16 e 17, a seguir, ilustram a modelagem da residência.

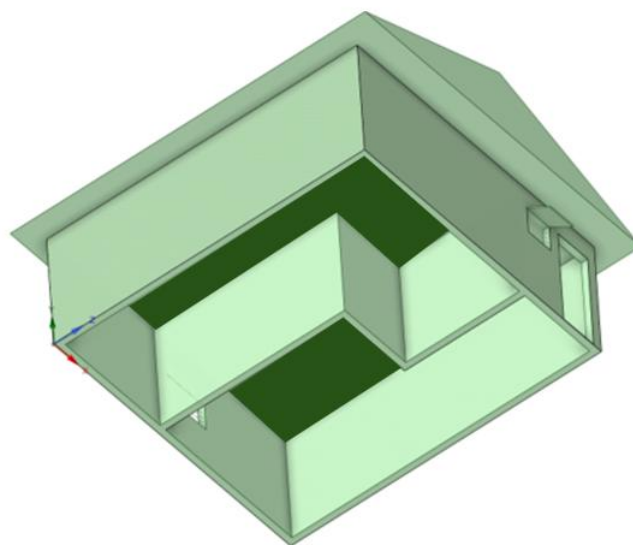
Figura 16: Modelagem geométrica do objeto de estudo.



Fonte: o próprio autor.

É importante destacar que na modelagem foi desconsiderada a porta P2 da fachada leste, por não ter sido aberta durante nenhum cenário de ventilação do artigo de Decker, *et al.* (2023). Além disso, as portas internas do banheiro e dos dormitórios P3 não foram modeladas por não serem ambientes analisados no artigo.

Figura 17: Modelagem geométrica do objeto de estudo – vista inferior.



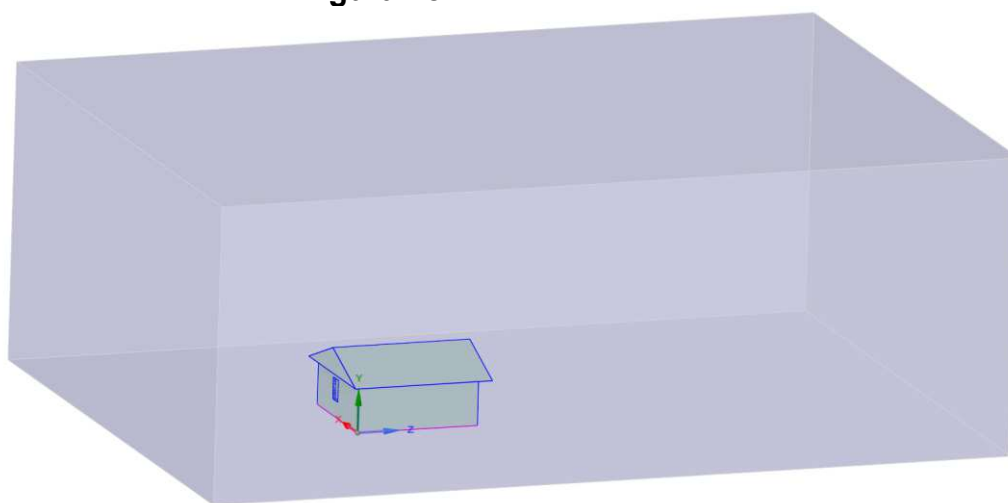
Fonte: o próprio autor.

No caso real, existe uma grande mesa na região da sala, em conjunto com diversas cadeiras, uma estante, uma bancada, uma pia da área social e outras mobílias menores. Estudos como de Rocha, *et al* (2023) favorecem o entendimento de que, muitas vezes, em simulações CFD a influência da modelagem destes objetos é mínima, podendo ser desconsiderados. Todas estas medidas buscaram otimizar as

simulações, economizando no custo computacional e complexidade das análises.

Em relação ao domínio do fluido considerado, adotou-se as recomendações de estudos semelhantes da literatura como de Tominaga, *et al* (2008) e Costola, *et al* (2009), os quais sugerem uma dimensão de domínio equivalente a cinco vezes ao pé-direito da edificação nas regiões de barlavento (frente), laterais e acima da edificação, enquanto para a região de sotavento (atrás) adotou-se uma dimensão de dez vezes o pé-direito. Considerando uma altura aproximada de 2,5m de pé-direito, as dimensões do domínio da região sotavento foram de 25m e das demais regiões 12,5m (figura 18).

Figura 18: Domínio considerado.



Fonte: o próprio autor.

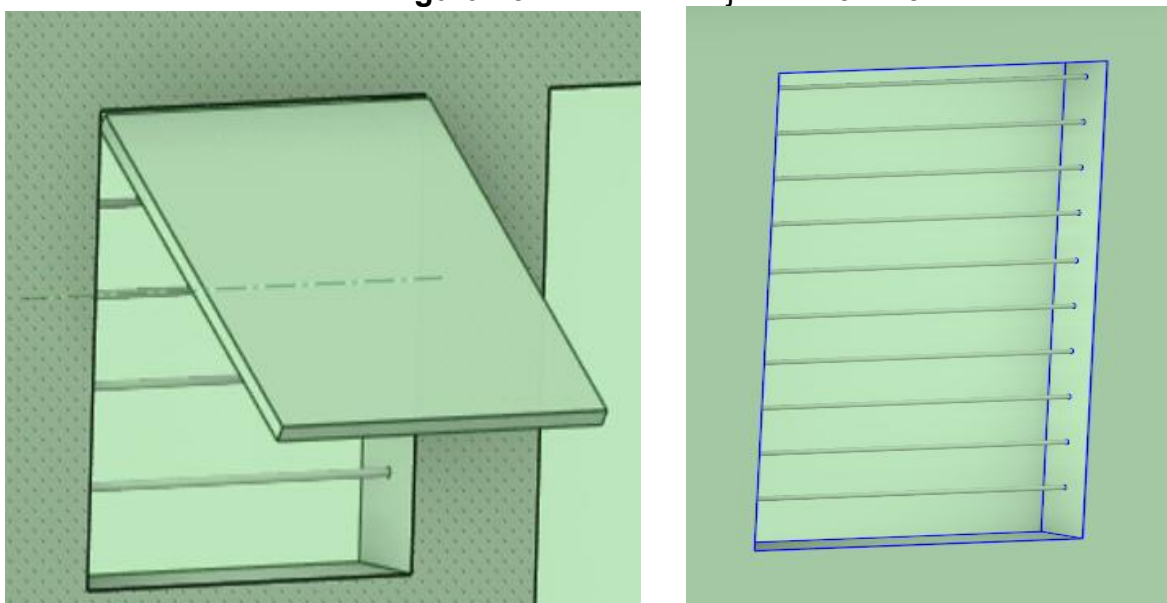
Quando comparada à região do caso real, o domínio considerado engloba alguns obstáculos que não foram considerados na modelagem geométrica, a motivo de simplificação, porém são importantes e devem ser discutidos. Inicialmente, vale destacar que a topografia do terreno em questão do objeto de estudo possui uma leve inclinação, se elevando predominantemente na direção sul para norte. Além disso, a cerca de 10m da fachada leste, existe uma rua com constante fluxo de carros que pode interferir na ventilação. Por fim, existe a presença de grama baixa no entorno da edificação e de três árvores com diâmetro aproximado de 0,80m, sendo a primeira localizada a uma distância de cerca de 60cm do encontro da fachada leste com a sul em direção sudeste, a segunda na mesma direção, porém a cerca de 8,10m e a última está presente a cerca de 4,3m da fachada oeste.

Em futuras simulações mais criteriosas, estes detalhes devem ser levados em consideração. Contudo, considerando que a velocidade do vento é de baixa grandeza e nenhum desses obstáculos estão presentes diretamente na fachada leste

de barlavento da ventilação analisada, optou-se por testar as demais variáveis discutidas anteriormente ao custo de simplificar o máximo possível a geometria local, reduzindo o tempo e a complexidade empregada nas simulações.

Sabendo-se que no caso real existem grades protetoras nas janelas J1 e J2, a modelagem das grades com o intuito de avaliar o seu impacto na ventilação natural e no fluxo do escoamento interno, foi considerada pertinente na execução do trabalho, porém, como segunda etapa de simulações. Apenas nos casos selecionados da primeira etapa de simulações foram aplicadas as grades em simulações adicionais. Na modelagem desses casos foram consideradas grades com diâmetro aproximado de 1,2 cm distantes entre si em espaçamentos de 12 cm. Os detalhes das janelas, assim como a grade são vistos na figura 19.

Figura 19: Detalhe das janelas J1 e J2.



Fonte: o próprio autor.

Após a realização da modelagem geométrica e configuração do domínio, extraiu-se o volume interno do ambiente integrado da sala e cozinha, sendo utilizada a opção de *surpress for physics* na geometria do objeto, de modo que apenas o volume interno e o domínio sejam considerados nas próximas etapas da simulação da geração de malha. Esta etapa é importante, uma vez que a malha só é necessária onde ocorre o escoamento do fluido, o que não é o caso da geometria sólida da edificação.

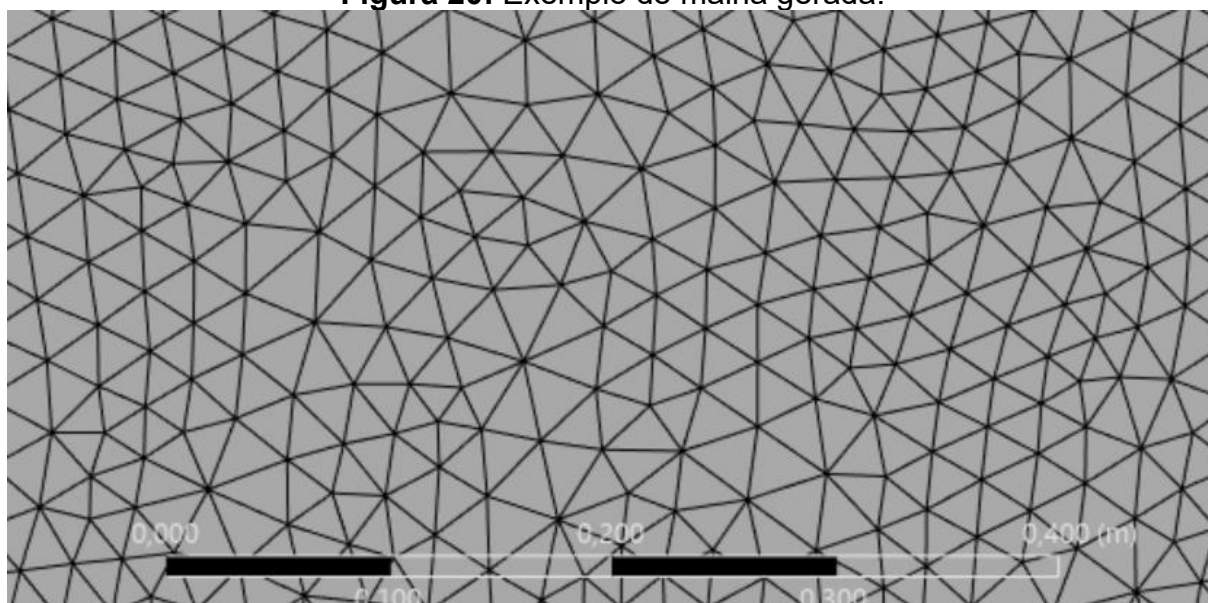
3.3.4.2 Configuração da malha

A malha foi realizada por meio do *software meshing*, integrado ao *workbench* da Ansys. Dentro do menu de configuração, selecionou-se “CFD” dentro das opções de *physics preference* da aba “*defaults*”.

Em seguida, foi configurado o “*inflation*”. Este termo consiste em uma técnica de refinamento de malha que ao utilizar elementos prismáticos menores próximos a regiões de contato entre os fluídos e sólidos, consegue-se captar um comportamento mais realista e preciso do fluído nesses locais, ocasionando uma maior confiabilidade na simulação posterior (Yang *et al.*, 2014; Duarte Junior, 2023). Para esta configuração no *meshing* deve-se selecionar as opções *automatic inflation* selecionando *all faces in chosen named selection*, dentro da aba de “*inflation*”. Na sequência configurou-se a *named selection* para *walls*, de modo a utilizar a técnica de *inflation* nas paredes em contato com o fluído do objeto de estudo e optou-se por deixar a *transition ratio* padrão de 0,272 e o *maximum layers* padrão de 5. O primeiro termo representa a razão de crescimento das camadas de *inflation*s a partir da parede em contato com o fluído e o segundo o número máximo de camadas de *inflation* a serem aplicados.

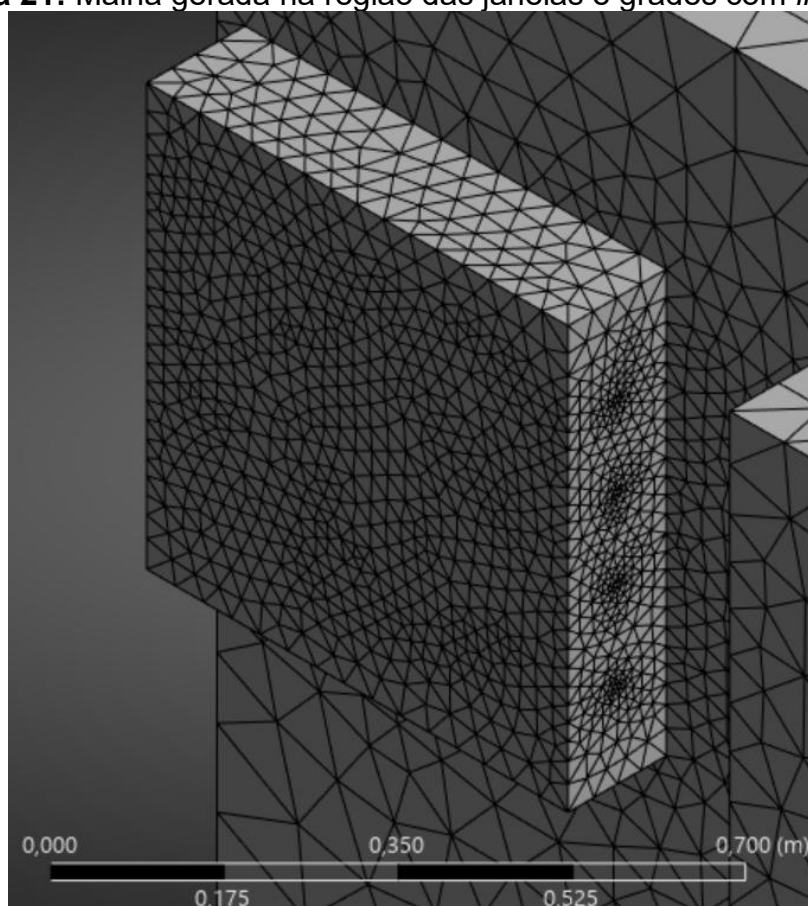
Por fim, dentro da aba “*defaults*” configurou-se na opção *element size* o tamanho em metros de cada elemento da malha a ser criado. O tamanho nesse caso dependeu de cada caso de variável principal estudado, haja visto que foram considerados três possíveis tamanhos de elemento de malha, sendo 0,04m, 0,05m e 0,06m. É importante ressaltar que o tamanho dos elementos das malhas não se aplica necessariamente às regiões onde configurou-se o *inflation*, ou seja, nas regiões mais próximas da parede, onde nesses casos o próprio *meshing* pode aplicar um tamanho de malha menor de acordo com o que julgar necessário e for configurado na aba de “*inflation*” anteriormente. As figuras 20 e 21 a seguir ilustram malhas geradas.

Figura 20: Exemplo de malha gerada.



Fonte: o próprio autor.

Figura 21: Malha gerada na região das janelas e grades com *inflation*.



Fonte: o próprio autor.

Após a geração das malhas, é possível avaliar a qualidade das mesmas a partir da aba “*quality*”, onde constam valores de duas métricas de malhas discutidas anteriormente: *skewness* e *orthogonal quality*. Lembrando que no caso da métrica de *skewness*, valores próximos de zero indicam uma melhor qualidade, enquanto no caso da métrica de *orthogonal quality*, valores mais próximos de um que indicam maior qualidade da malha. A figura 22 ilustra a qualidade de determinada margem de dados de cada malha seguida pela literatura.

Figura 22: Valores referência de métricas de *skewness* e *orthogonal quality*.



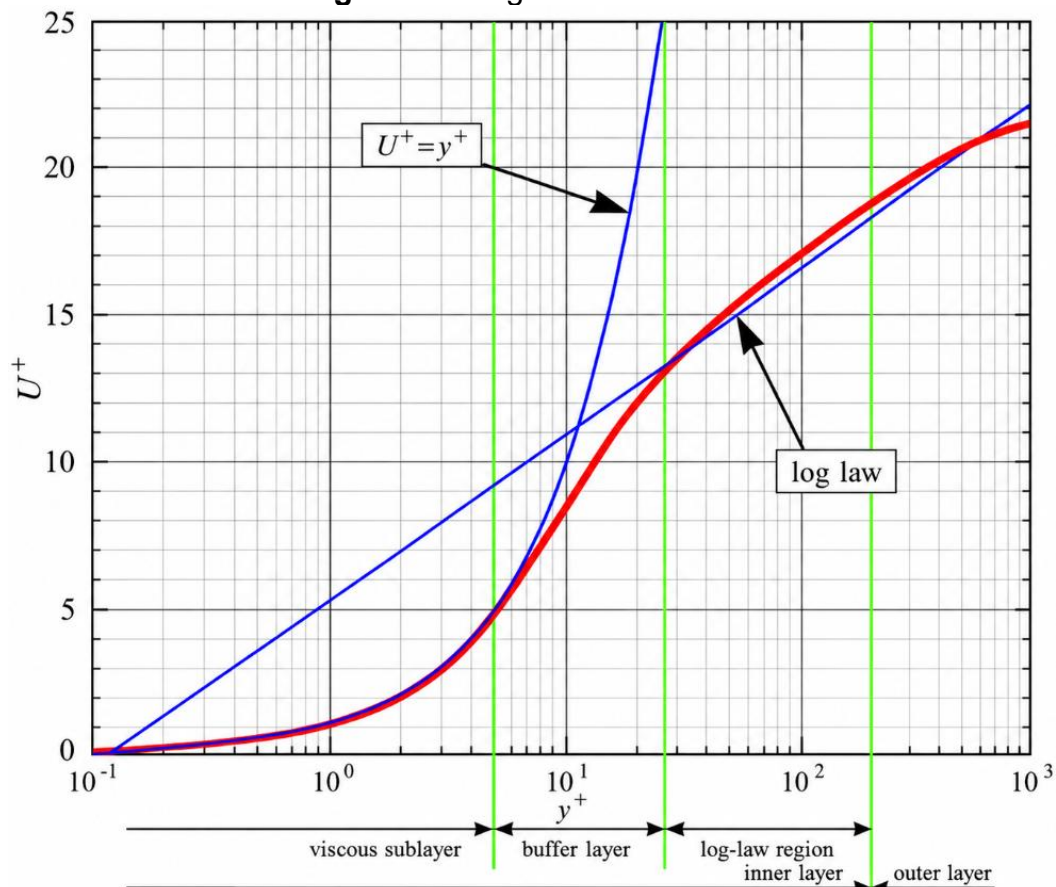
Fonte: Fatchurrohman, 2017.

Como já discutido anteriormente, a métrica de malha y^+ se diferencia das anteriores por não envolver apenas a geometria da malha, mas também características do escoamento. Deste modo, a sua análise só é possível de ser realizada após feitas as simulações, na etapa de pós-processamento. Neste trabalho os seus resultados foram obtidos a partir da aba de “*results*”, opção *display*, em seguida *contours*, selecionando a opção de “*turbulence*” e por fim *Yplus*.

Para avaliar a adequação dos valores de y^+ em simulações CFD é necessário compreender a lei das paredes (*law of the wall*). Esta lei caracteriza o escoamento turbulento próximo às superfícies em três regiões distintas. Para valores baixos de y^+ (aproximadamente $1 < y^+ < 5$), o escoamento encontra-se na subcamada viscosa e pode ser resolvido diretamente pela malha, dispensando o uso de funções empíricas de superfícies. Para valores intermediários ($5 < y^+ < 30$), ocorre uma região de transição chamada *buffer layer*, entre o regime com melhor resolução pela viscosidade e o regime logarítmico, onde nem a resolução direta da camada viscosa nem o uso de funções empíricas de superfície convencionais funcionam com elevada precisão. Por fim, a última região é reservada para valores mais elevados ($y^+ > 30$), onde na qual o uso de funções de superfície baseadas em correlações empíricas possui um melhor funcionamento (Wilcox, 2006; Ansys 2023). A figura 23 a seguir exemplifica o

raciocínio.

Figura 23: Regiões da *Law of the wall*.



Fonte: Wilcox, 2006.

3.3.4.3 Configuração do solver

Para a etapa do solver, foi utilizado o *software* Fluent, também integrado ao *workbench* da Ansys. Logo no menu inicial, é importante destacar que todas as simulações foram feitas com a opção *double precision* e utilizando duas cores de processamento por meio de um notebook Dell Inspiron 3501 com 16GB de ram, processador i7 de 11ª geração e uma placa de vídeo dedicada Nvidia Ge Force MX330.

Na sequência foi ativada a opção de energia, alterou-se as unidades de temperatura para °C na aba de “*domain*” em *units* e habilitou-se a gravidade com um valor aproximado de $-9,81 \text{ m/s}^2$ no eixo Y. O modelo padrão de viscosidade $k-\omega$ (2eqn) equivalente ao RANS em conjunto com o modelo SST $k-\omega$ foram utilizados para a simulações com variáveis principais. Adicionalmente, adotou-se a opção de fluido ar padrão do *software* e foi verificado se ele estava com caráter de fluido compressível na janela de fluidos.

A próxima etapa é referente às condições de contorno utilizadas. Nesse ponto

cada abertura (*inlet*) e saída (*outlet*) definida na geometria na etapa do SpaceClaim, na aba de *groups* foi alimentada com cada condição de contorno estudada por caso na aba de “*boundary conditions*”. Como característica comum, todos os casos foram feitos com uma temperatura de 24°C considerada adequada de acordo com as medições de temperatura fornecidas no estudo de Decker, 2023 e tiveram uma pressão inicial manométrica de 0 Pa, pelo fato de todos os pontos estarem apenas sobre efeito da pressão atmosférica.

Na aba de “*initialization*” adotou-se por padrão a *standard* e em seguida na configuração da “*run calculation*” optou-se por definir um número de iterações de 200, de modo que não seja uma simulação com número raso de iterações, porém que não seja excessivamente custosa do ponto de vista computacional. Em relação aos critérios de parada adotados, tanto os resíduos de momento em cada eixo, os resíduos de continuidade, k e ω possuíram limites de 10^{-3} . A exceção foram os resíduos da energia de dissipação ε que possuíram critérios de parada na ordem de 10^{-6} .

Dentre os resultados pós-simulação, a taxa de ventilação (ACH) se destaca e foi calculada por meio da vazão volumétrica. Esta vazão é obtida por meio da consulta dos *fluxes*, na aba “*reports*” selecionando-se a entrada (*inlet*) do sistema ou saída (*outlet*) e pedindo o “*net results*”, representando a taxa de fluxo em kg/s. A partir deste dado, é possível dividir o valor pela densidade do ar “ ρ ” constante em temperatura de 24°C, sendo aproximadamente 1,204 kg/m³ para obter a vazão volumétrica (Q) em m³/s. A partir deste valor é possível utilizar a equação 10, a seguir, para o cálculo da taxa de renovação de ar por hora (ACH).

$$\text{Taxa de renovação de ar (ACH)} = \frac{3600 * Q}{V} \quad (10)$$

Onde: Q representa a vazão volumétrica em m³/s, V representa o volume do ambiente em m³ e a taxa de renovação é referente ao número de renovações do ar no ambiente por hora em h⁻¹.

É importante ressaltar que a vazão volumétrica do *inlet* neste caso funciona como Air Flow Rate (AFR) discutida na revisão e só pode ser considerada no cálculo da taxa de ventilação natural em regimes permanentes de escoamento, onde entende-se que a vazão volumétrica de entrada deve ser igual ou aproximadamente equivalente à vazão volumétrica de saída, que é o caso deste estudo.

Em relação as configurações específicas de cada caso, as diferentes direções do vento foram consideradas na aba de condições de contorno da entrada *inlet* ao mudar o campo de *velocity specification method* para “componentes” e através do campo de velocidade do vento em cada direção, decompôs o ângulo desejado (35° ou 60°) no plano XZ por meio das funções trigonométricas seno e cosseno. Já as diferentes velocidades foram consideradas em cada caso por meio do valor registrado no *inlet*.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir são discutidos os resultados de cada etapa de simulação organizados em: análise de métricas de malha, avaliação das taxas de renovação de ar (ACH) e custo computacional para a primeira e a segunda etapa. Adicionalmente, na segunda etapa, é apresentada uma análise qualitativa do fluxo de escoamento interno.

Em cada tópico são apresentados recortes representativos dos resultados obtidos, de modo a fundamentar a análise realizada. Os resultados obtidos podem ser consultados na íntegra ao final deste trabalho, nos apêndices A (primeira etapa de simulações, composta dos casos 1-16) e apêndice B (segunda etapa de simulações, composta dos casos 17-24), englobando as variáveis consideradas em cada caso, os dados referentes à qualidade e métrica de malha e os resultados de ACH obtidos.

4.1 MÉTRICAS DE MALHA – PRIMEIRA ETAPA

A tabela 7 a seguir ilustra os dados referentes às malhas utilizados nas simulações da primeira etapa, divididos entre os três tamanhos de elementos de malha adotados: 0,06m, 0,08m e 0,10m.

Tabela 7: Dados das malhas utilizadas – Primeira etapa.

Elemento da Malha (m)	Nº de nós (nodes)	Nº Elementos	Métricas de malha			
			Skewness ~0º (melhor)		Orthogonal Quality ~1 (melhor)	
			Médio	Máximo (pior)	Médio	Mínimo (pior)
0,10	65583	203920	0,24652	0,99422	0,75198	5,78E-03
0,08	106526	343578	0,23466	0,89990	0,76388	1,00E-01
0,06	204283	683667	0,22661	0,96495	0,77199	3,51E-02

Fonte: o próprio autor.

Em relação ao tamanho da malha, apesar de terem sido utilizadas malhas com tamanhos robustos (0,06m a 0,10m), os tamanhos adotados se mostraram adequados para a complexidade da geometria e simulações, resultando em valores médios próximos, com variações menores que 0,1% de ACH. Dessa forma,

considerando o ACH como principal parâmetro a ser analisado neste estudo, os tamanhos de malha adotados foram considerados satisfatórios para o teste de independência de malha. A tabela 8, a seguir, apresenta o Caso 10, que se destaca por exibir as maiores variações nos valores de ACH em função dos diferentes tamanhos de elementos de malha adotados.

Tabela 8: Caso com maior variação de ACH em função da malha.

Caso Nº	Direção do Vento (°)	Velocidade do Vento (m/s)	Tamanho da Malha (m)	Nº de renovações (h ⁻¹)	Net Results (kg/s)
10	0	0,3	0,10	24,36	0,352800
10.1	0	0,3	0,08	24,36	0,352937
10.2	0	0,3	0,06	24,38	0,353101

Fonte: o próprio autor.

Em relação às métricas de qualidade da malha, verificou-se que nenhuma das configurações analisadas apresentou valores médios de *skewness* superiores a 0,25, o que as enquadra na categoria “excelente”, conforme a classificação apresentada na Figura 20. No entanto, observou-se a ocorrência de valores máximos pontuais próximos de 1, classificados como “inaceitáveis”, localizados em regiões de geometria complexa, como vértices das esquadrias com interseções próximas.

De forma análoga, ao analisar os valores de *orthogonal quality*, constatou-se que o valor médio de todas as simulações permaneceu próximo de 0,75, sendo classificado como “muito bom” de acordo com a mesma referência. Ainda assim, identificaram-se valores mínimos isolados inferiores a 0,001, sendo considerados “inaceitáveis”, igualmente associados a regiões de difícil geometria.

Contudo, contrariando a expectativa de que o refinamento da malha leva necessariamente à melhoria dos parâmetros de qualidade, a configuração com tamanho de elemento igual a 0,08 m apresentou um *skewness* máximo inferior tanto à malha mais grosseira (0,10m) quanto à mais refinada (0,06m). O mesmo comportamento foi observado nos valores de *orthogonal quality*, nos quais a malha intermediária apresentou desempenho superior às demais. Apesar de contraintuitivo, esse resultado está coerente com o que é discutido na literatura, como no estudo de Katz e Sankaran (2011), que alerta para o fato de que refinamentos excessivos podem comprometer a qualidade da malha, gerando elementos com formas achatadas e

ângulos distorcidos.

Assim, ao se considerar conjuntamente os critérios de qualidade da malha (*orthogonal quality* e *skewness*), conclui-se que a malha com tamanho de 0,08m foi a que apresentou o melhor desempenho global nesta primeira etapa, mostrando-se a malha mais adequada para simulações deste estudo e sendo selecionados para a análise do y^+ .

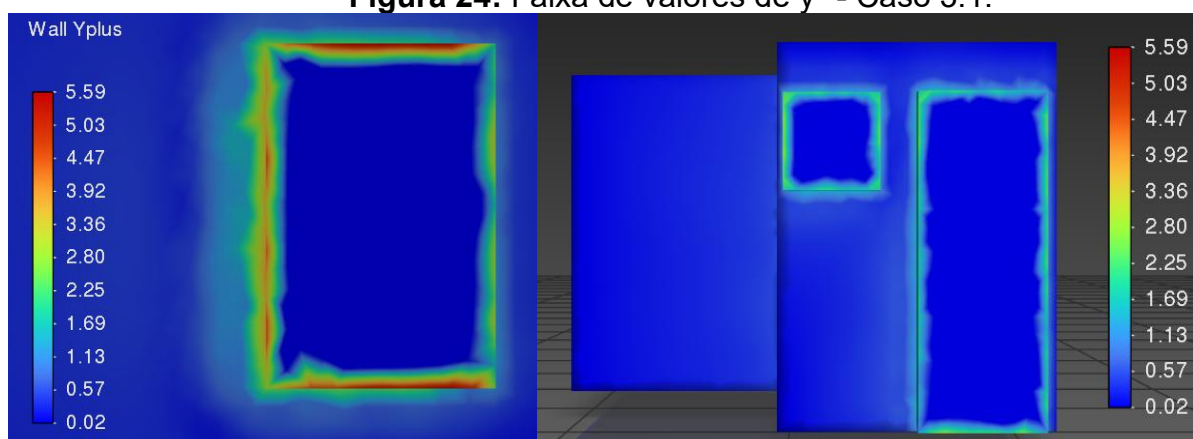
Em relação ao parâmetro y^+ , avaliou-se na primeira etapa apenas as simulações dos casos selecionados com a malha de tamanho 0,08m representados pelos casos 3.1, 5.1, 8.1 e 10.1 (vide apêndice A). Adicionalmente, esses casos foram selecionados para serem simulados nos casos adicionais da primeira etapa (LES) e na segunda etapa com gradeamento. A tabela 9 a seguir destaca os valores obtidos nesta análise.

Tabela 9: Coeficientes y^+ obtidos - Primeira etapa.

Caso Nº	Direção do Vento (°)	Abordagem	Velocidade do Vento (m/s)	Tamanho da Malha (m)	Nº de nós (nodes)	Nº Elementos	y^+
3.1	60	RANS SST k- ω	0,03	0,08	106526	343578	0,15-5,6
5.1	35	RANS SST k- ω	0,06	0,08	106526	343578	0,036-9,1
8.1	35	RANS SST k- ω	0,20	0,08	106526	343578	0,088-27
10.1	0	RANS SST k- ω	0,3	0,08	106526	343578	0,12-30,27

Fonte: o próprio autor.

A seguir, na figura 24 é ilustrada a faixa de valores de y^+ obtida em uma das simulações, representando a abertura de entrada e as de saída, sendo os lugares mais críticos de escoamento. Observa-se que todos os casos simulados apresentaram valores baixos de y^+ (< 1) ao longo das paredes, devido às baixas velocidades nestes locais, enquanto os maiores valores ocorreram nas aberturas. Dessa forma, o campo de y^+ não se distribuiu de forma homogênea no domínio, concentrando valores máximos próximos à abertura e valores mínimos ao longo das paredes. Com isso, optou-se por analisar os valores de y^+ por meio de faixas, representando os valores máximos e mínimos de y^+ obtidos em cada caso. Nota-se que as regiões próximas às aberturas constituem as zonas mais críticas do escoamento, sendo o valor máximo de y^+ um indicador conservador nestas áreas.

Figura 24: Faixa de valores de y^+ - Caso 3.1.

Fonte: o próprio autor.

Em relação aos valores obtidos, constatou-se uma maior amplitude de faixa de valores na simulação do caso 10.1, variando de 0,12 a até 30,27 ao passo que a simulação do caso 3.1 apresentou a menor faixa, comportando-se de 0,015 a até 5,6. Sabendo que o parâmetro y^+ depende do fluxo do escoamento na sua definição, é esperado que escoamentos com fluxos de maiores velocidades (caso 10.1) tendem a apresentar valores maiores de y^+ quando comparados a simulações com menores velocidades (caso 3.1). Neste contexto, o caso com condições mais favoráveis (10.1) situou-se predominantemente em regiões de transição ($5 < y^+ < 30$), enquanto o caso com condições mais desfavoráveis (3.1) resultou em maioria no local próximo à faixa de subcamada viscosa, com melhor resolução por meio da camada diretamente pelo *solver*.

Em relação aos casos intermediários 5.1 e 8.1, ambos apresentaram faixas de y^+ de 0,036 a 9,1 e 0,088 a 27, respectivamente. Destaca-se que como discutido na metodologia, valores intermediários de 5 a 30 não são considerados ideais de se trabalhar pela literatura especializada, por caracterizar uma região de transição na qual nem a resolução da subcamada de viscosidade e nem o uso de equações empíricas de superfícies funcionam com alta precisão. Porém, devido à significativa baixa sensibilidade das simulações deste trabalho às tensões das paredes, baixa velocidade e somado ao fato que valores desta faixa ocorreram pontualmente em regiões próximas a janela, os resultados obtidos sugerem que o parâmetro de y^+ em conjunto com a abordagem LES, não comprometeu a previsão da taxa de renovação de ar.

A tabela 10, a seguir, ilustra os dados dos coeficientes y^+ obtidos nas

simulações dos casos adicionais da primeira etapa, caracterizados pelo uso de abordagem LES com a geometria simplificada.

Tabela 10: Coeficientes y^+ obtidos – Casos Adicionais Primeira etapa.

Caso Nº	Direção do Vento (°)	Abordagem	Velocidade do Vento (m/s)	Tamanho da Malha (m)	Nº de nós (nodes)	Nº Elementos	y^+
13	60	LES	0,03	0,08	106526	343578	0,06-5,1
14	35	LES	0,06	0,08	106526	343578	0,11-9,2
15	35	LES	0,20	0,08	106526	343578	0,35-30
16	0	LES	0,3	0,08	106526	343578	0,27-37,06

Fonte: o próprio autor.

Ao analisar as tabelas 9 e 10 é possível observar que nos casos mais desfavoráveis (3.1 e 13), o valor máximo de y^+ foi reduzido com o uso da abordagem LES, passando a se posicionar de forma mais consistente na região de resolução direta pela malha (> 5).

Para os casos intermediários de baixa velocidade (5.1 e 14), verificou-se baixo impacto nos valores máximos de y^+ , indicando comportamento semelhante entre as abordagens. Já no comparativo entre os casos 8.1 e 15, também representativos de condição intermediária, observou-se um leve aumento no valor máximo de y^+ (de 27 para 30).

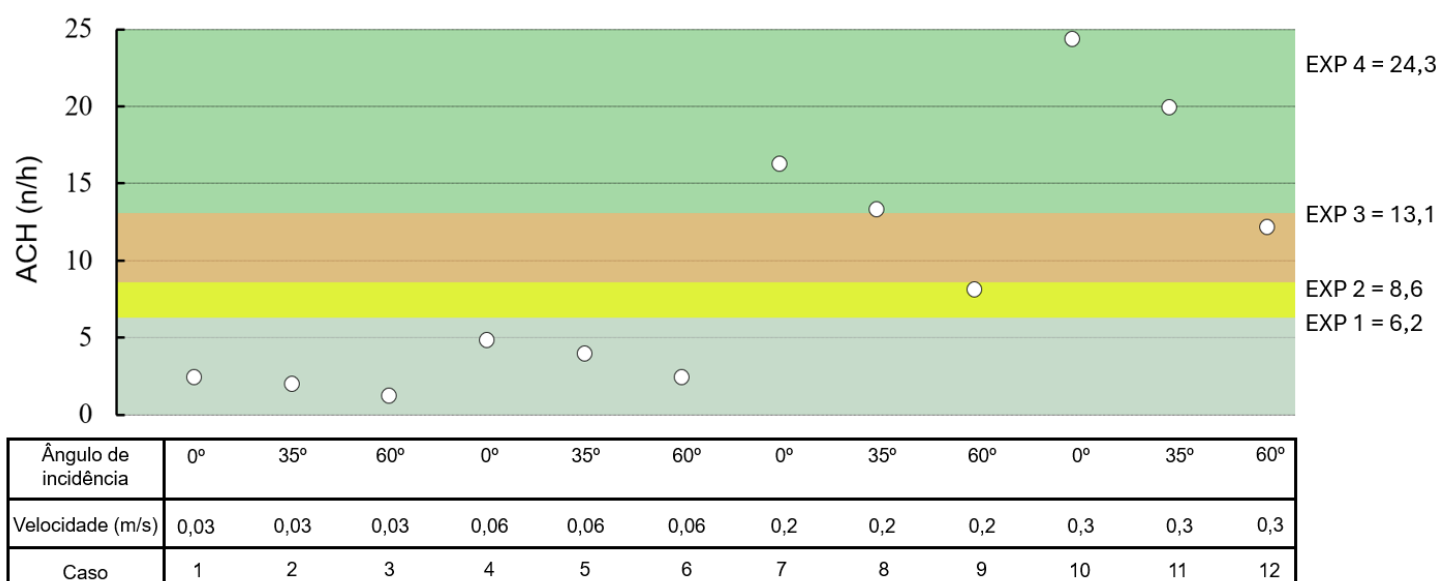
Por fim, nos casos mais favoráveis (10.1 e 16), observou-se aumento do valor máximo de y^+ de 30,27 para 37,06 com o uso de LES, indicando que parte dos valores ultrapassou a faixa de transição usualmente adotada. Entretanto, não é possível afirmar melhora apenas com base nesse indicador, uma vez que parcela significativa dos valores de y^+ ainda permaneceu na região de transição, sendo necessária análise mais aprofundada para avaliar o impacto da adoção da abordagem LES neste aspecto.

Nesse contexto, a utilização da abordagem LES mostrou-se vantajosa apenas no caso 13, sob análise do critério de y^+ , por promover o afastamento dos valores de y^+ da região de transição e posicioná-los de forma mais consistente na faixa usualmente recomendada ($y^+ < 5$).

4.2 TAXA DE RENOVAÇÃO DE AR (ACH) – PRIMEIRA ETAPA

Para uma melhor visualização dos resultados de ACH obtidos nas simulações, o Gráfico 1 sintetiza os valores correspondentes a cada caso, assim como suas respectivas condições de contorno, incluindo velocidade do vento e ângulo de incidência. Adicionalmente, são indicados os valores obtidos por meio do ensaio experimental de Decker *et al.* (2023), representados pelas faixas coloridas de plano de fundo e identificados pela nomenclatura EXP.

Gráfico 1: ACHs obtidos em cada caso simulado.



Fonte: o próprio autor.

Complementarmente, a Tabela 11 resume os resultados de ACH apresentados no gráfico, incluindo a diferença percentual entre os valores simulados e os respectivos valores experimentais mais próximos.

Tabela 11: Comparativo de variação de ACH das simulações e experimento.

Caso	Ângulo de incidência	Velocidade (m/s)	ACH (n/h)	ACH Exp mais próximo	Δ%
1	0°	0,03	2,44	6,2	60,6
2	35°	0,03	2,00	6,2	67,7
3	60°	0,03	1,22	6,2	80,3
4	0°	0,06	4,87	6,2	21,5
5	35°	0,06	3,99	6,2	35,6
6	60°	0,06	2,44	6,2	60,6
7	0°	0,20	16,28	13,1	24,3
8	35°	0,20	13,33	13,1	1,8
9	60°	0,20	8,15	8,6	5,2
10	0°	0,30	24,36	24,2	0,7
11	35°	0,30	19,95	24,2	17,6
12	60°	0,30	12,20	13,1	6,9

Fonte: o próprio autor.

A análise dos dados indica que o modelo CFD apresentou resultados coerentes com o comportamento esperado para as condições de contorno adotadas. Observa-se que o aumento da velocidade do vento resultou em maiores valores de ACH, enquanto o aumento do ângulo de incidência impactou negativamente esse parâmetro.

Esse comportamento é esperado, uma vez que ângulos de incidência mais elevados reduzem a componente da velocidade perpendicular à abertura, diminuindo a eficiência da ventilação natural, conforme discutido por Teppner *et al.* (2014).

Os resultados obtidos indicam que a adoção de um ângulo de incidência de 60° promoveu uma redução aproximada de 50% no ACH quando comparada às simulações realizadas sob as mesmas condições de contorno, porém com incidência perpendicular (0°). De modo análogo, nota-se que simulações com ângulo de incidência de 35° apresentaram desempenho inferior aproximado de 15 a 20% em comparação com os casos com incidência perpendicular.

Ao comparar os valores de ACH obtidos nas simulações com os quatro valores experimentais, observam-se boas aproximações nos casos 4, 7, 8, 9, 10, 11 e 12, com diferenças percentuais de 21,5%, 24,3%, 1,8%, 5,2%, 0,7%, 17,6% e 6,9%, respectivamente. Destaca-se as aproximações dos casos 8, 9, 10 e 12, com variações inferiores a 10%, sendo caracterizados por casos nos quais foram utilizadas maiores velocidades de vento. Por outro lado, os casos 7 e 11, mesmo não apresentando variações inferiores a 10%, ainda demonstraram boa concordância conforme valores

resumidos pela literatura consultada na tabela 2, situando-se em uma região intermediária entre as faixas experimentais 3 e 4. Adicionalmente, o caso 4 se destaca como único caso dentre os que adotaram uma velocidade de vento intermediária baixa (0,06m/s) que alcançou significativa aproximação ao resultado experimental com valor mais baixo (6,2 n/h).

Entre as maiores dispersões observadas na comparação entre os casos simulados e as medições experimentais, destacam-se os casos 1, 2, 3, 5 e 6, com diferenças percentuais de 60,6%, 67,7%, 80,3%, 35,6% e 60,6%, respectivamente. Observa-se que esses casos correspondem às menores velocidades do vento empregadas. Uma possível hipótese para esse comportamento é que em condições de baixas velocidades médias do vento, o escoamento se torna mais suscetível à influência relativa de variações transitórias, como rajadas pontuais ocorridas durante o período de monitoramento *in loco*. Nessas condições, pequenas elevações momentâneas na velocidade do vento podem representar variações percentuais na taxa de renovação de ar obtida experimentalmente. Por outro lado, nas simulações CFD, adotou-se uma velocidade constante como condição de contorno, o que não permite representar essas variações pontuais do vento em caso real, podendo contribuir para a tendência de subestimar o ACH nestes casos.

Neste contexto, destacam-se os casos simulados que apresentaram maior aproximação em relação aos valores de ACH experimental nas diferentes faixas de velocidade analisadas: baixa velocidade — caso 04, com ângulo de incidência de 0° e velocidade do vento de 0,06 m/s (Δ 21,5%); média velocidade — caso 08, com ângulo de 35° e velocidade de 0,20 m/s (Δ 1,8%) e alta velocidade — caso 10, com ângulo de 0° e velocidade de 0,30 m/s (Δ 0,7%).

Em relação aos casos adicionais simulados nesta primeira etapa (13–16), caracterizados pelo uso da abordagem LES, não foram observadas variações significativas nos valores de ACH em comparação às suas contrapartes em RANS (Tabela 12). Esse comportamento pode ser atribuído à relativa baixa complexidade geométrica e do escoamento analisado, resultando na convergência de ambas as abordagens para valores semelhantes de ACH, não impactando de forma relevante neste parâmetro.

Tabela 12: Impacto da abordagem LES no ACH estudado.

Caso Nº	Abordagem	Direção do Vento (°)	Velocidade do Vento (m/s)	Tamanho da Malha (m)	Nº de renovações (h ⁻¹)	Net Results (kg/s)
3.1	RANS SST k- ω	60	0,03	0,08	1,22	0,017672
13	LES	60	0,03	0,08	1,22	0,017638
5.1	RANS SST k- ω	35	0,06	0,08	3,99	0,057804
14	LES	35	0,06	0,08	3,99	0,057803
8.1	RANS SST k- ω	35	0,20	0,08	13,33	0,193069
15	LES	35	0,20	0,08	13,33	0,193066
10.1	RANS SST k- ω	0	0,30	0,08	24,36	0,352937
16	LES	0	0,30	0,08	24,35	0,352752

Fonte: o próprio autor.

Ao retomar os valores apresentados na Tabela 2, referentes a dados obtidos na literatura, observa-se que estudos baseados em ensaios em túnel de vento, como os de Jiang *et al.* (2004), Hassan *et al.* (2020) e Prakash (2020), apresentaram baixas variações de resultados de ACH na validação com o modelo CFD, com diferenças máximas da ordem de 5% a 15%. Por outro lado, nos trabalhos de Bu *et al.* (2019), que utilizou o método de gás traçador como principal abordagem experimental, e Teppner *et al.* (2014), que utilizou ensaios experimentais de túneis de vento em conjunto com gás traçador, observaram-se variações máximas de 20% e 33,9%, respectivamente. Destaca-se que nesses estudos os ensaios foram realizados em condições de laboratório controladas e com o uso de protótipos. Adicionalmente, destaca-se os resultados obtidos por Hwange e Gorlé (2023), que ao fazer uso de monitoramento extensivo de ensaio de gás traçador por quinze dias em condição real de campo, observaram variações máximas nos valores de ACH entre o modelo simulado e o método experimental de aproximadamente -12,8% a +37%. Nesse contexto, os resultados obtidos no presente trabalho mostram-se compatíveis com aqueles reportados na literatura para estudos que combinam ensaios experimentais e simulações CFD aplicadas à ventilação natural.

No presente trabalho, podem ser levantadas algumas hipóteses específicas que contribuíram para o aumento da variabilidade dos resultados, destacando-se a significativa quantidade de incertezas envolvidas, tanto na execução do ensaio de gás traçador *in loco* quanto na realização das simulações. Decker *et al.* (2023) destacam em seu trabalho a dificuldade deste tipo de abordagem em ambiente não controlado,

como é o caso deste objeto de estudo. Os autores relatam desde incertezas pontuais com a acurácia e precisão dos equipamentos de medição utilizados a até incertezas muito significativas, como a grande variação dos fatores de velocidade e direção do vento durante as suas medições. Apesar de realizar o monitoramento da velocidade do vento, os autores ressaltam limitações quanto à confiabilidade dos valores obtidos, em razão da elevada variabilidade registrada.

Do ponto de vista da metodologia CFD, há incertezas pontuais referentes à simplificação de geometria exterior, metodologia de abordagem, refinamento de malha, entre outras. Estas incertezas ocorrem muitas vezes em razão de limitações de custo computacional necessário ou em limitação própria do *software* versão estudantil utilizado neste estudo, que prevê um número máximo de nós de aproximadamente 500.000 e de elementos de malha de 1.000.000. Adicionalmente, destaca-se as limitações de modelagem empregadas no desenvolvimento destas simulações, como a ausência da modelagem de grama e pequenas árvores presentes no entorno, como já discutido anteriormente, se tornando aspectos relevantes para o aumento de incertezas presentes.

Nesse contexto, o modelo CFD apresentou melhor concordância com os dados experimentais nos casos com maiores velocidades do vento, ao passo que demonstrou tendência em subestimar os valores de ACH nas simulações com velocidades mais baixas. Considerando as incertezas envolvidas, tanto na execução do ensaio experimental quanto na modelagem numérica, observa-se que os resultados apresentam compatibilidade em termos de ordem de grandeza.

Destaca-se que uma maior amostragem de ensaios experimentais, em conjunto com um período mais extenso de monitoramento das condições de contorno de direção e velocidade do vento, poderia contribuir para o refinamento dessas condições no modelo, resultando em uma calibração mais precisa.

Dessa forma, os demais parâmetros analisados neste estudo apresentam relevância técnica para o processo de calibração, ainda que parcial, evidenciando elevado potencial de aplicação à medida que as incertezas sejam reduzidas e as condições de contorno mais bem caracterizadas.

4.3 CUSTO COMPUTACIONAL – PRIMEIRA ETAPA

Em relação ao custo computacional, a abordagem LES, presente nos casos adicionais 13-16, obteve uma convergência de critérios de parada em um menor

número de iterações que a RANS, presente nos casos 1-12, embora ainda tenha requerido um maior tempo de processamento em suas simulações, devido ao maior tempo empregado em cada simulação.

Casos com malhas mais grosseiras e abordagem RANS convergiram por volta de até quinze iterações, ao passo que os casos com malhas mais refinadas convergiram em até trinta iterações. Enquanto os de abordagem LES convergiram em menos de dez iterações para malha mais grosseira e em até vinte para malhas mais refinadas. Quanto ao tempo das simulações em si, os casos com RANS variaram de aproximadamente dez minutos a quinze minutos, ao passo que os casos que fizeram uso de LES variaram de vinte a trinta minutos, representando um custo computacional e tempo de processamento adicional de até 100% nos casos mais extremos.

4.4 MÉTRICAS DE MALHA – SEGUNDA ETAPA

Na segunda etapa modelou-se uma nova geometria incluindo o gradeamento existente da janela de entrada J2 e na janela de saída J1. Observa-se que o gradeamento representa aproximadamente 9,2% da área efetiva de ventilação da janela J2 e 11,3% da área efetiva da janela J1, sendo um fator relevante no fluxo do escoamento interno de ar do ambiente.

Em função da nova geometria, foi necessário gerar novas malhas e repetir o teste de independência de malha. A região do gradeamento apresentou elevada concentração de elementos devido à sua característica geométrica, demandando um maior refinamento local. Nesse cenário, as malhas utilizadas na primeira etapa ultrapassaram o limite de elementos e nós permitido pela versão estudantil do *software*, sendo a principal restrição levada em consideração na adoção dos elementos de malha desta segunda etapa. Com isso, optou-se pelo uso de malhas globais grossas, com tamanhos de elementos de 0,6m, 0,7m e 0,8m.

Destaca-se que o refinamento local na região da grade foi realizado por meio da mesma configuração de *inflation*, adotada na primeira etapa. Dessa forma, buscou-se atender as limitações da versão estudantil sem comprometer a malha na região.

Os casos 17 a 20 correspondem aos casos selecionados na primeira etapa (3.1, 5.1, 8.1 e 10.1), porém, com a nova modelagem da grade e com os novos tamanhos de malha. A tabela 13, a seguir, ilustra os dados referentes às malhas obtidas nesta segunda etapa.

Tabela 13: Dados das malhas utilizadas – Segunda etapa.

Elemento da Malha (m)	Nº de nós (nodes)	Nº Elementos	Métricas de malha			
			Skewness ~0º (melhor)		Orthogonal Quality ~1 (melhor)	
			Médio	Máximo (pior)	Médio	Mínimo (pior)
0,8	119929	566402	0,24671	0,99972	0,75213	2,78E-04
0,7	142465	684217	0,24477	0,96973	0,75403	3,03E-01
0,6	197993	985735	0,23640	0,96980	0,76238	3,02E-02

Fonte: o próprio autor.

Observa-se que os valores das métricas de malha de *skewness* e *orthogonal quality* se mantiveram similares aos obtidos na primeira etapa e impactaram em variações inferiores a 0,1% na taxa de ACH entre si. Os valores médios permaneceram nas categorias “excelente” e “muito bom”, enquanto valores extremos de cada métrica, ocorreram novamente de forma pontual regiões de complexa geometria. De modo semelhante a primeira etapa, do ponto de vista das métricas de malha *skewness* e *orthogonal quality*, a malha intermediária 0,7m apresentou desempenho superior as demais, resultando em menores valores máximos de *skewness* e maiores valores mínimos de *orthogonal quality*. Deste modo, a malha de 0,7m foi selecionada para a aplicação da abordagem LES representada nos casos 21-24.

Considerando que a segunda etapa envolve uma geometria mais elaborada devido à inclusão das grades e a utilização de malhas mais grosseiras por limitação da versão estudantil, essa similaridade indica que a nova geometria e o maior tamanho de elemento não deterioraram a qualidade da malha. Dessa forma, tornou-se possível isolar o efeito da malha no parâmetro ACH nesta segunda etapa, concluindo o teste de independência de malha. Adicionalmente, esta similaridade sugere que o refinamento de malha empregado na primeira etapa foi possivelmente superior ao necessário para a previsão da variável de interesse (ACH), uma vez que o uso de malha mais grosseira em geometria mais complexa na segunda etapa de simulações resultou em valores similares.

Diferente da primeira etapa, na qual realizou-se a análise do y^+ apenas individualmente em cada caso selecionado, durante as simulações da segunda etapa realizou-se a análise em todos os casos. A tabela 14 ilustra os dados obtidos.

Tabela 14: Coeficientes y^+ obtidos - Segunda etapa.

Caso Nº	Abordagem	Direção do Vento (°)	Velocidade do Vento (m/s)	Tamanho da Malha (m)	Nº de nós (nodes)	Nº Elementos	y^+
17	RANS SST k- ω	0	0,3	0,8	119929	566402	0,29-39
17.1	RANS SST k- ω	0	0,3	0,7	142465	684217	0,18-16,85
17.2	RANS SST k- ω	0	0,3	0,6	197993	985735	0,23-15,43
18	RANS SST k- ω	35	0,2	0,8	119929	566402	0,20-31,1
18.1	RANS SST k- ω	35	0,2	0,7	142465	684217	0,19-15
18.2	RANS SST k- ω	35	0,2	0,6	197993	985735	0,19-14,9
19	RANS SST k- ω	35	0,06	0,8	119929	566402	0,07-19,20
19.1	RANS SST k- ω	35	0,06	0,7	142465	684217	0,07-5,34
19.2	RANS SST k- ω	35	0,06	0,6	197993	985735	0,06-5,13
20	RANS SST k- ω	60	0,03	0,8	119929	566402	0,04-14,58
20.1	RANS SST k- ω	60	0,03	0,7	142465	684217	0,03-2,90
20.2	RANS SST k- ω	60	0,03	0,6	197993	985735	0,03-2,82
21	LES	0	0,3	0,7	142465	684217	0,50-54,57
22	LES	35	0,2	0,7	142465	684217	0,42-29
23	LES	35	0,06	0,7	142465	684217	0,05-8,57
24	LES	60	0,03	0,7	142465	684217	0,03-2,60

Fonte: o próprio autor.

Em todos os casos a malha mais grosseira (0,8m) resultou em uma maior amplitude de valores de y^+ , ao passo que a malha mais refinada a menor. Este fato é esperado, sabendo que no cálculo do y^+ é considerado a própria distância y do elemento e os diferentes de tamanhos de malha utilizados implicaram em diferentes consequências de acordo com o caso analisado, sendo estas consequências discutidas a seguir.

Durante o caso 17, que representa o caso com condições de contorno mais favoráveis ao escoamento, o valor máximo de y^+ dos casos com malhas menores (17.1 e 17.2) se manteve em torno de quinze, se localizando dentro da região de transição (5-30), a qual a literatura classifica como não ideal de trabalhar. Por outro lado, o valor máximo de y^+ na malha mais grosseira (caso 17) alcançou o valor de trinta e nove, posicionando-se na região em que a utilização de funções de superfície

apresenta boa adequação. Neste contexto, a malha mais grosseira apresentou uma faixa de valores mais afastada da região de transição, porém, não implicando necessariamente em melhor qualidade global da malha.

No primeiro caso intermediário, caso 18, com velocidade de 0,20m/s, o comportamento foi similar, com a malha mais grosseira se posicionando em uma faixa de 0,20 a até 31 e as outras malhas mais refinadas resultando na região de transição.

No segundo caso intermediário 19, com velocidade de 0,06m/s, o valor máximo de y^+ obtido com a malha mais grosseira foi de 19,20, posicionando-se na região de transição. Nas demais simulações, os valores máximos de y^+ situaram-se próximos de cinco, caracterizando o limite superior da subcamada viscosa, faixa na qual a resolução direta da camada pelo *solver* tende a produzir resultados consistentes. Neste contexto, destaca-se que ao diminuir a velocidade de 0,20m/s para 0,06m/s a malha mais grosseira passou a resultar concentração predominante de faixas de y^+ nas regiões de transição, enquanto as malhas mais refinadas mostraram um melhor desempenho ao se posicionar nas regiões caracterizadas como subcamada viscosa, sendo bem resolvidas por equações diretas na malha.

O mesmo ocorreu no caso 20 com condições mais desfavoráveis ao escoamento, onde o caso com malha mais grosseira resultou em um y^+ máximo de 14,58 na zona de transição e os demais casos resultaram em valores de y^+ próximos de três.

Portanto, do ponto de vista da análise de faixas do y^+ , a malha mais refinada com elementos de 0,6m se mostrou mais adequada para os cenários intermediário 19 com baixa velocidade (0,06m/s) e para o cenário com condições mais desfavoráveis (caso 20), ocasionando uma maior concentração de valores reduzidos de y^+ e dentro da região de subcamada viscosa.

Por fim, os casos 21–24, que utilizaram a abordagem LES, resultaram individualmente em condições distintas cada um.

Comparando o caso 21 (LES) com sua contraparte RANS (caso 17.1), observa-se que o caso 21 apresentou valor máximo de y^+ de 54,27, ultrapassando a faixa de trinta. Tal resultado indica afastamento da região de transição, contudo, não é possível afirmar que o resultado, isoladamente, ocasionou melhoria de qualidade da malha, sendo necessária análise complementar.

De modo semelhante, o caso 22 (LES), quando comparado à sua contraparte em RANS (caso 18.1), apresentou valores máximos de y^+ da ordem de 29, situando-

se ao final da região de transição e próximo à faixa de aplicação de funções de parede. Esse resultado indica um aumento no intervalo de y^+ deste caso comparando com os valores obtidos pela abordagem RANS, que apresentou uma faixa de valores entre 0,19 e 15.

Contudo, no comparativo entre os casos intermediários de baixa velocidade (0,06 m/s), casos 23 (LES) e 19.1 (RANS), observa-se que a abordagem LES resultou em uma maior amplitude de valores de y^+ , abrangendo a faixa de 0,05 a 5,7 e adentrando valores máximos na região de transição. Nesse caso específico, a abordagem RANS apresentou uma distribuição mais consistente, com valores entre 0,07 e 5,34, mais concentrados na região da subcamada viscosa.

Por fim, no comparativo direto entre os casos 20.2 (RANS) e 24 (LES), não se verificaram diferenças significativas quanto ao posicionamento da resolução em termos de y^+ , com ambos os casos situados predominantemente na região da subcamada viscosa. Esse comportamento está associado à baixa velocidade do escoamento (0,03 m/s), que tende a resultar em menores valores de y^+ (Ansys, 2023).

4.5 TAXA DE RENOVAÇÃO DE AR (ACH) – SEGUNDA ETAPA

Por meio da tabela 15, a seguir, é possível observar que a presença do gradeamento não impactou significativamente nos valores de ACH encontrados nesta etapa, resultando em valores semelhantes aos da primeira etapa para as mesmas condições de contorno. Destaca-se que as velocidades impostas no *inlet* foram obtidas diretamente a partir do ensaio experimental com CO₂, o qual ocorreu em situação que o gradeamento já estava presente, sendo medido a partir da fachada interna da Janela J2. Deste modo, o efeito da grade para este parâmetro já havia sido considerado na própria imposição das condições de contorno das simulações. Adicionalmente, as baixas velocidades empregadas neste estudo tenderam a reduzir a influência das perdas de carga locais impostas pelo gradeamento.

Tabela 15: Impacto do gradeamento nos valores de ACH obtidos.

Caso Nº	Gradeamento	Direção do Vento (°)	Velocidade do Vento (m/s)	Nº de renovações (h ⁻¹)	Net Results (kg/s)
17	Não	0	0,30	24,36	0,352937
10.1	Sim	0	0,30	24,36	0,352800
8.1	Não	35	0,20	13,33	0,193066
18	Sim	35	0,20	13,32	0,192888
5.1	Não	35	0,06	3,99	0,057804
19	Sim	35	0,06	3,99	0,057803
3.1	Não	60	0,03	1,22	0,017672
20	Sim	60	0,03	1,22	0,017642

Fonte: o próprio autor.

Com isso, o principal efeito do gradeamento neste estudo se torna o fluxo do escoamento interno, discutido a seguir no tópico 4.6.

Do mesmo modo, a utilização da abordagem LES, representada pelos casos 21 a 24, não apresentou variações significativas no parâmetro de ACH em relação às suas contrapartes em RANS (casos 17 a 20). Tal comportamento pode ser atribuído à relativa baixa complexidade da geometria e do escoamento analisado, indicando ausência de ganhos relevantes na estimativa desse parâmetro com o uso da abordagem LES.

4.6 ANÁLISE QUALITATIVA DO ESCOAMENTO INTERNO

O desempenho da ventilação não depende somente da ACH, mas também da distribuição do ar no espaço ocupado. A ventilação eficaz está relacionada à forma como o ar percorre o ambiente e atinge os ocupantes. Por isso é importante entender o caminho que o ar percorre, entendendo as zonas mal ventiladas e as regiões com ar estagnado. Segundo Sanberg (1981) a ACH é um indicador integrado, não espacial e pode mascarar problemas como concentração de contaminantes dentro do ambiente. O autor afirma que dois ambientes com mesmo ACH podem ter desempenho muito diferente. Por isso, a importância em se ter um olhar mais detalhado para a parte qualitativa da ventilação, tendo alto impacto no IAQ.

Como discutido na revisão bibliográfica, a abordagem LES apresenta maior capacidade de resolução de regiões turbulentas do escoamento, uma vez que prioriza a resolução de regiões maiores e de maior importância. Já a abordagem RANS se

fundamenta na decomposição do escoamento em componentes médias, ocasionando a resolução de equações de Navier–Stokes com maior homogeneidade em quantidades médias em todas as regiões do escoamento. Como consequência, as simulações LES tendem a apresentar com maior fidelidade o comportamento pontual do escoamento em comparação às simulações RANS.

Os casos abordados nesta análise são resumidos na tabela 16, a seguir.

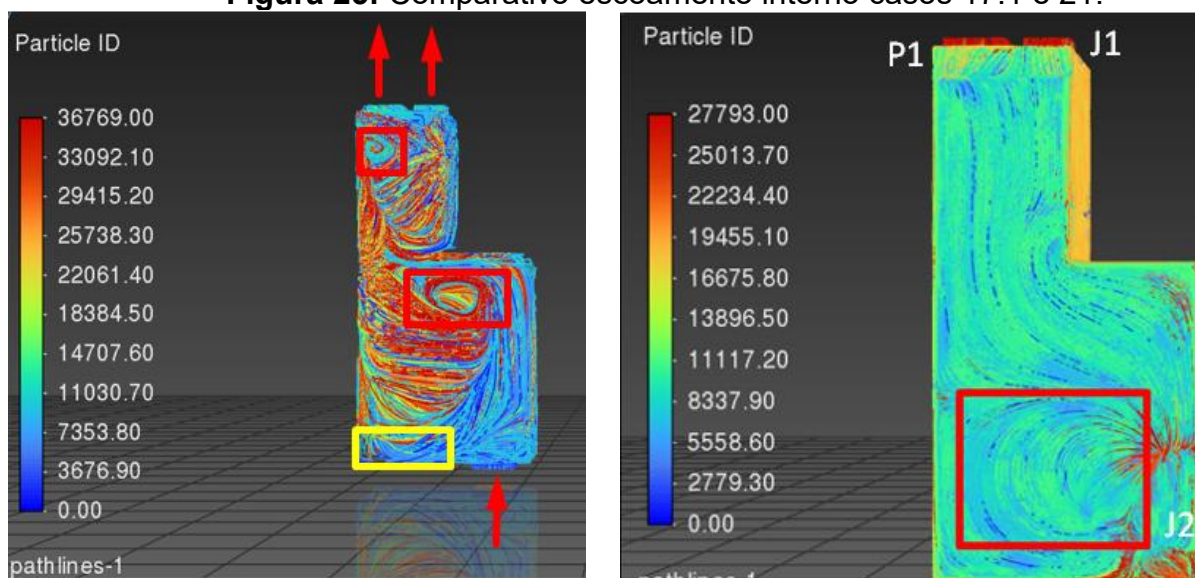
Tabela 16: Casos com fluxo de escoamento interno avaliados.

Caso Nº	Abordagem	Gradeamento	Direção do Vento (°)	Velocidade do Vento (m/s)	Nº de renovações (h ⁻¹)
17.1	RANS SST k- ω	Sim	0	0,30	24,36
21	LES	Sim	0	0,30	24,36
19.1	RANS SST k- ω	Sim	35	0,06	3,99
23	LES	Sim	35	0,06	3,99
20.1	RANS SST k- ω	Sim	60	0,03	1,22
24	LES	Sim	60	0,03	1,22

Fonte: o próprio autor.

Ao realizar o comparativo entre as abordagens para o caso estudado é observado as figuras em planta 25, 26 e 27, a seguir. O conjunto de figuras é analisado de forma qualitativa por meio de um gráfico da trajetória de partículas durante a simulação do fluxo do escoamento interno do ambiente. O sentido de escoamento é definido pelas setas vermelhas, representando a Janela J2 inferior como local de entrada do escoamento e as saídas P1 e J1, na face oposta do ambiente, como locais de saída do escoamento.

Figura 25: Comparativo escoamento interno casos 17.1 e 21.



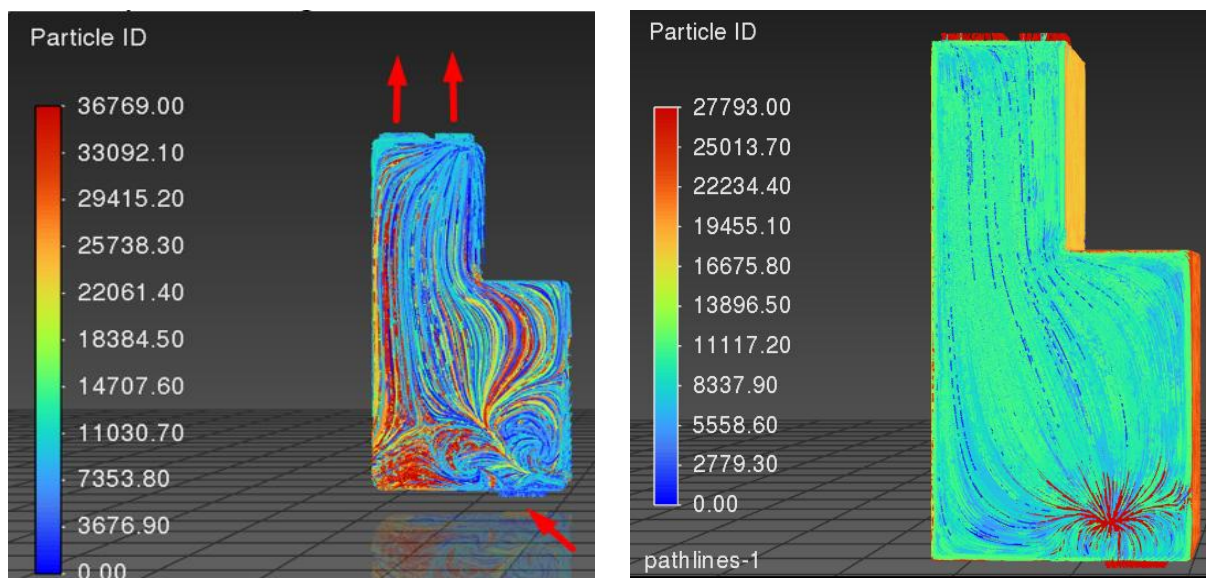
Fonte: o próprio autor.

A figura 25 compara o escoamento dos casos 21 em abordagem LES (figura à esquerda) com caso 17.1 em abordagem RANS (figura à direita). Nota-se que na imagem à direita é possível identificar apenas uma pequena região de zona de recirculação no centro do cômodo principal, indicada em destaque pela cor vermelha. Por outro lado, na imagem à esquerda, é possível identificar a presença de duas zonas de recirculações de forma clara, identificadas em destaque vermelho, sendo uma próxima a parede interna frontal à janela de entrada e a outra próxima à porta de saída. Comparando com a ilustração da direita, nota-se que a região da zona de recirculação indicada diverge significativamente. Além disso, a imagem proveniente da abordagem LES evidencia uma possível zona morta de ventilação, indicada em destaque amarelo, a qual não é identificada na sua contraparte advinda das simulações por RANS.

A figura 26 por sua vez, compara o escoamento dos casos 23 em abordagem LES (figura à esquerda) com sua contraparte em abordagem RANS, caso 19.1 (figura à direita). Novamente, é possível notar a diferença de riqueza de detalhes entre as duas abordagens, com a imagem à direita apontando homogeneidade do fluxo de entrada até a saída. Contudo, a imagem mais detalhada advinda da abordagem LES aponta diferentes correntes de fluxo interno. Nesta figura é possível notar que a região previamente identificada como zona morta na figura 25, passa a ocupar uma área de maior incidência de circulação de ar. Tal diferença está associada à mudança do

ângulo de incidência do vento, que neste caso é de 35° , conforme indicado pela seta em vermelho.

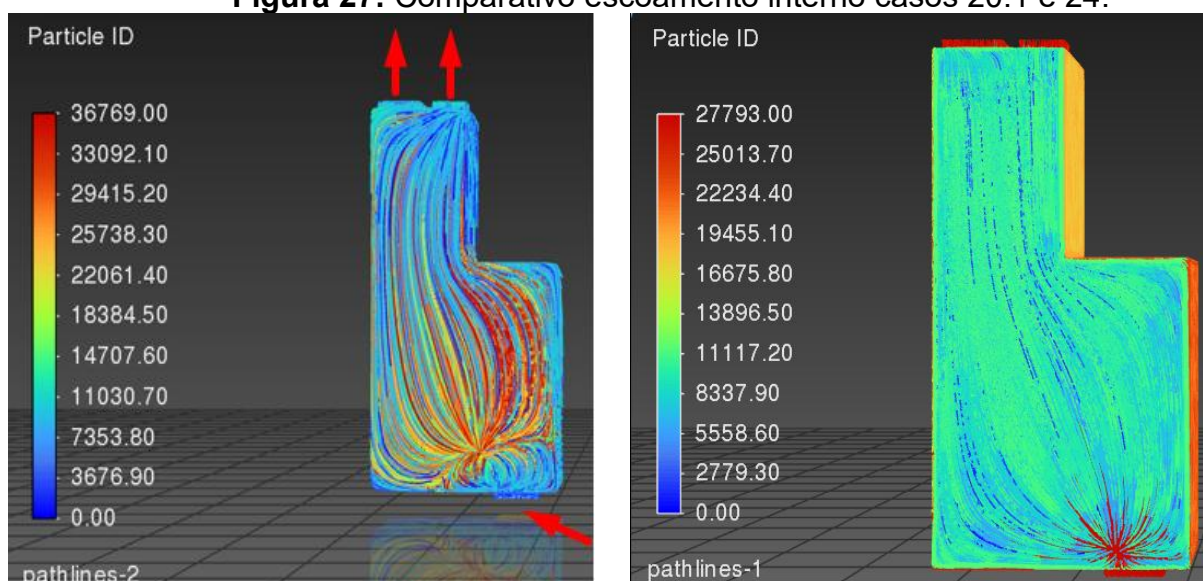
Figura 26: Comparativo escoamento interno casos 19.1 e 23.



Fonte: o próprio autor.

De modo semelhante, a figura 27, compara o escoamento dos casos 24 em abordagem LES (figura à esquerda) com sua contraparte em abordagem RANS, caso 20.1 (figura à direita). Ambos os casos desta figura representam as simulações com condições de contorno mais desfavoráveis ao escoamento e sugerem um escoamento mais uniforme ao longo do ambiente. Esse comportamento pode ser atribuído principalmente às condições de contorno adotadas, sendo elas a baixa velocidade de entrada do vento, que reduz a turbulência do escoamento e o ângulo de incidência do vento de 60° , que direciona o fluxo para as regiões oeste e norte do ambiente, coincidentes com as duas aberturas de saída, gerando um caminho predominante para o escoamento.

Figura 27: Comparativo escoamento interno casos 20.1 e 24.



Fonte: o próprio autor.

Com isso, por meio do comparativo das imagens 25, 26 e 27 é possível identificar a maior riqueza de detalhes na captura do comportamento do escoamento interno, sendo possível constatar o ganho da abordagem LES em relação a abordagem RANS na análise qualitativa desse parâmetro neste trabalho.

Em relação aos casos estudados, destaca-se que a dupla de casos com menor número de renovações (20.1 e 24) apresentou uma melhor distribuição de ventilação, sem zonas de estagnação aparentes e obteve uma melhor concordância na visualização do escoamento interno com ambas as abordagens. Este fato é coerente, sendo justificado pelo fato deste regime possuir uma menor velocidade empregada, direcionando de forma mais suavizada o percurso do escoamento em direção às aberturas de saída. Do outro lado, os casos com maior número de renovações (17.1 e 21) apresentaram uma maior heterogeneidade no escoamento, apresentando zonas de recirculação, gerando uma maior divergência qualitativa na representação gráfica do escoamento das abordagens RANS e LES. A maior complexidade envolvida nestes casos é associada ao uso de maiores velocidades empregadas, intensificando a interação do escoamento com a geometria interna das grades e superfícies, resultando em um regime com maior instabilidade. Neste contexto, o uso de abordagem LES na análise de fluxo interno em vez da RANS se justifica com maior veemência, ao passo que são empregados maiores valores de velocidade, associados a regimes mais turbulentos e de maior complexidade.

4.7 CUSTO COMPUTACIONAL – SEGUNDA ETAPA

Apesar de adotar tamanhos de elementos de malha mais grosseiros devido à limitação da versão estudantil na modelagem da geometria com grades, em termos de custo computacional, observou-se um aumento expressivo do número de iterações necessárias para a convergência dos critérios de parada na segunda etapa de simulações. Nos casos com abordagem RANS, a convergência foi alcançada com aproximadamente trinta iterações, enquanto nos casos com abordagem LES foram necessárias da ordem de cem iterações para alcançar convergência.

No que se refere ao tempo total de processamento, ambos os métodos apresentaram um aumento substancial. Os casos RANS passaram a requerer até cerca de uma hora de simulação, enquanto os casos LES demandaram tempos próximos de duas horas nos cenários mais complexos, representando, novamente, um aumento de aproximadamente 100% em relação à abordagem RANS. Tais números reforçam o maior custo computacional necessário para o uso da abordagem LES, devido a sua resolução das grandes escalas de camadas de turbulência do escoamento.

5. CONCLUSÕES

O presente estudo buscou calibrar um modelo CFD a partir de condições de contorno e resultados experimentais obtidos por meio de ensaio com gás traçador CO_2 . Utilizou-se o parâmetro de ACH como variável de comparação. Para isso, foram analisados diferentes cenários de velocidade e direção do vento, variações no tamanho e qualidade da malha, diferentes abordagens de turbulência (RANS e LES) e a presença do gradeamento, além de se avaliar qualitativamente o escoamento interno no ambiente estudado.

De maneira geral, os resultados de ACH obtidos nas simulações apresentaram compatibilidade em termos de ordem de grandeza com aqueles provenientes do ensaio experimental. No entanto, os resultados não foram uniformes entre os diferentes cenários analisados. A boa aderência observada para velocidades do vento mais elevadas contrasta com a elevada dispersão dos resultados em regimes de baixa velocidade, nos quais os desvios atingiram valores expressivos.

As simulações que empregaram maiores velocidades do vento, na faixa de 0,2 m/s e 0,3 m/s, apresentaram melhor concordância com os dados experimentais, alcançando variações de 0,7%, 1,8% e 5,2% nos melhores casos. Por outro lado, as simulações com menores velocidades do vento, de 0,03 m/s e 0,06 m/s, apresentaram elevada dispersão em relação aos resultados experimentais, com variações de até 67,7% e 80,3% em casos extremos. Destaca-se que em velocidades baixas, a sensibilidade das medições em campo é drasticamente impactada por eventos pontuais como rajadas de vento e ao manter os valores de velocidade constante nas simulações, este efeito foi desconsiderado. Consequentemente, os valores simulados de ACH tenderam a subestimar os resultados, indicando limitações com processo de calibração nessas condições.

É importante salientar ainda que a utilização de dados de estações meteorológicas, embora comum, mostrou-se potencialmente inadequada para representar o microclima local, enquanto medições *in loco*, apesar de mais representativas, ainda estão sujeitas a incertezas significativas devido a sua variabilidade. Utilizar as medições *in loco* em conjunto com verificações de estimativas usualmente adotadas, como pelo método CLA, parece promissor, conforme os resultados desta pesquisa.

A influência da direção do vento reforça a alta sensibilidade no desempenho

da ventilação natural às condições externas, com reduções expressivas nos valores de ACH para ângulos de entrada não ortogonais. Os resultados indicaram que a adoção de um ângulo de incidência de 60° promoveu uma redução aproximada de 50% no ACH quando comparada às simulações realizadas ângulo de incidência perpendicular (0°). De modo análogo, um ângulo de incidência de 35° ocasionou reduções no ACH da ordem de 15% a 20% em casos com incidência perpendicular.

Em relação às métricas de qualidade de malha utilizados, em ambas as etapas de simulações, se mostraram adequados para obter influência menor que 0,1% no parâmetro de ACH analisado, sendo suficientes para alcançar o teste de independência de malha. O uso de uma malha mais grosseira durante a segunda etapa com elementos de tamanho de 0,7m indicou que os tamanhos de malhas adotados na primeira etapa foram possivelmente superdimensionados, sugerindo potencial de otimização neste quesito em futuros estudos.

Em relação ao parâmetro y^+ , observou-se ampla variação entre os casos, abrangendo desde valores máximos de y^+ inferiores a 5, inseridos na região de resolução direta da subcamada viscosa, passando pela região de transição (5–30) e alcançando valores superiores a 30, situados na faixa em que a aplicação de funções de parede é mais adequada. Apesar dessa diversidade, os resultados obtidos sugerem que a variação de y^+ em conjunto com abordagem LES não comprometeu os resultados de ACH nos casos analisados, possivelmente devido às baixas velocidades e baixos níveis de turbulência aplicados neste estudo.

Em relação ao uso da abordagem RANS e LES, a abordagem LES não apresentou desempenho superior significativo em relação à RANS resultando em valores similares na análise do parâmetro de interesse deste estudo ACH. Entretanto, na análise qualitativa do fluxo do escoamento interno a abordagem LES se mostrou significativamente superior na captura de regiões de turbulência, zonas de recirculação e zonas de baixa ventilação. Nota-se que este tipo de análise é relevante para estudos com foco na qualidade de ar interno (IAQ) e conforto térmico, sendo o uso de LES justificado para esta finalidade.

A presença do gradeamento na modelagem não alterou significativamente os valores de ACH obtidos. Esse comportamento pode ser explicado pelo fato de que as condições de contorno de velocidade utilizadas no modelo CFD foram baseadas em medições realizadas *in loco* com a grade instalada, incorporando indiretamente seus efeitos ao escoamento imposto. Adicionalmente, o uso de baixas velocidades nas

simulações tende a minimizar o efeito de perda de carga local do gradeamento. Entretanto, o gradeamento influenciou diretamente o fluxo interno de escoamento, interagindo com a velocidade, ângulo de incidência e a geometria do ambiente, favorecendo a formação de zonas de recirculação e regiões de baixa ventilação. Assim, a modelagem do gradeamento se mostrou relevante para a análise do fluxo de ar interno. Isso evidencia que elementos arquitetônicos podem ter impacto relevante na distribuição do fluxo de ar, sem necessariamente alterar indicadores.

Quanto ao custo computacional, verificou-se aumento significativo no tempo total de simulação para os casos com LES, com acréscimos da ordem de até 100% em relação à abordagem RANS. Com isso, embora a abordagem LES não tenha apresentado impacto significativo quando o interesse se restringiu à análise de ACH, ela demonstrou valor técnico quando a avaliação teve como foco o fluxo interno de escoamento.

Assim considera-se que esta pesquisa contribui com o conhecimento acerca da simulação de ventilação natural com base em medição experimental não controlada, tema ainda pouco explorado no contexto de medições não controladas em HIS. Trata-se de um problema complexo, uma vez que tanto velocidade do vento quanto a sua direção são extremamente variáveis no tempo nesta situação. No contexto da experiência de calibração desta dissertação, sugere-se que os estudos posteriores deste tipo se dividam em velocidades altas, médias e baixa e variação de direção do vento para a verificação do ACH.

Destaca-se que este estudo apresenta limitações que restringem a generalização, como: elevado número de incertezas associadas tanto às condições de contorno do ensaio experimental quanto ao modelo numérico e número reduzido de monitoramento de medições *in loco*, associado ao número reduzido de ensaios experimentais. Diante disso, entende-se que o processo de calibração foi alcançado de forma parcial, apresentando potencial de aprimoramento mediante a obtenção de dados mais abrangentes e precisos para definições de condições de contorno em campo.

Por fim, recomenda-se para estudos futuros:

- Realização de um número expandido de medições *in loco* para verificação mais efetiva dos resultados obtidos nesta pesquisa, assim como monitoramentos de direção do vento;
- Utilização de versão não estudantil do pacote Ansys, de modo a verificar a

influência de maior refinamento de malha no modelo numérico;

- A partir desta modelagem realizar estudos paramétricos que contemplem o conceito de customização em massa com o intuito de auxiliar projetos de HIS a se adaptarem às condições locais, variando a posição das aberturas de acordo com a orientação do terreno, de modo a aprimorar soluções de projeto de HIS que hoje sofrem de padronização excessiva, incluindo orientação de aberturas;

- Uma vez calibrado o modelo por meio da análise do ACH, realizar o estudo da variável de idade média do ar no ambiente (Local Mean Age of Air – LMA) de forma a complementar o estudo qualitativo de fluxo de escoamento interno e contribuir para estudos de maior nível de aprofundamento de IAQ em ambientes de HIS.

REFERÊNCIAS

- ADELIKHAH, M. et al. Measurements and computational fluid dynamics investigation of the indoor radon distribution in a typical naturally ventilated room. **Scientific Reports**, v. 13, n. 1, fev. 2023.
- AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA. **Resolução-RE Nº 09, de 16 de janeiro de 2003.** Disponível em: https://antigo.anvisa.gov.br/documents/10181/2718376/RE_09_2003_.pdf/8cca9c91-1437-4695-8e3a-2a97deca4e10. Acesso em: 25 jan. 2025.
- AGÊNCIA UEL DE NOTÍCIAS. **Casa construída a seco é montada em três horas no CTU.** Acesso em maio de 2025, Disponível em: http://www.uel.br/com/agenciaueldenoticias/index.php?arq=ARQ_not&id=18072.
- AL-SALLAL, K. A.; AL-RAIS, L. Outdoor airflow analysis and potential for passive colling in the modern urban context of Dubai. **Renewable Energy**, v. 38, n. 1, p. 40-49, 2012.
- ALMEIDA, R. M. S. F, et al. Discussion Regarding the Measurement of Ventilation Rates Using Tracer Gas and Decay Technique. **Infrastructures**, v. 5, p. 85, 2020.
- ALMOHAMMADI, K. M. et al. Computational fluid dynamics (CFD) mesh independency techniques for a straight blade vertical axis wind turbine. **Energy**, v. 58, p. 483-493, 2013.
- ANDERSON JR, J. D. Fundamentals of Aerodynamics. 5. ed. **New York: McGraw-Hill**, 2011.
- ANDRADE, N. C. Estudo da ventilação natural em edificações com captadores de vento multidirecionais por meio de ensaios em túnel de vento e simulações computacionais. Tese (Doutorado em Engenharia civil) - Unicamp, 2013.
- ANSYS Inc. ANSYS Fluent Theory Guide. Release 2023 R2. Canonsburg, **PA: Ansys Inc.**, 2023.
- ASFOUR, O. S. Prediction of wind environment in different grouping patterns of housing blocks. **Energy and Building**. v. 42, n. 11, p. 2061-2069, 2010.
- ASHRAE. **Ventilation and indoor air quality in low-rise residential buildings**, Ashrae Standards, Atlanta, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-4: Edificações habitacionais – desempenho Parte 4: Requisitos para os sistemas de vedações internas e externas**, Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-3: Desempenho térmico de edificações Parte 3: Zoneamento bioclimático por desempenho**, Rio de Janeiro, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16401-3: Instalações de condicionamento de ar – Sistemas centrais e unitários – Parte 3: Qualidade do ar interior**, Rio de Janeiro, 2024.

BATISTA, J.; LAMBERTS, R.; WESTPHAL, F. S. Avaliação de desempenho térmico de componentes construtivos utilizando o EnergyPlus. **ENCAC-ELACAC**, v. 10, 2005.

BERGER, M.; CRISTIE, V. CFD post-processing in Unity3D. **Procedia Computer Science**, v. 51, p. 2913-2922, 2015.

BIROUN, M. H.; MAZZEI, L. Unchannelized granular flows: Effect of initial granular column geometry on fluid dynamics. **Chemical Engineering Science**, v. 292, 2024.

BITTENCOURT, L. S.; CÂNDIDO, C. Introdução à ventilação natural. **EDUFAL**, ed. 3, p. 173, 2008.

BLOCKEN, B. Computational Fluid Dynamics for urban physics: Importance, scales, possibilities, limitations and ten tips and tricks towards accurate and reliable simulations. **Building and Environment**, v. 91, p. 219–245, 2015.

BLOCKEN, B. et al. CFD simulation of the atmospheric boundary layer: wall function problems. **Atmospheric environment**, v. 41, n. 2, p. 238-252, 2007.

BORNEHAG, C. G. et al. Association between ventilation rates in 390 Swedish homes and allergic symptoms in children, **Indoor Air**, v. 15, p. 275–280, 2005.

BU. Z. S. K., Wind-induced ventilation performances and airflow characteristics in an areaway-attached basement with a single-sided opening, **Building and Environment**. v. 46. p. 911-921, 2011.

CARDOSO, V. E. M. et al. The Impacts of Air Leakage Paths and Airtightness Levels on Air Change Rates. **Buildings**, v. 10, n. 3, mar. 2020.

CARVALHO, T. A. M.; LABAKI, L. C. AA ventilação natural em edifícios com elementos côncavos (hec): Uma revisão. **Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**. v. 20, p. 1-11, 2024.

- CAMPANHONI, A. Implantação dos edifícios Águas Claras – DF: Influência no desempenho térmico ambiental dos espaços abertos. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília. Brasília, 2011.
- CÂNDIDO, C. et al. Natural ventilation and thermal comfort: air movement acceptability inside naturally ventilated buildings in Brazilian hot humid zone. **Air Conditioning and the Low Carbon Cooling Challenge, Cumberland Lodge, Windsor, London**, p. 27-29, 2008.
- CHRISTMANN, L. L, et al. Dimensionamento e avaliação do potencial de arrefecimento de edificação de ensino através de ventilação por efeito chaminé em Santa Maria-RS. 158 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.
- CHO, M. L. et al. Analysis of Flow Characteristics of Window in Combination-Type Ventilation System Using CFD. **Fluids**, v. 8, 2023.
- CHU, C. R. et al. Turbulence effects on the discharge coefficient and mean flow rate of wind-driven cross-ventilation. **Building and Environment**. V. 44, n. 10, p. 2064-2072, 2009.
- CLAUDE, A. R.; FORADINI, F. Simple and cheap air change rate measurement using CO₂ concentration decays. **International Journal of Ventilation**, v. 1, n. 1, p. 39-44, 2002.
- CÓSTOLA, D. Ventilação por ação do vento no edifício: procedimentos para quantificação. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, 2006.
- CUI, S. et al. CO₂ tracer gas concentration decay method for measuring air change rate. **Building and Environment**, v. 84, p. 162-169, 2015.
- CUSTÓDIO, M. I. P. et al. Avaliação da taxa de obstrução do modelo físico reduzido na área de ensaio na mesa d'água. **Ambiente Construído**, v. 23, n. 4, p. 105–120, 2023.
- DAVIDSON, P. A. Turbulence: An Introduction for Scientists and Engineers. **Oxford University Press**. v. 2. 2015.
- DECKER, P.H. B. et al. Medição da taxa de ventilação em uma HIS utilizando o método do gás traçador. **XVII Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído**. 2023.
- DECKER, P. H. B. Medida da taxa de ventilação natural em salas de aula: Aplicação do método de gás traçador com CO₂. 240 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual de Londrina, 2023.

DORIA, G.P. et al. Potencial de Aproveitamento Da Ventilação Natural Na Classificação de Eficiência Energética de uma Edificação De Escritórios: Aplicação Da Ferramenta *Natural Comfort*. Encontro Nacional De Conforto No Ambiente Construído, 16, 1429-1438. 2021.

DUARTE JUNIOR, P. C. Proposta de planejamento cirúrgico de FONTAN baseado em estudos numéricos e hemodinâmicos tridimensionais. 318f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Londrina, 2023.

ELSHIMI, M. et al. A novel transparent cabin used in the classroom during the coronavirus pandemic: a CFD analysis. **Journal of Engineering and Applied Science**, v. 71, n. 1, 2024.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). **EN 1991-1-4: Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-4: General actions – Wind actions**. Brussels, 2005.

FATCHURROHMAN, N.; CHIA, S. T. Performance of hybrid nano-micro reinforced mg metal matrix composites brake calliper: simulation approach. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, 2017.

FERNANDES, L. et al. Evaluación de los coeficientes de descarga de grandes ventanas que se pueden abrir utilizando muestras a escala real en ensayos en túneles de viento. **Revista Ingeniería de Construcción**, [S.L.], v. 35, n. 2, p. 203-214, 2020.

FERZIGER, J. H.; PERIĆ, M.; STREET, R. L. Computational methods for fluid dynamics. **Springer**, 2019.

FEW, J.; ELWELL, C. Measuring the ventilation rate in occupied buildings and adapting the CO₂ tracer gas technique. 2019.

FLETCHER, R. Practical methods of optimization. **John Wiley & Sons**, 2000.

FLOURENTZOU, F. et al. Natural ventilation for passive cooling: measurement of discharge coefficients. **Energy and Buildings**, v. 27, n. 3, p. 283-292, 1998.

GAN, G. Simulation of buoyancy-induced flow in open cavities for natural ventilation. **Energy and Buildings**, v. 38, n. 5, p. 410-420, 2006.

GILES, M. B. M. B. et al. Adjoint equations in CFD-Duality, boundary conditions and solution behaviour. In: **13th Computational Fluid Dynamics Conference**. p.1850, 1997.

GUO, B.; DING, S. Landau-Lifshitz Equations. **World Scientific**, 2008.

- HAJDUKIEWICZ, M. et al. A narrative review to credible computational fluid dynamics models of naturally ventilated built environments. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 198, p. 114404, 2024.
- HAJDUKIEWICZ, M. et al. Formal calibration methodology for CFD models of naturally ventilated indoor environments. **Building and Environment**, v. 59, p. 290-302, 2013.
- HASSAN, A. M. et al. Urban morphology as a passive strategy in promoting outdoor air quality. **Journal of Building Engineering**, v. 29, 2020.
- HE, Y. et al. Experimental and CFD study of ventilation performance enhanced by roof window and mechanical ventilation system with different design strategies. **Building and Environment**, v. 224, 2022.
- HEISELBERG, P.; SANDBERG, M. Evaluation of discharge coefficients for window openings in wind driven natural ventilation. **International Journal of Ventilation**, v. 5, n. 1, p. 43-52, 2006.
- HOLMES, J. D. Wind loading of structures. **CRC press**, 2007.
- HOOFF, T. et al. On the accuracy of CFD simulations of cross-ventilation flows for a generic isolated building: Comparison of RANS, LES and experiments. **Building Environment**, v. 115, p. 148-165, 2017.
- HOU, D.; WANG, L. L. Bayesian calibration of using CO2 sensors to assess ventilation conditions and associated COVID-19 airborne aerosol transmission risk in schools. **MedRxiv Preprint**, p. 1-42, fev. 2021.
- HWANG, Y.; GORLÉ, C. Large-eddy simulations to define building-specific similarity relationships for natural ventilation flow rates. **Flow**, v. 3, p. E10, 2023.
- JASAK, H. OpenFOAM: Open source CFD in research and industry. **International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering**, v. 1, n. 2, p. 89-94, 2009.
- JIANG, Y, et al. Validation of CFD simulations for natural ventilation. **International journal of ventilation**, v. 2, n. 4, p. 359-369, 2004.
- JIANG, Z. et al. Analysis of single-sided ventilation flows of a generic isolated building using particle tracking method in LES simulation. **Building Environment**, v. 235, 2023.
- JIAO, Z, et al. Optimization of dilution ventilation layout design in confined environments using Computational Fluid Dynamics (CFD). **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 60, p. 195-202, 2019.

- JONES, B. et al. A review of ventilation opening area terminology. **Energy and Buildings**, v. 118, p. 249-258, 2016.
- JONES, N. R. et al. Two metres or one: what is the evidence for physical distancing in COVID-19? **British Medical Journal**, v. 3223, n. 370, p. 1-6, 2020.
- LIU, S.; DENG, Z. Transmission and Infection Risk of COVID-19 When People Coughing in an Elevator. **Building Environment**. v. 21, 2023.
- LIU, X. et al. Effectiveness of natural ventilation through single-sided window opening in air-conditioning rooms. **Energy and Buildings**, v. 314, 2024.
- KATZ, A.; SANKARAN, V. Mesh quality effects on the accuracy of CFD solutions on unstructured meshes. **Journal of Computational Physics**, v. 230, n. 20, p. 7670-7686, 2011.
- KARIMIMOSHAVER, M. et al. The effect of geometry and location of balconies on single-sided natural ventilation in high-rise buildings. **Energy Reports**, v. 10, p. 2174 – 2193, 2023.
- KUMAR, N. et al. CFD simulations of wind-induced ventilation in apartment buildings with vertical voids: Effects of pilots and wind fin on ventilation performance. **Building and Environment**, v. 194, 2021.
- KUSUTOVA, K., et al. Cross-ventilation in a generic isolated Building equipped with louvers: wind-tunnel experiments and CFD simulations. **Building Environment**, v. 154, p. 263-280, 2019.
- LAMBERTS, R. et al. Eficiência energética na arquitetura. 3. ed. Rio de Janeiro: **Eletrobras PROCEL**, 2013.
- LAMBERTS, R.; PEREIRA, F. O. R. Eficiência energética na arquitetura. **ELETROBRAS/PROCEL**. Rio de Janeiro, 2014.
- LANÇA, M. et al. Numerical simulation of a night cooling strategy in an office room. **Energy and Buildings**, v. 252, 2021.
- LARSEN, T. S.; HEISELBERG, P. Single-sided natural ventilation driven by wind pressure and temperature difference. **Energy and Buildings**, v. 40, n. 6, p. 1031-1040, 2008.
- LIU, J. et al. A review of CFD analysis methods for personalized ventilation (PV) in indoor built environments. **Sustainability**, v. 11, n. 15, p. 4166, 2019.

- LIU, T.; LEE, W. L. Evaluating the influence of transom window designs on natural ventilation in high-rise residential buildings in Hong Kong. **Sustainable Cities and Society**, v. 62, 2020.
- LIU, X. et al. Effectiveness of natural ventilation through single-sided window opening in air-conditioning rooms. **Energy and Buildings**, v. 314, 2024.
- LOCHE, Í. et al. Otimização do desempenho térmico de habitações autoconstruídas com o uso da gramática da forma. **Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído**, v. 16, p. 1086-1095, 2026.
- LOURA, R. M.; DE CASTRO, M. N.; CARVALHO, C. Comparação entre três ferramentas de estimativa de fluxo de ar com dados medidos no edifício do CPEI. **ENCAC, VII, Maceió**, 2005.
- MALMIR, R. A CFD study on the correlation between the skew angle and blade number of hydrodynamic performance of a submarine propeller. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 41, n. 8, p. 321, 2019.
- MARSHALL, D.; RUFFIN, S. An embedded boundary Cartesian grid scheme for viscous flows using a new viscous wall boundary condition treatment. In: **42nd AIAA Aerospace Science Meeting and Exhibit**. p. 581, 2004.
- 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.
- MORAIS, J. M. S. C. Ventilação natural em edifícios multifamiliares do "Programa Minha Casa Minha Vida". Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Estadual de Campinas, 2013.
- MUELAS, Á. et al. Analysis of Different Ventilation Strategies and CO₂ Distribution in a Naturally Ventilated Classroom. **Atmospheric Environment**. v. 283, 2022.
- MUNSON, B. et al. Fundamentals of Fluid Mechanics. 7. ed. **Hoboken: Wiley**, 2013.
- NUNES, G. et al. Análise do desempenho termo energético de edificações residenciais em cross-laminated timber (CLT) no clima de Mato Grosso. **Anais do Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**. Porto Alegre, 2020.
- OBERKAMPF, W. L.; TRUCANO, T. G. Verification and validation in computational fluid dynamics. **Progress in Aerospace Sciences**, v. 38, n. 3, p. 209-272, 2002.

ORGANIZAÇÃO PAN-AMERICANA DA SAÚDE. **Roteiro para melhorar e garantir a boa ventilação de ambientes fechados no contexto da doença causada pelo novo coronavírus, COVID-19.** Brasília, 2021. Disponível em: <https://iris.paho.org/handle/10665.2/53938>. Acesso em: 22 jan. 2025.

OSTOLA, D. et al. Critical analysis of the performance of CFD simulations of single-sided natural ventilation. **Energy and Buildings**, v. 41, n. 5, p. 550–561, 2009.

PARK, S. et al. A Study of the Plan and Performance Evaluation Method of an 8-m³ Chamber Using Ventilation Experiments and Numerical Analyses. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, 2022.

PERSILY, A. K. Field measurement of ventilation rates. **Indoor Air**, v. 26, n. 1, p. 97–111, 2016.

PORTARAPILLO, M.; SIMIOLI, S.; DI BENEDETTO, A. Prevention and Control of the Spread of Pathogens in a University of Naples Engineering Classroom through CFD Simulations. **Chemengineering**, v. 8, n. 2, abr. 2024.

PPGECiv, DCCI/UEL. **Laboratório de Eficiência Energética e Sustentabilidade nas Edificações (E3sLab).** Acesso em maio de 2025. Disponível em: https://www.uel.br/pos/enges/?page_id=192.

PRAKASH, D. Ventilation performance analysis on low-rise courtyard building for various courtyard shape factors and roof topology. **International Journal of Ventilation**, v. 22, n. 1, p. 56 – 76, 2023.

RAMPONI, R.; BLOCKEN, B. CFD simulation of cross-ventilation for a generic isolated building: Impact of computational parameters. **Building and Environment**, v. 53, p. 34-48, 2012.

RIBEIRO, R. M.; ALMEIDA, F. S. Qualitative and comparative assessment of natural ventilation flow patterns through the use of physical models in a Water Table and CFD simulations. **Revista Transverso**, v. 1, n. 15, 2024

ROCHA, L. A. et al. Natural ventilation in low-cost housing: an evaluation by CFD. **Buildings**, v. 13, n. 6, p. 1408, 2023.

RODRIGUES, L. S. Ventilação natural induzida pela ação combinada do vento e da temperatura em edificações. 2008. 71 f. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Civil) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2008.

SAHA, C. K. et al. Opening Size Effects on Airflow Pattern and Airflow Rate of a Naturally Ventilated Dairy Building-A CFD Study. **Applied Sciences-Basel**, v. 10, n. 17, set. 2020.

- SAHA, C. K. et al. Uncertainty in calculating air exchange rate of naturally ventilated dairy building based on point concentrations. **Environmental**. v. 13. p 2349 – 2355, 2014.
- SAKIYAMA, N. R. M. et al. Perspectives of naturally ventilated buildings: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 130, 2020.
- SANDBERG, M. What is ventilation efficiency? **Building and Environment, Oxford**, v. 16, n. 2, p. 123–135, 1981.
- SARGENT, R. G. Verification and validation of simulation models. **Journal of Simulation**. v. 7, n. 1, p.12-24, 2013.
- SCHERER, P.; GRIGOLETTI, G. de C. Avaliação de estratégias de ventilação natural para salas de aula em clima subtropical úmido. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 23, n. 1, p. 23-57, 2023.
- SCHERER, P.; MASUTTI, M. C. A eficiência da ventilação cruzada na arquitetura. GUILHERME, WD **A Produção do Conhecimento nas Ciências Aplicadas**, v. 5, p. 1-4, 2019.
- SEENI, A. et al. Errors and uncertainties in simulation of steady, viscous flow past a circular cylinder at $Re = 20$ using a systematic approach. **Incas Bulletin**, v. 12, n. 3, p. 203-217, 2020.
- SHA, H.; QI, D. A Review of High-Rise Ventilation for Energy Efficiency and Safety. **Sustainable Cities and Society**, v. 54, 2020.
- SILVA, A. N. et al. Análise da ventilação natural em um CIAC: ensaios na mesa d'água e simulações CFD. **PARC: Pesquisa em Arquitetura e Construção**, v. 16, 2025.
- SMANIOTTO JUNIOR, G. Estratégias bioclimáticas para habitação de interesse social: análise do desempenho térmico e da viabilidade econômica para zona bioclimática 3. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2023.
- TABATCHEIK, A. S. Habitação de interesse social: condições de desempenho térmico em conjuntos do Programa Minha Casa Minha Vida no município de São José dos Pinhais (PR). Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2021. Acervo Digital UFPR, 2021.
- TEPPNER, R. et al. Air change rates driven by the flow around and through a building storey with fully open or tilted windows: An experimental and numerical study. **Energy and buildings**, v. 80, p. 570-583, 2014.

- TIKUL, N. et al. Improving indoor air quality in primary school buildings through optimized apertures and classroom furniture layouts. **Journal of Building Engineering**, v. 62, 2022.
- TOMINAGA, Y. et al. AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 96, n. 10-11, p. 1749–1761, 2008.
- VATAVUK, E. V.; VILAS BOAS E. P. Técnicas de validação de modelos computacionais. II **Congresso Brasileiro de Fluidodinâmica Computacional**, Rio de Janeiro, 2018.
- VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method. 2. ed. **Harlow: Pearson Education**, 2007.
- WEI, Y. et al. Natural ventilation potential model considering solution multiplicity, window opening percentage, air velocity and humidity in China. **Building and Environment**, v. 45, n. 2, p. 338-344, 2010.
- WILCOX, D. C. Reassessment of the scale-determining equation for advanced turbulence models. **AIAA journal**, v. 26, n. 11, p. 1299-1310, 1988.
- WILCOX, D. C. Turbulence Modeling for CFD (3 ed.). **DCW Industries, Inc**, 2006.
- YAKHOT, V. et al. Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique. **Physics of Fluids A: Fluid Dynamics**, v. 4, n. 7, p. 1510-1520, 1992.
- YANG, L. et al. CFD simulation research on residential indoor air quality. **Science of the Total Environment**, v. 472, p. 1137-1144, 2014.
- Yi, Q. et al. Investigation of discharge coefficient for wind-driven naturally ventilated dairy barns. **Energy and Buildings**, v. 165, p. 132-140, 2018.
- ZAWAWI, Mohd Hafiz. et al. A review: Fundamentals of computational fluid dynamics (CFD). In: **AIP conference proceedings**. AIP Publishing, 2018.
- ZHANG, K. et al. Numerical evaluations of urban design techniques to reduce vehicular personal intake fraction in deep street canyons. **Science Total**. v. 653, p. 968-994, 2019.
- ZHANG, X. et al. CFD simulation of natural ventilation of a generic building in various incident wind directions: Comparison of turbulence modelling, evaluation methods, and ventilation mechanisms. **Energy and Buildings**, v. 229, 2020.

ZHONG, H. et al. CFD simulation of 'pumping' flow mechanism of an urban building affected by an upstream building in high Reynolds flows." **Energy and Buildings**, v.202, 2020.

**APÊNDICE A -
RESULTADOS PRIMEIRA ETAPA**

Caso Nº	Abordagem	Grades	Direção do Vento (°)	Velocidade do Vento (m/s)	Tamanho da Malha (m)	Nº de renovações (h ⁻¹)	Net Results (kg/s)	Nº de nós (nodes)	Nº Elementos	Métricas de malha				Y ⁺
										Skewness ~0º (melhor)		Orthogonal Quality ~1 (melhor)		
										Médio	Máximo (pior)	Médio	Mínimo (pior)	
1	RANS SST k- _ω	Não	0	0,03	0,10	2,44	0,035282	65583	203920	0,24652	0,99422	0,75198	5,78E-03	-
1.1	RANS SST k- _ω	Não	0	0,03	0,08	2,44	0,035294	106526	343578	0,23466	0,89990	0,76388	1,00E-01	-
1.2	RANS SST k- _ω	Não	0	0,03	0,06	2,44	0,035310	204283	683667	0,22661	0,96495	0,77199	3,51E-02	-
2	RANS SST k- _ω	Não	35	0,03	0,10	2,00	0,028901	65583	203920	0,24652	0,99422	0,75198	5,78E-03	-
2.1	RANS SST k- _ω	Não	35	0,03	0,08	2,00	0,028902	106526	343578	0,23466	0,89990	0,76388	1,00E-01	-
2.2	RANS SST k- _ω	Não	35	0,03	0,06	2,00	0,028909	204283	683667	0,22661	0,96495	0,77199	3,51E-02	-
3	RANS SST k- _ω	Não	60	0,03	0,10	1,22	0,017677	65583	203920	0,24652	0,99422	0,75198	5,78E-03	-
3.1	RANS SST k-_ω	Não	60	0,03	0,08	1,22	0,017672	106526	343578	0,23466	0,89990	0,76388	1,00E-01	0,015-5,6
3.2	RANS SST k- _ω	Não	60	0,03	0,06	1,22	0,017673	204283	683667	0,22661	0,96495	0,77199	3,51E-02	-
4	RANS SST k- _ω	Não	0	0,06	0,10	4,87	0,070560	65583	203920	0,24652	0,99422	0,75198	5,78E-03	-

4.1	RANS SST k- ω	Não	0	0,06	0,08	4,87	0,070587	106526	343578	0,23466	0,89990	0,76388	1,00E-01	-
4.2	RANS SST k- ω	Não	0	0,06	0,06	4,88	0,070520	204283	683667	0,22661	0,96495	0,77199	3,51E-02	-
5	RANS SST k- ω	Não	35	0,06	0,10	3,99	0,057803	65583	203920	0,24652	0,99422	0,75198	5,78E-03	-
5.1	RANS SST k-ω	Não	35	0,06	0,08	3,99	0,057804	106526	343578	0,23466	0,89990	0,76388	1,00E-01	0,036-9,10
5.2	RANS SST k- ω	Não	35	0,06	0,06	3,99	0,057818	204283	683667	0,22661	0,96495	0,77199	3,51E-02	-
6	RANS SST k- ω	Não	60	0,06	0,10	2,44	0,035288	65583	203920	0,24652	0,99422	0,75198	5,78E-03	-
6.1	RANS SST k- ω	Não	60	0,06	0,08	2,44	0,035345	106526	343578	0,23466	0,89990	0,76388	1,00E-01	-
6.2	RANS SST k- ω	Não	60	0,06	0,06	2,44	0,035346	204283	683667	0,22661	0,96495	0,77199	3,51E-02	-
7	RANS SST k- ω	Não	0	0,20	0,10	16,27	0,235683	65583	203920	0,24652	0,99422	0,75198	5,78E-03	-
7.1	RANS SST k- ω	Não	0	0,20	0,08	16,28	0,235762	106526	343578	0,23466	0,89990	0,76388	1,00E-01	-
7.2	RANS SST k- ω	Não	0	0,20	0,06	16,28	0,235871	204283	683667	0,22661	0,96495	0,77199	3,51E-02	-
8	RANS SST k- ω	Não	35	0,20	0,10	13,33	0,193061	65583	203920	0,24652	0,99422	0,75198	5,78E-03	-
8.1	RANS SST k-ω	Não	35	0,20	0,08	13,33	0,193066	106526	343578	0,23466	0,89990	0,76388	1,00E-01	0,088-27
8.2	RANS SST k- ω	Não	35	0,20	0,06	13,33	0,193112	204283	683667	0,22661	0,96495	0,77199	3,51E-02	-
9	RANS SST k- ω	Não	60	0,20	0,10	8,15	0,118082	65583	203920	0,24652	0,99422	0,75198	5,78E-03	-
9.1	RANS SST k- ω	Não	60	0,20	0,08	8,15	0,118051	106526	343578	0,23466	0,89990	0,76388	1,00E-01	-

9.2	RANS SST k- ω	Não	60	0,20	0,06	8,15	0,118055	204283	683667	0,22661	0,96495	0,77199	3,51E-02	-
10	RANS SST k- ω	Não	0	0,30	0,10	24,36	0,352800	65583	203920	0,24652	0,99422	0,75198	5,78E-03	-
10.1	RANS SST k-ω	Não	0	0,30	0,08	24,36	0,352937	106526	343578	0,23466	0,89990	0,76388	1,00E-01	0,12-30,27
10.2	RANS SST k- ω	Não	0	0,30	0,06	24,38	0,352101	204283	683667	0,22661	0,96495	0,77199	3,51E-02	-
11	RANS SST k- ω	Não	35	0,30	0,10	19,95	0,289014	65583	203920	0,24652	0,99422	0,75198	5,78E-03	-
11.1	RANS SST k- ω	Não	35	0,30	0,08	19,95	0,289021	106526	343578	0,23466	0,89990	0,76388	1,00E-01	-
11.2	RANS SST k- ω	Não	35	0,30	0,06	19,95	0,289090	204283	683667	0,22661	0,96495	0,77199	3,51E-02	-
12	RANS SST k- ω	Não	60	0,30	0,10	12,20	0,176770	65583	203920	0,24652	0,99422	0,75198	5,78E-03	-
12.1	RANS SST k- ω	Não	60	0,30	0,08	12,20	0,176723	106526	343578	0,23466	0,89990	0,76388	1,00E-01	-
12.2	RANS SST k- ω	Não	60	0,30	0,06	12,20	0,176729	204283	683667	0,22661	0,96495	0,77199	3,51E-02	-
13	LES	Não	60	0,03	0,08	1,22	0,017638	106526	343578	0,23466	0,8999	0,76388	1,00E-01	0,06-5,1
14	LES	Não	35	0,20	0,08	13,33	0,193066	106526	343578	0,23466	0,8999	0,76388	1,00E-01	0,11-9,2
15	LES	Não	35	0,06	0,08	3,99	0,057803	106526	343578	0,23466	0,8999	0,76388	1,00E-01	0,35-30
16	LES	Não	0	0,3	0,08	24,35	0,352752	106526	343578	0,23466	0,8999	0,76388	1,00E-01	0,27-37,06

APÊNDICE B – RESULTADOS SEGUNDA ETAPA

Caso Nº	Abordagem	Grades	Direção do Vento (°)	Velocidade do Vento (m/s)	Tamanho da Malha (m)	Nº de renovações (h ⁻¹)	Net Results (kg/s)	Nº de nós (nodes)	Nº Elementos	Métricas de malha				Y ⁺
										Skewness ~0º (melhor)		Orthogonal Quality ~1 (melhor)		
										Médio	Máximo (pior)	Médio	Mínimo (pior)	
17	RANS SST k- ω	Sim	0	0,3	0,8	24,36	0,352800	119929	566402	0,24671	0,99972	0,75213	2,78E- 04	0,29-39
17.1	RANS SST k- ω	Sim	0	0,3	0,7	24,36	0,352800	142465	684217	0,24477	0,96973	0,75403	3,03E- 02	0,18-16,85
17.2	RANS SST k- ω	Sim	0	0,3	0,6	24,36	0,352801	197993	985735	0,2364	0,96980	0,76238	3,02E- 02	0,23-15,43
18	RANS SST k- ω	Sim	35	0,2	0,8	13,32	0,192888	119929	566402	0,24671	0,99972	0,75213	2,78E- 04	0,20-31,1
18.1	RANS SST k- ω	Sim	35	0,2	0,7	13,32	0,192892	142465	684217	0,24477	0,96973	0,75403	3,03E- 02	0,19-15
18.2	RANS SST k- ω	Sim	35	0,2	0,6	13,32	0,192939	197993	985735	0,2364	0,96980	0,76238	3,02E- 02	0,19-14,9
19	RANS SST k- ω	Sim	35	0,06	0,8	3,99	0,057803	119929	566402	0,24671	0,99972	0,75213	2,78E- 04	0,07-19,20
19.1	RANS SST k- ω	Sim	35	0,06	0,7	3,99	0,057800	142465	684217	0,24477	0,96973	0,75403	3,03E- 02	0,07-5,34
19.2	RANS SST k- ω	Sim	35	0,06	0,6	3,99	0,057803	197993	985735	0,2364	0,96980	0,76238	3,02E- 02	0,06-5,13
20	RANS SST k- ω	Sim	60	0,03	0,8	1,22	0,017642	119929	566402	0,24671	0,99972	0,75213	2,78E- 04	0,04-14,58
20.1	RANS SST k- ω	Sim	60	0,03	0,7	1,22	0,017640	142465	684217	0,24477	0,96973	0,75403	3,03E- 02	0,03-2,90
20.2	RANS SST k- ω	Sim	60	0,03	0,6	1,22	0,017640	197993	985735	0,2364	0,96980	0,76238	3,02E- 02	0,03-2,82

21	LES	Sim	0	0,3	0,7	24,36	0,352800	142465	684217	0,24477	0,96973	0,75403	3,03E-02	0,50-54,57
22	LES	Sim	35	0,2	0,7	13,32	0,192892	142465	684217	0,24477	0,96973	0,75403	3,03E-02	0,42-29
23	LES	Sim	35	0,06	0,7	3,99	0,057800	142465	684217	0,24477	0,96973	0,75403	3,03E-02	0,05-8,57
24	LES	Sim	60	0,03	0,7	1,22	0,017640	142465	684217	0,24477	0,96973	0,75403	3,03E-02	0,03-2,60