

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA - UDESC
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

MARIANA MOCCELLIN DE FARIAS

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DA VENTILAÇÃO NATURAL EM UMA
HABITAÇÃO DE INTERESSE SOCIAL COMO ESTRATÉGIA DE RESFRIAMENTO
PARA CLIMAS TROPICAIS E SUBTROPICAIS**

**JOINVILLE
2025**

MARIANA MOCCELLIN DE FARIAS

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DA VENTILAÇÃO NATURAL EM UMA
HABITAÇÃO DE INTERESSE SOCIAL COMO ESTRATÉGIA DE RESFRIAMENTO
PARA CLIMAS TROPICAIS E SUBTROPICAIS**

Dissertação apresentada como requisito
para obtenção do título de mestre em
Engenharia Civil pelo Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Civil do Centro
de Ciências Tecnológicas – CCT, da
Universidade do Estado de Santa Catarina
– UDESC.

Orientadora: Prof.^a Dra. Fernanda
Perazzolo Disconzi

**JOINVILLE
2025**

**Ficha catalográfica elaborada pelo programa de geração automática da
Biblioteca Universitária Udesc,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

Farias, Mariana Moccellin de
Avaliação do desempenho da ventilação natural em uma
habitação de interesse social como estratégia de resfriamento
para clímas tropicais e subtropicais / Mariana Moccellin de
Farias. -- 2025.
147 p.

Orientadora: Fernanda Perazzolo Disconzi
Dissertação (mestrado) -- Universidade do Estado de
Santa Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas, Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Joinville, 2025.

1. Ventilação natural. 2. Resfriamento passivo. 3.
Residência unifamiliar. 4. CFD. 5. BES. I. Disconzi, Fernanda
Perazzolo. II. Universidade do Estado de Santa Catarina,
Centro de Ciências Tecnológicas, Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

MARIANA MOCCELLIN DE FARIAS

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DA VENTILAÇÃO NATURAL EM UMA
HABITAÇÃO DE INTERESSE SOCIAL COMO ESTRATÉGIA DE RESFRIAMENTO
PARA CLIMAS TROPICAIS E SUBTROPICAIS**

Dissertação apresentada como requisito
para obtenção do título de mestre em
Engenharia Civil pelo Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Civil do Centro
de Ciências Tecnológicas – CCT, da
Universidade do Estado de Santa Catarina
– UDESC.

Prof.^a Dra. Fernanda Perazzolo Disconzi
CCT/UDESC (Orientadora e Presidente)

BANCA EXAMINADORA

Membros:

Prof. Dr. Diogo Berta Pitz
Universidade Federal do Paraná – UFPR

Prof. Dr. Eduardo Leite Krüger
Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR

Prof. Dr. Fabio de Souza Alves
Instituto Federal de Santa Catarina – IFSC

Joinville, 25 de abril de 2025.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha orientadora, Fernanda Perazzolo Disconzi, por aceitar conduzir o meu trabalho de pesquisa e por toda sua contribuição nessa jornada.

A todos os meus professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Estado de Santa Catarina – Udesc/CCT pela excelência da qualidade técnica de cada um e pelos ensinamentos fornecidos ao longo do curso.

Agradeço aos meus pais, Regina e Marcos, por todo o apoio e carinho inefáveis ao longo dessa caminhada. Agradeço também ao meu namorado Eduardo, por toda a compreensão e incentivo.

Ao Fabricio T. Borghi, que não mediu esforços em compartilhar seus conhecimentos de Dinâmica dos Fluidos Computacional e contribuiu para a realização de testes experimentais e simulações computacionais.

Aos professores da banca avaliadora, por aceitarem o convite em participar da avaliação deste trabalho e contribuir com este estudo e com minha formação.

“Assovia o vento dentro de mim. Estou despidio. Dono de nada, dono de ninguém, nem mesmo dono de minhas certezas, sou minha cara contra o vento, a contravento, e sou o vento que bate em minha cara”.
(Eduardo Galeano)

RESUMO

Este trabalho avaliou o desempenho da ventilação natural como estratégia de resfriamento passivo em uma habitação de interesse social, residência unifamiliar, considerando os climas tropical e subtropical litorâneos de Recife (PE) e Joinville (SC). Por meio de simulações de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) e de simulações termoenergéticas (BES), utilizando os programas *ANSYS Fluent* e *EnergyPlus*, investigaram-se diferentes direções de vento (0°, 90°, 180° e 270°), com a tipologia habitacional mantida constante e isolada no terreno. Os resultados indicaram que a eficiência da ventilação natural está fortemente associada à interação entre direção do vento, geometria interna e disposição das aberturas, apresentando variações relevantes entre os contextos urbanos e climáticos das duas cidades. As simulações CFD, considerando a escala real da edificação, permitiram a visualização dos escoamentos internos e externos, evidenciando a formação de vórtices e zonas de estagnação que afetam o desempenho da ventilação. A análise das taxas de ventilação adimensional (DFR) e da abrangência do escoamento interno mostrou que a avaliação do desempenho da ventilação apenas por um único indicador pode ser insuficiente, sendo necessária uma abordagem combinada. Já as simulações BES permitiram avaliar o conforto térmico com base em critérios normativos (NBR 15.575) e complementares, como a taxa média de trocas de ar por hora (ACH_{med}) e a umidade relativa (UR) interna. A análise dos resultados revelou que Recife apresentou maior sensibilidade às variações de vento, com oscilações mais expressivas nas taxas de ventilação e no conforto térmico, enquanto Joinville apresentou comportamento mais linear. O desempenho térmico foi melhor nos dormitórios e mais crítico na sala. A interação entre ventilação, temperatura e umidade evidenciou que a eficiência da ventilação natural depende não apenas de sua intensidade, mas também de sua distribuição espacial e da compatibilidade com a orientação solar. Por fim, a pesquisa evidenciou a importância de incorporar a ventilação natural desde as etapas iniciais de projeto, especialmente em empreendimentos habitacionais de interesse social, como forma de promover conforto ambiental, eficiência energética e salubridade no contexto de climas quentes e úmidos.

Palavras-chave: Ventilação natural; Resfriamento passivo; Residência unifamiliar; CFD; BES.

ABSTRACT

This study evaluated the performance of natural ventilation as a passive cooling strategy in a social housing unit – single-family residence – considering the tropical and subtropical coastal climates of Recife (PE) and Joinville (SC), Brazil. Through Computational Fluid Dynamics (CFD) and Building Energy Simulations (BES), using ANSYS Fluent and EnergyPlus software, different wind directions (0°, 90°, 180°, and 270°) were investigated, with the housing typology kept constant and isolated on the plot. The results indicated that the efficiency of natural ventilation is strongly linked to the interaction between wind direction, internal geometry, and the positioning of openings, showing significant variations between the urban and climatic contexts of the two cities. CFD simulations, carried out at the real scale of the building, enabled the visualization of both internal and external airflow patterns, revealing the formation of vortices and stagnation zones that affect ventilation performance. The analysis of the dimensionless flow rate (DFR) and the coverage of internal airflow showed that relying on a single indicator may be insufficient to assess ventilation performance, requiring a combined approach. BES simulations allowed for the evaluation of thermal comfort based on regulatory criteria (NBR 15.575) and additional indicators such as the average air changes per hour (ACH_{med}) and indoor relative humidity (RH). The analysis revealed that Recife exhibited greater sensitivity to variations in wind direction, with more pronounced fluctuations in ventilation rates and thermal comfort, whereas Joinville showed a more linear and stable behavior. Thermal performance was better in the bedrooms and more critical in the living room. The interaction between ventilation, temperature, and humidity highlighted that the effectiveness of natural ventilation depends not only on its intensity but also on its spatial distribution and alignment with solar orientation. Finally, the research emphasized the importance of integrating natural ventilation strategies from the early stages of design, particularly in social housing projects, to promote environmental comfort, energy efficiency, and indoor health in hot and humid climates.

Keywords: Natural ventilation; Passive cooling; Single-family residence; CFD; BES.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Diferenças de pressão pela ação dos ventos.....	32
Figura 2 - Imagens fluidodinâmicas na mesa d'água.....	37
Figura 3 - Organograma das etapas da pesquisa	42
Figura 4 - Representação gráfica dos APP e APT (a); planta baixa (b); perspectiva da edificação (c).....	43
Figura 5 – Variação anual de TBS e UR para a) Joinville e b) Recife	46
Figura 6 - Rosa dos ventos para a) Joinville-SC e b) Recife-PE	47
Figura 7 - Padrão de uso e ocupação.....	57
Figura 8 - Malha computacional	60
Figura 9 – Domínio computacional	61
Figura 10 - Perfil de velocidade do vento	64
Figura 11 - Posição dos planos verticais de corte.....	65
Figura 12 – Posição dos planos horizontais	65
Figura 13 - Escala cromática de velocidades médias.....	67
Figura 14 - Velocidade média na janela perpendicular ao fluxo - sala	72
Figura 15 - Campo de vetores de velocidade plotado sobre o mapa da magnitude da velocidade - plano horizontal a) 0,80 m e b) 1,60 m - 0° para um instante de tempo $t = 3000$ s.....	73
Figura 16 – Campo de vetores de velocidade plotado sobre o mapa da magnitude da velocidade - plano vertical a) AA; b) BB; c) CC; d) DD - 0° para um instante de tempo $t = 3000$ s	74
Figura 17 - Campo de vetores de velocidade plotado sobre o mapa da magnitude da velocidade - plano horizontal a) 0,80 m e b) 1,60 m - 90° para um instante de tempo $t = 3000$ s.....	76
Figura 18 - Campo de vetores de velocidade plotado sobre o mapa da magnitude da velocidade - plano vertical a) AA; b) BB; c) CC; d) DD - 90° para um instante de tempo $t = 3000$ s	77
Figura 19 - Campo de vetores de velocidade plotado sobre o mapa da magnitude da velocidade – plano horizontal a) 0,80 m e b) 1,60 m – 180° para um instante de tempo $t = 3000$ s	79

Figura 20 - Campo de vetores de velocidade plotado sobre o mapa da magnitude da velocidade - plano vertical a) AA; b) BB; c) CC; d) DD - 180° para um instante de tempo $t = 3000$ s	80
Figura 21 – Campo de vetores de velocidade plotado sobre o mapa da magnitude da velocidade - plano horizontal a) 0,80 m e b) 1,60 m - 270° para um instante de tempo $t = 3000$ s	81
Figura 22 - Campo de vetores de velocidade plotado sobre o mapa da magnitude da velocidade - plano vertical a) AA; b) BB; c) CC; d) DD - 270° para um instante de tempo $t = 3000$ s	83
Figura 23 - Vista superior do escoamento externo à HIS: 0°, 90°, 180° e 270°	85
Figura 24 - Vista isométrica do escoamento externo à HIS: 0°, 90°, 180° e 270°	86
Figura 25 - DFR global para cada direção de vento	88
Figura 26 - Abrangência do escoamento para o ângulo de incidência do vento a 0°: a) plano 0,80 m e b) plano 1,60 m	90
Figura 27 - Abrangência do escoamento para o ângulo de incidência do vento a 90°: a) plano 0,80 m e b) plano 1,60 m	90
Figura 28 - Abrangência do escoamento para o ângulo de incidência do vento a 180°: a) plano 0,80 m e b) plano 1,60 m	91
Figura 29 - Abrangência do escoamento para o ângulo de incidência do vento a 270°: a) plano 0,80 m e b) plano 1,60 m	92
Figura 30 - Abrangência do escoamento por ambiente para: a) plano a 0,80 m do piso e b) plano a 1,60 m do piso.....	94
Figura 31 - Abrangência total média para cada ângulo de incidência do vento	94
Figura 32 - Temperatura operativa máxima - $T_{o\max}$ - caso base - Joinville.....	96
Figura 33 - Temperatura operativa média - $T_{o\text{med}}$ - caso base - Joinville	97
Figura 34 - Percentual de horas na faixa de temperatura - PHFT_{APP} - caso base - Joinville	97
Figura 35 - Trocas de ar por hora média - ACH_{med} - caso base - Joinville.....	98
Figura 36 - Umidade relativa média - UR_{med} - caso base - Joinville.....	99
Figura 37 - Temperatura operativa máxima - $T_{o\max}$ - caso 0° - Joinville.....	100
Figura 38 - Temperatura operativa média - $T_{o\text{med}}$ - caso 0° - Joinville	100
Figura 39 - Percentual de horas na faixa de temperatura - PHFT_{APP} - caso 0° - Joinville	101

Figura 40 - Trocas de ar por hora média - ACH_{med} - caso 0° - Joinville	101
Figura 41 - Umidade relativa média - UR_{med} - caso 0° - Joinville	102
Figura 42 - Temperatura operativa máxima - $To_{máx}$ - caso 90° - Joinville	102
Figura 43 - Temperatura operativa média - To_{med} - caso 90° - Joinville	103
Figura 44 - Percentual de horas na faixa de temperatura - $PHFT_{APP}$ - caso 90° - Joinville	103
Figura 45 - Trocas de ar por hora média - ACH_{med} - caso 90° - Joinville	104
Figura 46 - Umidade relativa média - UR_{med} - caso 90° - Joinville	104
Figura 47 - Temperatura operativa máxima - $To_{máx}$ - caso 180° - Joinville	105
Figura 48 - Temperatura operativa média - To_{med} - caso 180° - Joinville	106
Figura 49 - Percentual de horas na faixa de temperatura - $PHFT_{APP}$ - caso 180° - Joinville	106
Figura 50 - Trocas de ar por hora média - ACH_{med} - caso 180° - Joinville	107
Figura 51 - Umidade relativa média - UR_{med} - caso 180° - Joinville	107
Figura 52 - Temperatura operativa máxima - $To_{máx}$ - caso 270° - Joinville	108
Figura 53 - Temperatura operativa média - To_{med} - caso 270° - Joinville	109
Figura 54 - Percentual de horas na faixa de temperatura - $PHFT_{APP}$ - caso 270° - Joinville	109
Figura 55 - Trocas de ar por hora média - ACH_{med} - caso 270° - Joinville	110
Figura 56 - Umidade relativa Média - UR_{med} - caso 270° - Joinville	110
Figura 57 - Temperatura operativa máxima - $To_{máx}$ - caso base - Recife	111
Figura 58 - Temperatura operativa média - To_{med} - caso base - Recife	112
Figura 59 - Percentual de horas na faixa de temperatura - $PHFT_{APP}$ - caso base - Recife	112
Figura 60 - Trocas de ar por hora média - ACH_{med} - caso base - Recife	113
Figura 61 - Umidade relativa média - UR_{med} - caso base - Recife	113
Figura 62 - Temperatura operativa máxima - $To_{máx}$ - caso 0° - Recife	114
Figura 63 - Temperatura operativa média - To_{med} - caso 0° - Recife	115
Figura 64 - Percentual de horas na faixa de temperatura - $PHFT_{APP}$ - caso 0° - Recife	115
Figura 65 - Trocas de ar por hora média - ACH_{med} - caso 0° - Recife	116
Figura 66 - Umidade relativa média - UR_{med} - caso 0° - Recife	116
Figura 67 - Temperatura operativa máxima - $To_{máx}$ - caso 90° - Recife	117

Figura 68 - Temperatura operativa média - $T_{O_{med}}$ - caso 90° - Recife	118
Figura 69 - Percentual de horas na faixa de temperatura - $PHFT_{APP}$ - caso 90° - Recife	118
Figura 70 - Trocas de ar por hora média - ACH_{med} - caso 90° - Recife	119
Figura 71 - Umidade relativa média - UR_{med} - caso 90° - Recife	119
Figura 72 - Temperatura operativa máxima - $T_{O_{máx}}$ - caso 180° - Recife	120
Figura 73 - Temperatura operativa média - $T_{O_{med}}$ - caso 180° - Recife	121
Figura 74 - Percentual de horas na faixa de temperatura - $PHFT_{APP}$ - caso 180° - Recife	121
Figura 75 - Trocas de ar por hora média - ACH_{med} - caso 180° - Recife	122
Figura 76 - Umidade relativa média - UR_{med} - caso 180° - Recife	122
Figura 77 - Temperatura operativa máxima - $T_{O_{máx}}$ - caso 270° - Recife	123
Figura 78 - Temperatura operativa média - $T_{O_{med}}$ - caso 270° - Recife	124
Figura 79 - Percentual de horas na faixa de temperatura - $PHFT_{APP}$ - caso 270° - Recife	124
Figura 80 - Trocas de ar por hora média - ACH_{med} - caso 270° - Recife	125
Figura 81 - Umidade relativa média - UR_{med} - caso 270° - Recife	125

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Parâmetros geométricos das janelas da edificação	45
Quadro 2 - Cidades, zonas bioclimáticas, classificação Köppen-Geiger e TBS.....	45
Quadro 3 - Configurações de incidência de vento	49
Quadro 4 - Orientação solar da HIS com base na incidência de ventos para cada localidade	50
Quadro 5 - Parâmetros termofísicos do solo	56
Quadro 6 - Padrão de uso e potência dos equipamentos	57
Quadro 7 - Padrão de uso do sistema de iluminação	57
Quadro 8 - Taxa metabólica para os usuários	58
Quadro 9 - Parâmetros termofísicos dos elementos da envoltória da HIS	58
Quadro 10 - Teor inicial de água dos materiais da envoltória	59
Quadro 11 - Intervalos para avaliação da temperatura operativa	68
Quadro 12 - Legenda da classificação da escala de cinco pontos para a abrangência do escoamento	93
Quadro 13 - Coeficientes de pressão do vento.....	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Área útil dos ambientes e da edificação.....	44
Tabela 2 - Erro relativo do refinamento das malhas computacionais	71
Tabela 3 - DFR local e global para cada direção de vento	89
Tabela 4 - Abrangência do escoamento.....	93
Tabela 5 - Trocas de ar por hora média - ACH_{med}	126
Tabela 6 - Percentual de horas na faixa de temperatura - PHFT	128
Tabela 7 - Umidade relativa média - UR_{med}	129

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Abrangência do escoamento
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACH	Trocas de ar por hora
ACH _{med}	Trocas de ar por hora média
APP	Ambiente de permanência Prolongada
APT	Ambiente de permanência transitória
ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers</i>
BES	Simulação Termoenergética de Edificações
CFD	Dinâmica dos Fluidos Computacional
Cp	Coeficiente de pressão
CTF	<i>Conduction Transfer Function Model</i>
DFR	Taxa de ventilação adimensional
HAMT	<i>Combined Heat and Moisture Transfer Model</i>
HIS	Habitação de interesse social
NBR	Normas Técnicas Brasileiras
PHFT	Percentual de horas dentro de uma faixa de temperatura operativa
PMCMV	Programa Minha Casa Minha Vida
Q	Vazão volumétrica de ar
RANS	<i>Reynolds Averaged Navier-Stokes Equations</i>
SST	<i>Shear Stress Transport</i>
TBS	Temperatura de bulbo seco
To	Temperatura operativa
To _{máx}	Temperatura operativa máxima
To _{med}	Temperatura operativa média
U	Velocidade
UH	Unidade habitacional
UR	Umidade relativa
ZB	Zona bioclimática

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	17
1.1	OBJETIVO GERAL	19
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	19
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	19
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
2.1	ADEQUAÇÃO DA CONSTRUÇÃO AO CLIMA.....	21
2.1.1	Conforto térmico e eficiência energética em edificações	22
2.1.2	Habitações de interesse social (HIS)	25
2.1.3	Normativas de desempenho térmico para edificações	26
2.1.4	Estratégias passivas de resfriamento em edificações	28
2.1.5	Climas tropicais e subtropicais: características.....	30
2.2	VENTILAÇÃO NATURAL	31
2.2.1	Métodos e métricas de avaliação	33
2.2.2	Fatores que influenciam o desempenho da ventilação natural.....	38
3	MÉTODOS.....	42
3.1	ETAPAS INICIAIS	43
3.1.1	Caracterização do objeto de estudo	43
3.1.2	Localidades e climas	45
3.1.3	Variáveis para análise	48
3.2	SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS	51
3.2.1	<i>Building Energy Simulation (BES)</i>	52
3.2.1.1	<i>Controle de simulação e iteração</i>	52
3.2.1.2	<i>Coeficiente de convecção superficial</i>	53
3.2.1.3	<i>Algoritmo de balanço térmico</i>	54
3.2.1.4	<i>Contato com o solo</i>	56
3.2.1.5	<i>Condições de operação</i>	56
3.2.1.6	<i>Parâmetros termofísicos</i>	58
3.2.2	Dinâmica computacional dos fluidos (CFD)	59
3.2.2.1	<i>Modelos para simulação</i>	59
3.2.2.2	<i>Método numérico</i>	61
3.2.2.3	<i>Perfil de velocidade</i>	63
3.3	AVALIAÇÃO DA VENTILAÇÃO NATURAL	64

3.3.1	Comportamento do escoamento de vento.....	64
3.3.2	Taxa de ventilação e abrangência do escoamento	66
3.3.3	Temperatura e umidade.....	67
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	70
4.1	VERIFICAÇÃO DA MALHA COMPUTACIONAL.....	70
4.2	COMPORTAMENTO DO ESCOAMENTO DE VENTO INTERNO	72
4.2.1	Ângulo de incidência 0°	72
4.2.2	Ângulo de incidência 90°	75
4.2.3	Ângulo de incidência 180°.....	78
4.2.4	Ângulo de incidência 270°.....	81
4.2.5	Síntese da análise qualitativa	84
4.3	COMPORTAMENTO DO ESCOAMENTO DE VENTO EXTERNO	84
4.4	TAXA DE VENTILAÇÃO E ABRANGÊNCIA DO ESCOAMENTO	87
4.4.1	Taxa de ventilação adimensional (DFR).....	87
4.4.2	Abrangência do escoamento.....	89
4.5	TEMPERATURA E UMIDADE	95
4.5.1	Joinville-SC	96
4.5.1.1	<i>Caso base</i>	96
4.5.1.2	<i>Caso 0°</i>	99
4.5.1.3	<i>Caso 90°</i>	102
4.5.1.4	<i>Caso 180°</i>	105
4.5.1.5	<i>Caso 270°</i>	108
4.5.2	Recife-PE	111
4.5.2.1	<i>Caso base</i>	111
4.5.2.2	<i>Caso 0°</i>	114
4.5.2.3	<i>Caso 90°</i>	117
4.5.2.4	<i>Caso 180°</i>	120
4.5.2.5	<i>Caso 270°</i>	123
4.5.3	Análise comparativa dos casos	126
5	CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS	131
5.1	LIMITAÇÕES DO TRABALHO	135
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	135
	REFERÊNCIAS	137

1 INTRODUÇÃO

A busca por soluções construtivas sustentáveis e eficientes energeticamente tem se tornado uma necessidade crescente no campo da construção civil, especialmente em habitações de interesse social (HIS) e em construções localizadas em climas quentes. O aumento da urbanização, aliado ao déficit habitacional, impõe desafios que requerem a adoção de estratégias passivas, como a ventilação natural, e o uso inteligente de tecnologias para melhorar o conforto térmico e reduzir o consumo energético nas edificações.

A eficiência energética no âmbito das construções pode ser entendida como uma característica intrínseca à edificação, a qual indica o seu potencial de promover conforto ambiental aos usuários com um baixo consumo de energia (Lamberts; Dutra; Pereira, 2014).

Por sua vez, o conforto ambiental abrange uma série de condições que possibilitam às pessoas experimentarem bem-estar térmico, visual, acústico e ergonômico, além de assegurar a qualidade do ar e o conforto olfativo. Apesar das diferenças distintas do clima em qualquer região da Terra, os seres humanos compartilham uma semelhança biológica, sendo adaptáveis a condições climáticas variadas devido ao uso de recursos culturais como a vestimenta, a arquitetura e a tecnologia (Lamberts; Dutra; Pereira, 2014).

No contexto das habitações sociais no Brasil, programas como o “Minha Casa, Minha Vida” têm sido amplamente implementados para suprir a demanda por moradias (Nascimento, 2021). No entanto, esses projetos geralmente seguem um modelo padrão, desconsiderando as especificidades do clima local, o que compromete a eficiência das soluções de ventilação natural e de controle térmico (Bavaresco *et al.*, 2021). Xavier e Lukiantchuki (2021) apontam que a inclusão de elementos como muros nos projetos, por exemplo, pode impactar negativamente no aproveitamento dos ventos, reduzindo a eficiência da ventilação natural, um fator crucial para o conforto dos moradores em regiões de clima quente.

Triana, Lamberts e Sassi (2015), caracterizaram as tipologias representativas de edifícios para projetos de interesse social no Brasil e identificaram a tendência à baixa performance energética que essas edificações apresentam. Isso evidencia a necessidade de aprimorar a implementação de

estratégias para potencializar o desempenho térmico e reduzir a dependência de energia no condicionamento ambiental dessas construções. Porém, o estudo considerou apenas o viés energético, sem avaliar o comportamento da edificação em relação a demais variáveis que influenciam o desempenho térmico da residência, como a ventilação natural

Em países como o Brasil, onde o setor residencial consome cerca de 30% da energia final (EPE, 2023) e o uso de ar-condicionado nas residências triplicou entre 2005 e 2017 (EPE, 2018), a ventilação inadequada compromete o conforto térmico, aumenta os custos energéticos e pode afetar a saúde dos moradores pela má qualidade do ar interior (Morais; Labaki, 2017).

A ventilação natural tem um papel fundamental na melhoria da qualidade do ar interno e na promoção do conforto térmico. Estudos (Meroney, 2009; Morais; Labaki, 2017; Xavier; Lukiantchuki, 2021) mostram que a Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) pode ser uma ferramenta eficaz para prever o comportamento do ar, identificar áreas com baixa ventilação e avaliar o impacto de diferentes cenários de ventilação natural em edificações, permitindo analisar o impacto de variações arquitetônicas e condições climáticas. A aplicação de CFD também se mostra útil em simulações de habitações de interesse social, onde a viabilidade de soluções de ventilação eficiente muitas vezes é subestimada (Kumar *et al.*, 2021).

Considerando a relevância da ventilação natural no desempenho térmico das HIS (Bavaresco *et al.*, 2021; Kumar *et al.*, 2021), é fundamental investigar seu comportamento como estratégia de resfriamento. O aprofundamento nesse tema pode contribuir para o desenvolvimento de políticas públicas que promovam habitações mais confortáveis e sustentáveis, alinhadas com os objetivos do desenvolvimento sustentável.

Dessa forma, esta pesquisa busca investigar o comportamento da ventilação natural em uma habitação de interesse social como estratégia de resfriamento para climas tropicais e subtropicais, com a utilização de CFD. Complementarmente, utilizam-se simulações termoenergéticas (*Building Energy Simulation* – BES) com objetivo de analisar as temperaturas e umidade relativa, além de avaliar como a orientação solar interage com a incidência do vento na edificação.

1.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar o desempenho da ventilação natural em uma habitação de interesse social (HIS) como estratégia de resfriamento passivo para climas tropicais e subtropicais.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Investigar o comportamento da ventilação natural em dois climas brasileiros – tropical e subtropical – ambos caracterizados como quentes e úmidos;
- b) Avaliar o impacto da incidência do vento sobre uma HIS representativa e sua influência na ventilação natural utilizando Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD);
- c) Avaliar a interação entre ventilação natural e orientação solar, por meio de simulações BES, utilizando os coeficientes de pressão do vento obtidos por CFD;
- d) Identificar padrões de temperatura e umidade relativa no interior da residência.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

A estrutura do presente trabalho segue uma divisão em cinco capítulos. O primeiro capítulo, introdutório, apresenta a contextualização do tema, relacionando com a problemática e justificativa pertinentes ao estudo, além dos objetivos a serem alcançados.

O segundo capítulo traz a fundamentação teórica que embasou o estudo, a partir de uma revisão da literatura nacional e internacional relacionada ao tema da pesquisa. São abordados conceitos básicos relacionados à adequação da construção ao clima, conforto térmico e ventilação natural, com revisão de trabalhos relacionados ao tema.

O terceiro capítulo trata do método utilizado para a condução da pesquisa, o qual foi dividido em três etapas. Inicialmente, foi feita a delimitação do objeto de estudo e a definição dos contextos climáticos para a investigação do comportamento da ventilação natural no objeto de estudo. Então, definiram-se

os casos de análise, considerando diferentes ângulos de incidência do vento para avaliação da ventilação natural.

As simulações computacionais englobaram as sub etapas de pré-processamento, processamento e pós-processamento, com divisão em duas frentes: aplicação da ferramenta CFD, para as análises do comportamento do escoamento de ar e determinação dos coeficientes de pressão, e complementação do estudo das temperaturas e umidade relativa, por meio de um programa específico para simulação termoenergética de edifícios (BES).

No quarto capítulo, os resultados obtidos no estudo são apresentados, por meio de análises qualitativas e quantitativas, compreendendo a visualização do escoamento de ar, interno e externo, abrangência do escoamento, taxas de fluxo nas aberturas, temperaturas internas e umidade relativa.

O quinto capítulo apresenta a discussão dos resultados obtidos e a conclusão da pesquisa. Também são apontadas as limitações do estudo e sugestões para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo traz conceitos básicos relacionados à adequação da construção ao clima, conforto térmico e ventilação natural, além de métodos usados para avaliar o desempenho da ventilação natural em edificações. Foram revisados trabalhos relacionados ao tema, mostrando o que foi feito, as metodologias e os principais resultados, com breve crítica destacando lacunas de estudo e vinculando ao assunto desta dissertação.

2.1 ADEQUAÇÃO DA CONSTRUÇÃO AO CLIMA

Considerando o programa de necessidades de um projeto, além de materiais e técnicas construtivas, o clima também representa um elemento condicionante ou determinante da arquitetura de uma edificação.

Segundo (Gutierrez, 2004), na Antiguidade, o domínio sobre as características ambientais era um fator decisivo na adaptação e permanência de uma população em um determinado local. As técnicas construtivas dependiam da disponibilidade de materiais e da adequação climática, visando sempre a função de abrigo contra as intempéries. Associada às questões de tradição e cultura, essa tipologia de construção representa a arquitetura vernacular ^[1].

Entretanto, com o desenvolvimento da tecnologia, a adequação ao clima deixou de ser um elemento determinante de projeto e os conceitos vernaculares foram substituídos por soluções tecnológicas para o condicionamento dos ambientes (Rodrigues, 2015). Consequentemente, as edificações começaram a ser replicadas em diferentes regiões, com condições climáticas bastante diversas entre si, deixando de lado as premissas de adequação ao clima local por meio do domínio das características ambientais de determinada região (Bavaresco *et al.*, 2021).

Assim, a qualidade ambiental das habitações é penalizada, contribuindo para a baixa performance energética do ambiente construído, com destaque

¹ “Arquitetura vernacular – aquela que utiliza os materiais disponíveis em um determinado local ou região e /ou técnicas de construção tradicionais de uma cultura” (Holanda Ferreira, 1999).

para as tipologias habitacionais de interesse social (Triana; Lamberts; Sassi, 2015). Estima-se que o consumo de energia elétrica devido à utilização de condicionadores de ar pelas residências brasileiras tenha triplicado entre os anos de 2005 e 2017 (EPE, 2018). Esse aumento é influenciado pelo aquecimento global e o avanço das mudanças climáticas, principalmente a elevação das temperaturas, que se destaca em escala mundial, até mesmo em regiões que antes não eram consideradas quentes (Fereidani; Rodrigues; Gaspar, 2021).

Ao encontro dessa tendência de diminuição do consumo de recursos naturais e eficiência energética, a Comissão sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável da ONU criou o conceito de desenvolvimento sustentável, entendido como um modelo de crescimento apto a suprir as demandas de consumo da presente geração, preservando os recursos indispensáveis para garantir a satisfação das necessidades das gerações futuras (Brasil, 2019). Portanto, a arquitetura que se integra ao projeto de desenvolvimento sustentável é aquela que, baseando-se nos princípios fundamentais desse novo paradigma, altera seu ambiente natural de forma a criar um ambiente confortável, adaptado ao clima da região, energeticamente eficiente e de baixo custo de manutenção, resultando, então, na redução do impacto ambiental (Gamero-Salinas *et al.*, 2021).

Com isso, a premissa de adequação das edificações ao clima ressurge e impulsiona a aplicação de técnicas da arquitetura bioclimática, com o objetivo de alcançar o conforto térmico e a eficiência energética das construções e, consequentemente, redução nos custos de uso e operação (Medeiros, 2012).

2.1.1 Conforto térmico e eficiência energética em edificações

Uma das principais funções da arquitetura é garantir o conforto térmico dos usuários, com base nos conceitos de condicionamento passivo dos ambientes. Por isso, é essencial que os projetistas tenham domínio das características climáticas do local onde será inserida a construção (Gutierrez, 2004). É preciso considerar no projeto os dados referentes à temperatura, radiação solar, umidade do ar, precipitação e orientação dos ventos. Essas são

as variáveis climáticas que influenciam o conforto térmico dentro de um ambiente (Medeiros, 2012).

Triana, Lamberts e Sassi (2015) desenvolveram um estudo para caracterizar tipologias representativas de edifícios para projetos de interesse social no Brasil. A partir dessa caracterização dos principais tipos de residências construídas no país, identificou-se a tendência à baixa performance energética associada a essas edificações, evidenciando a falta de aplicação das estratégias passivas para adequação das residências ao contexto climático aos quais estão inseridas.

A avaliação da eficiência energética das construções estudadas foi pela aplicação da metodologia prescritiva do Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE), considerando diferentes zonas bioclimáticas do território brasileiro. A classificação de eficiência energética proposta pelo PBE varia entre os níveis A e E, sendo os ambientes avaliados em termos de grau-hora resfriamento, considerando apenas o uso da ventilação natural, e carga térmica para resfriamento/aquecimento. Para a tipologia de residência unifamiliar estudada por Triana, Lamberts e Sassi (2015), a classificação geral da envoltória variou entre os níveis D e E, dependendo da localidade.

O movimento pela busca por edificações eficientes e confortáveis termicamente é bastante consolidado, sendo que a literatura evidencia uma tendência em focar na eficiência energética (Zhang *et al.*, 2021). Contudo, nem sempre estratégias de eficiência (tecnologias e práticas) coincidem com aquelas que visam fortalecer a resiliência da edificação diante de temperaturas extremas.

Resiliência é um conceito amplamente utilizado no contexto de gerenciamento de riscos de desastres, referindo-se à habilidade de um sistema e suas partes para prever, absorver, adaptar-se ou se recuperar dos efeitos de um evento perigoso de forma rápida e eficaz, assegurando a preservação, restauração ou aprimoramento de suas estruturas e funções básicas essenciais (Field *et al.*, 2012). Para o contexto do ambiente construído, resiliência significa incorporar ao projeto da edificação aspectos que permitam ao edifício e seus sistemas desempenharem suas funções pretendidas, tanto agora quanto nos futuros cenários impostos pelas mudanças climáticas (Alfraidi; Boussabaine, 2015).

No âmbito do estudo sobre superaquecimento em edificações residenciais, diversos trabalhos investigaram o superaquecimento durante o verão em edifícios sem ar-condicionado, geralmente contemplando regiões com verões moderados e invernos frios. A exemplo, Goncalves *et al.* (2022) utilizaram simulações computacionais para avaliar o superaquecimento de um edifício residencial de quatro pavimentos durante o verão. Os resultados mostraram que a previsão da frequência de superaquecimento encontrada com as entradas padrão de infiltração de projeto e ventilação natural comumente utilizadas na literatura, concordaram razoavelmente com aquelas obtidas a partir do modelo computacional em climas temperados ou mais frios.

Entretanto, uma subestimação significativa foi percebida na investigação de climas mais quentes. Ainda, o estudo citado aponta a lacuna existente no entendimento do efeito de diferentes metodologias de modelagem computacional na predição do número de horas de superaquecimento.

Os efeitos adversos das mudanças climáticas também são considerados, (Mavrogianni *et al.*, 2012; O’ Donovan; Murphy; O’Sullivan, 2021), abordando em cenários futuros, com estimativas para os dados climáticos referentes ao ano de 2050.

Outras pesquisas abordam o equilíbrio entre eficiência energética e resiliência ao calor, no sentido de entender se um demasiado esforço para atingir elevados padrões de eficiência energética pode comprometer a capacidade do edifício em manter condições de conforto térmico durante ondas de calor. Tais pesquisas acabam tendo como objeto de estudo edificações que apresentam características semelhantes de envoltória, com isolamento e vedações de aberturas, e clima.

A exemplo, Sengupta *et al.* (2023) avaliaram a capacidade de resiliência térmica de um edifício educacional na Bélgica, bem isolado e vedado, considerando a aplicação da estratégia de ventilação natural noturna e resfriamento evaporativo indireto. Apolônio, Callejas e Roseta (2023) investigaram os níveis de estresse térmico em uma edificação residencial unifamiliar, localizada no Brasil em uma região de clima tropical de savana, por meio da aplicação de diferentes índices de avaliação de resiliência térmica.

Baniassadi e Sailor (2018) destacaram que, embora estudos se concentrem em climas temperados, o superaquecimento em regiões mais

quentes pode causar sérios impactos à saúde. No sul dos EUA, eles simularam cenários de falha de energia durante ondas de calor para avaliar estratégias de resiliência. Observaram que medidas que economizam energia, como a redução de infiltrações, nem sempre são eficazes em termos de conforto térmico, sendo superadas por outras, como o aumento da refletância do telhado. As estratégias mais eficazes variaram conforme as condições climáticas locais.

Portanto, dependendo do clima, determinadas estratégias podem contribuir para a convergência ou divergência dos objetivos de eficiência energética e conforto térmico.

2.1.2 Habitações de interesse social (HIS)

O déficit habitacional no Brasil tem se apresentado como um desafio persistente ao longo das últimas décadas. Segundo dados da Fundação João Pinheiro (FJP), no ano de 2022 esse déficit alcançou seis milhões de domicílios, correspondendo a 8,3% das habitações ocupadas no país (FJP, 2023).

A quantificação do déficit habitacional refere-se ao número de moradias necessárias para atender às necessidades básicas habitacionais. Esse índice abrange a falta de moradias adequadas devido à precariedade das construções, ao desgaste estrutural, à coabitAÇÃO indesejada (famílias que não conseguem constituir domicílios unifamiliares) e à dificuldade de acesso à habitação, especialmente para famílias de baixa renda que comprometem seu orçamento com aluguéis em áreas urbanas (FJP, 2023).

Como estratégia para solucionar o desafio habitacional, o Governo Federal lançou em 2009 o Programa Minha Casa Minha Vida (PMCMV), compondo uma iniciativa abrangente de promoção de habitação social no país. Apesar do impacto no número de unidades habitacionais construídas, o programa é alvo de críticas devido à excessiva padronização dos projetos arquitetônicos e à falta de adaptação às condições climáticas regionais, o que evidencia sua fragilidade em relação à salubridade e ao conforto térmico das moradias (Morais; Labaki, 2017; Nascimento, 2021).

A Portaria MCID nº 725, de 15 de junho de 2023 (Brasil, 2023), define diretrizes para projetos de edificações e unidades habitacionais do PMCMV, priorizando estratégias passivas de conforto térmico, especialmente a ventilação

natural. Os projetos devem otimizar a ventilação por meio da forma do edifício, disposição e tamanho das aberturas, tipos de esquadrias e materiais, considerando o clima local. A ventilação cruzada é obrigatória em habitações unifamiliares e recomendada em tipologias multifamiliares, considerando todas as zonas bioclimáticas brasileiras.

Embora a oferta de habitação social proporcione acesso à moradia a milhões de brasileiros, a qualidade desses empreendimentos ainda apresenta deficiências significativas. Entre os principais desafios estão a ventilação inadequada (Costa; Labaki; Lages, 2023) e o baixo desempenho térmico das edificações (Triana; Lamberts; Sassi, 2015), fatores essenciais para o conforto e a saúde dos moradores.

2.1.3 Normativas de desempenho térmico para edificações

Diversas organizações internacionais, como ISO, EN e ASHRAE, além de países como China, Índia e Austrália, estabelecem diretrizes sobre condições internas de conforto térmico e desempenho térmico das edificações (Khovalyg *et al.*, 2020); (Berger *et al.*, 2023).

É comum que as normas se aparem em modelos de conforto térmico, seguindo duas abordagens principais: o modelo estático, que define temperaturas constantes para diferentes estações com base na transferência de calor, e o modelo adaptativo, que ajusta a temperatura de conforto de acordo com condições externas e a capacidade de adaptação dos ocupantes (Nicol; Humphreys, 2002).

Contudo, a aplicabilidade das normas é limitada em regiões com climas e culturas diferentes. Normas internacionais, por exemplo, muitas vezes falham em prever tanto o desempenho quanto o conforto térmico em áreas com condições extremas, como o Oriente Médio (Elnaklah *et al.*, 2021). Isso ressalta a necessidade de normas localizadas que considerem as diferenças climáticas e culturais regionais (Khovalyg *et al.*, 2020; Lamsal; Bajracharya; Rijal, 2023).

Normas que promovem um design e operação de edifícios energeticamente eficientes, podem ajudar a reduzir a demanda de energia para resfriamento e aquecimento. Tal como, modelos de conforto térmico adaptativos que permitem ventilação natural e pontos de ajuste de temperatura flexíveis

podem gerar economias substanciais de energia (De Dear; Brager, 2001; Lamsal; Bajracharya; Rijal, 2023). Além disso, o monitoramento contínuo do conforto térmico com sensores pode ajudar a manter condições ótimas e aumentar ainda mais a eficiência energética das edificações (Li *et al.*, 2020).

No cenário internacional, a norma ISO 7730 utiliza os modelos estáticos *Predicted Mean Vote* (PMV) e *Predicted Percentage Dissatisfied* (PPD), desenvolvidos por Fanger, para prever as sensações térmicas em ambientes climatizados, mas estudos apontam que esses modelos superestimam o conforto em locais ventilados naturalmente (Gao; Wang; Wargocki, 2015; Lamberts *et al.*, 2013).

Já a ASHRAE 55 *Environmental Conditions for Human Occupancy* adota o modelo adaptativo, que considera a adaptação humana a mudanças térmicas por meio de ações como ajuste de vestimentas e uso de ventilação (ASHRAE, 2013). Esse modelo, baseado na temperatura operativa, é mais adequado para construções ventiladas naturalmente, pois ajusta a faixa de conforto às condições climáticas externas, reduzindo a necessidade de condicionamento artificial (De Dear; Brager, 2001; De Vecchi, 2015).

Em Portugal, se avalia o desempenho térmico com o Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE), que analisa o consumo energético para aquecimento, arrefecimento e aquecimento de água para uso sanitário, além das propriedades térmicas dos materiais da envoltória. O RCCTE também classifica ambientes conforme suas taxas de renovação de ar, variando de fortemente ventilados, com uma taxa de renovação de ar mínima de seis renovações por hora, a espaços não ventilados, que não possuem ventilação permanente e a taxa de renovação de ar é inferior a meia renovação por hora (Portugal, 2006).

Outro país que aborda a ventilação natural em normativas nacionais é a Austrália. As recomendações sobre ventilação natural consideram o desenho e posicionamento das aberturas em relação à incidência dos ventos locais, tipos de esquadrias e equipamentos complementares, como ventiladores de teto. Essas, entre outras estratégias, são avaliadas por duas ferramentas mais comuns no país, sendo elas: *Nationwide House Energy Rating Scheme* (NatHERS) e *National Australian Built Environment Rating System* (NABERS). A primeira é mais direcionada para questões de conforto térmico e eficiência

energética, enquanto a segunda é mais ampla, englobando outras áreas como consumo de água e geração de resíduos (Reardon, 2020).

No cenário nacional, a NR 17 (Brasil, 2021), trata de questões ergonômicas no ambiente de trabalho. Em relação ao conforto térmico, estabelece condições aceitáveis por meio da definição de limites de temperatura efetiva entre 18°C e 25°C, além de medidas de controle para velocidade do ar e umidade. A NBR 15.220 (ABNT, 2005), por outro lado, apresenta estratégias de condicionamento passivo para edificações unifamiliares de interesse social.

No entanto, essa norma não aborda metodologias de avaliação do desempenho térmico, lacuna preenchida pela NBR 15.575 (ABNT, 2024b), que estabelece dois métodos para avaliação do desempenho das edificações. O método prescritivo é baseado na análise e comparação dos parâmetros termofísicos dos materiais da envoltória da edificação com valores de referência. E o método de simulação computacional, considera a elaboração de dois modelos para avaliação e comparação, sendo eles o modelo real e o de referência, com as mesmas características geométricas, desconsiderando elementos de sombreamento, mas divergindo nos parâmetros termofísicos; o modelo real considera valores referentes aos materiais empregados na envoltória e o modelo de referência utiliza valores preestabelecidos (ABNT, 2021).

Embora a NBR 15.575 avalie o desempenho da edificação na condição de naturalmente ventilada, ela não analisa a distribuição interna do escoamento de ar. Além disso, normas como a NBR 15.220 e a própria NBR 15.575 ignoram aspectos fundamentais da ventilação natural, como a posição e o tipo de aberturas, além da direção e velocidade predominante dos ventos, o que pode comprometer a eficácia dessa estratégia (Tibúrcio, 2017).

2.1.4 Estratégias passivas de resfriamento em edificações

O resfriamento passivo de edificações envolve o uso de estratégias que dispensam sistemas mecânicos ativos, como condicionadores de ar, visando reduzir o consumo energético relacionado ao conforto térmico. Tais estratégias são fundamentadas nas condições climáticas locais, e uma das mais relevantes é a ventilação natural (Lamberts; Dutra; Pereira, 2014).

A ventilação natural se destaca como estratégia essencial para praticamente todas as zonas bioclimáticas brasileiras. No entanto, sua eficácia depende de uma série de parâmetros projetuais, como o tamanho e posicionamento das aberturas, que influenciam o escoamento de ar interno. Aumentos excessivos nas áreas de abertura, por exemplo, podem comprometer o conforto térmico, como observado nas zonas bioclimáticas mais quentes (Bavaresco *et al.*, 2021). A correta disposição das aberturas deve evitar zonas de estagnação ou recirculação de ar, garantindo uma ventilação eficiente (Fu *et al.*, 2024; Rocha *et al.*, 2023).

A Portaria MCID nº 725, de 15 de junho de 2023 (Brasil, 2023), reforça a importância da ventilação natural como estratégia de resfriamento passivo, exigindo seu aproveitamento máximo nos projetos habitacionais federais. A norma determina que, em edificações unifamiliares, a ventilação cruzada é obrigatória em todas as zonas bioclimáticas da NBR 15.220-3 (ABNT, 2024a). Já em edificações multifamiliares, essa ventilação é recomendada. Além disso, a portaria exige ventilação noturna segura nos dormitórios e nas salas, reconhecendo o papel da ventilação no conforto térmico noturno.

Estudos reforçam que a ventilação natural tem impacto significativo na redução do risco de superaquecimento, sendo, ao lado de propriedades como absorvividade térmica das paredes e coeficiente de ganho solar, uma das estratégias mais eficazes (Gamero-Salinas *et al.*, 2021). Estratégias adicionais como sombreamento e orientação adequada também contribuem para o desempenho térmico, por exemplo, com o eixo mais longo da edificação orientado no sentido Leste-Oeste para reduzir a radiação direta (Matos; Delgado; Guimarães, 2022).

Outras abordagens passivas, como o uso de materiais com propriedades termoenergéticas adequadas (capacidade térmica, absorvividade solar, transmitância térmica), também são importantes (Bavaresco *et al.*, 2021). A combinação otimizada entre ventilação natural e isolamento térmico, como observado em estudos no México, mostrou-se eficaz para reduzir períodos de desconforto térmico (Hernández *et al.*, 2024).

Apesar de seu potencial, a ventilação natural isoladamente pode ser insuficiente em climas quentes e úmidos durante os períodos mais críticos. Nesse contexto, tem-se ampliado o uso de sistemas híbridos, que combinam

ventilação natural e condicionamento mecânico, proporcionando maior eficiência energética e melhor qualidade do ar (De Vecchi, 2011; Deuble; de Dear, 2012). Contudo, a eficácia desses sistemas depende do comportamento dos usuários, que muitas vezes acionam o ar-condicionado mesmo em condições externas moderadas – temperatura em torno de 25°C (De Vecchi, 2015).

A precisão na avaliação do desempenho térmico das estratégias passivas, especialmente a ventilação natural, é influenciada pelas ferramentas computacionais e pela consideração de variáveis como a umidade. Estudos mostram que modelos que incorporam a transferência de umidade apresentam resultados mais realistas e coerentes com o comportamento real das edificações (Araújo; Souza; Gomes, 2022; Sousa, 2020; Yang; Fu; Qin, 2015). Apesar do uso difundido do software EnergyPlus, suas limitações, como o tratamento unidimensional da ventilação natural, podem comprometer análises mais complexas. Eli *et al.*, (2021) demonstraram que esse programa apresenta limitações na simulação de estratégias híbridas, sugerindo que metodologias baseadas em Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD) oferecem maior precisão.

Portanto, a ventilação natural permanece como um pilar central no resfriamento passivo de edificações, sendo incentivada por normas técnicas e políticas públicas. Sua adequada aplicação, combinada a outras estratégias passivas e ferramentas de análise robustas, é essencial para enfrentar os desafios térmicos impostos pelas mudanças climáticas e promover construções mais eficientes e confortáveis.

2.1.5 Climas tropicais e subtropicais: características

Em regiões tropicais e subtropicais, o projeto de edificações deve ser adaptado às condições climáticas específicas para melhorar o desempenho térmico e reduzir o consumo de energia. Esses climas são caracterizados por altas temperaturas e umidade, o que exige o uso de ventilação natural, além de outras estratégias como controle da radiação solar e seleção adequada de materiais para manter o conforto interno sem uso excessivo de energia (Ferreira; Souza; Carlo, 2021).

No clima tropical, predominam temperaturas elevadas durante todo o ano, com médias mensais superiores a 18 °C, alta umidade relativa do ar e chuvas abundantes, seja de forma distribuída ou concentrada em determinadas estações (Alvares *et al.*, 2013). Essas condições resultam em altas cargas térmicas nas edificações, exigindo estratégias passivas de sombreamento e ventilação natural para minimizar o ganho de calor interno (Ferreira; Souza; Carlo, 2021).

Por outro lado, o clima subtropical caracteriza-se por verões quentes e úmidos, em que a temperatura do mês mais quente supera 22°C, e invernos que variam de amenos a frios, com temperaturas variando entre -3°C e 18°C (Alvares *et al.*, 2013). A amplitude térmica anual é maior do que no clima tropical, e as chuvas podem ser bem distribuídas ao longo do ano ou concentradas no verão.

Essas variações sazonais demandam soluções construtivas que atendam tanto ao resfriamento no verão quanto ao aquecimento no inverno. Estratégias passivas tornam-se fundamentais para reduzir as perdas de calor no inverno e minimizar ganhos excessivos no verão (Sorgato; Melo; Lamberts, 2016).

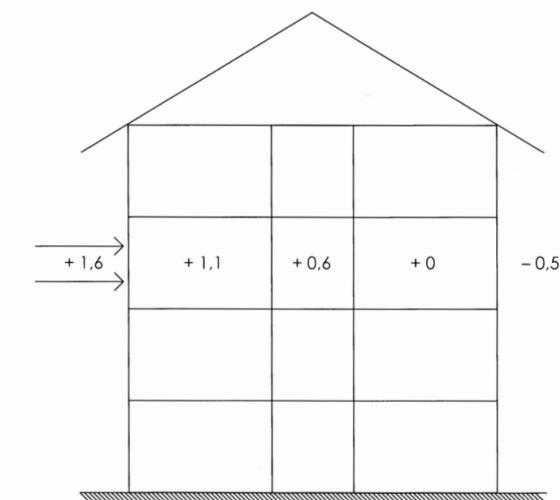
Essas considerações ressaltam a importância de um planejamento construtivo atento às especificidades climáticas regionais, visando edificações mais eficientes e confortáveis.

2.2 VENTILAÇÃO NATURAL

De modo geral, os sistemas de renovação de ar em um ambiente podem ser classificados em dois tipos: ventilação natural e ventilação artificial. A ventilação natural ocorre de forma espontânea, utilizando as diferenças de pressão naturais, causadas pelos ventos e pelas variações de temperatura que agem sobre as superfícies que delimitam o ambiente. Já a ventilação artificial, também conhecida como ventilação forçada, utiliza dispositivos mecânicos para promover a movimentação do ar dentro do espaço (Costa, Ennio Cruz da, 2005).

Embora intermitente, a ação dos ventos gera um escalonamento das pressões externas ao longo do sentido horizontal. Essa variação das pressões externas pode ser aproveitada para promover a ventilação natural (Figura 1).

Figura 1 - Diferenças de pressão pela ação dos ventos



Fonte: Costa (2005).

O efeito de flutuabilidade, também conhecido como efeito chaminé, ocorre devido à redução da massa específica do ar aquecido em um ambiente, o que gera diferenças de pressão em relação ao exterior. Essas diferenças de pressão, que se distribuem verticalmente, dependem da diferença de temperatura entre o ambiente interno e externo e da altura da coluna de ar (Costa, Ennio Cruz da, 2005).

Esse fenômeno impulsiona o escoamento de ar através de aberturas, uma vez que as diferenças de temperatura resultam em pressões distintas entre o interior e o exterior, criando o movimento natural do ar devido ao empuxo (Wang *et al.*, 2017).

Sendo assim, a ventilação natural configura um método sustentável e eficiente, em termos de energia, para fornecer ar fresco aos ocupantes de uma edificação, uma vez que não utiliza sistemas mecânicos (Heiselberg, 2004).

Com o aproveitamento dos ventos, é possível manter a qualidade do ar e resfriar os espaços internos quando as condições climáticas permitem. Esse processo envolve a troca de ar interno com o ar externo, que pode ser influenciado pelo design do edifício, pelas condições externas predominantes e pelo microclima (Liu *et al.*, 2023; Xavier; Lukiantchuki, 2021).

A ventilação natural por ação dos ventos utiliza as diferenças de pressão causadas pelo deslocamento de ar. Considerando sua aplicação na construção civil, essa condição pode ser alcançada por meio do posicionamento

conveniente das aberturas na fachada da edificação (Costa, Ennio Cruz da, 2005).

Assim, o movimento do ar pode ser de entrada e saída por aberturas localizadas em um mesmo lado do edifício, configurando a ventilação unilateral. Quando o ar cruza um ou mais ambientes, ou seja, suas respectivas aberturas de entrada e saída localizam-se em fachadas adjacentes ou opostas, diz-se que a ventilação é do tipo cruzada, sendo impulsionada pelas diferenças de pressão do vento entre os lados do edifício. Finalmente, a ventilação por efeito chaminé utiliza diferenças de pressão vertical causadas por variações de temperatura para movimentar o ar por meio de dutos ou aberturas verticais (Audilla; Wizaka; Prawata, 2021).

2.2.1 Métodos e métricas de avaliação

A ventilação natural desempenha papel fundamental em edificações residenciais, contribuindo para a redução do consumo de energia e a melhoria da qualidade do ar interno (Fu *et al.*, 2024). Diferentes métodos foram desenvolvidos para avaliar e otimizar essa estratégia, cada um com suas próprias vantagens e limitações.

Alguns estudos recorreram à simulação computacional por CFD para prever e analisar o comportamento do escoamento de ar dentro e ao redor das edificações. Zhang, Weerasuriya e Tse (2020) aplicaram CFD para estudar a ventilação natural em um edifício genérico, considerando diferentes direções de vento incidente e comparando modelos de turbulência. Derakhshan e Shaker (2017) utilizaram CFD com o modelo de turbulência SST $k-\omega$ para avaliar a taxa de fluxo de ar em uma edificação isolada, considerando diferentes tamanhos para as aberturas e direções do vento. Já Carreto-Hernandez *et al.* (2022) aplicaram CFD para investigar o desempenho de torres de vento como sistema passivo de ventilação natural e conforto térmico, analisando diferentes configurações no contexto de clima quente e úmido no México. Chew, Chen e Gorlé (2022) exploraram a variação do coeficiente de descarga com o número de Reynolds em um edifício operacional em escala real, utilizando simulações CFD com a abordagem Large Eddy Simulation (LES). Além disso, Goncalves e Rakha (2021) destacaram o papel das simulações de escoamento de ar na

avaliação do risco de superaquecimento em casas passivas, comparando abordagens distintas de simulação, incluindo CFD.

Outros estudos validaram suas simulações CFD com ensaios em túnel de vento, que possibilitam a obtenção de dados experimentais sob condições controladas. Ji *et al.* (2011) conduziram testes em túnel de vento para avaliar a influência da direção do vento na eficiência da ventilação cruzada. Karava, Stathopoulos e Athienitis (2011) desenvolveram um estudo experimental sobre as características da ventilação cruzada em um modelo genérico isolado, testado em túnel de vento com utilização da técnica de medição *Particle Image Velocimetry* (PIV), para avaliar padrões de escoamento de ar e a influência da configuração das aberturas na fachada da edificação. Kosutova *et al.* (2019) continuaram o estudo, combinando experimentos em túnel de vento com CFD para estudar a ventilação cruzada nessa mesma construção genérica isolada equipada com venezianas, relacionando com diferentes posicionamentos de aberturas. Sudirman *et al.* (2024) conduziram medições em túnel de vento para avaliar a ventilação cruzada em uma edificação real, demonstrando como divisórias internas afetam a distribuição interna do escoamento de ar e as taxas de ventilação.

Além disso, algumas pesquisas realizaram medições experimentais em campo para validar os modelos numéricos e avaliar o desempenho da ventilação natural em condições reais. Van Hooff e Blocken (2010) desenvolveram um modelo acoplado de escoamento do vento urbano e da ventilação natural interna para prever a circulação de ar dentro e ao redor de estádios esportivos, validando os resultados com medições em campo. Zhou *et al.* (2014) também utilizaram medições em campo para validar as simulações CFD, por meio da técnica de gás traçador de CO₂ para determinar a taxa de renovação de ar e a idade do ar nos ambientes avaliados, confirmando a eficácia de um design otimizado para ventilação natural em edifícios residenciais de grande altura. He *et al.* (2022) também utilizaram a técnica de gás traçador para medição da taxa de troca de ar em banheiros de um edifício corporativo. As medições experimentais serviram de base para a realização das simulações CFD, comparando a ventilação natural por meio de uma janela posicionada no telhado com um sistema de ventilação mecânica forçada (exaustor). Belleri, Lollini e Dutton (2014) analisaram a precisão das previsões de desempenho da ventilação natural por simulação

energética (BES), em um edifício de escritórios na Califórnia, em comparação com medições reais de temperatura, umidade e velocidade do vento.

Ainda no âmbito de medições experimentais, Cândido *et al.* (2010) realizaram uma pesquisa para compreender a percepção dos usuários em relação à velocidade do vento em climas quentes, tanto por fontes naturais, quanto a combinação de ventilação natural e mecânica. O estudo foi conduzido na cidade de Maceió, com medições locais de temperatura e velocidade do vento dentro de salas de aula. A partir dos resultados do estudo, observou-se a preferência por velocidades superiores ao limite de velocidade máxima do ar estipulada pela literatura e normas internacionais, para condições de temperaturas mais elevadas, sugerindo que o enfoque mais adequado para climas quentes deve ser sobre velocidades mínimas, ao invés de máximas.

Nesse sentido, Morais e Labaki (2017) estabeleceram uma escala cromática para avaliação da ventilação natural, a partir dos valores de velocidade média obtidos por simulações CFD. Foram analisados três ângulos de incidência de vento (0° , 90° e 135°) para três tipologias de edifícios verticais do PMCMV, considerando um cenário de edificação isolada. As velocidades compreendidas pela escala foram: ventilação natural imperceptível (entre 0 e 0,2 m/s), ventilação natural perceptível (entre 0,2 m/s e 0,4 m/s), ventilação natural adequada (entre 0,4 m/s e 0,8 m/s) e controle necessário da ventilação (velocidade acima de 0,8 m/s).

A análise quantitativa dos resultados foi uma abordagem comum nos estudos revisados, utilizando diferentes métricas para mensurar o desempenho da ventilação. Diversos estudos, como o de Kosutova *et al.* (2019), calcularam a efetividade da ventilação natural por meio de uma taxa adimensional do escoamento em determinada abertura. Outras pesquisas, mediram a eficiência da ventilação considerando o tempo médio de idade do ar nos ambientes (He *et al.*, 2022; Zhou *et al.*, 2014). Chew, Chen e Gorlé (2022) analisaram o coeficiente de descarga (C_d), que expressa a relação entre o fluxo de ar e a diferença de pressão, avaliando como essa variável se comporta em diferentes regimes de escoamento. Além disso, Carreto-Hernandez *et al.* (2022) utilizaram os índices *Predicted Mean Vote* (PMV) e *Predicted Percentage of Dissatisfied* (PPD) para quantificar a sensação térmica dos ocupantes e o impacto da ventilação natural sobre o conforto ambiental.

Algumas pesquisas também exploraram estratégias específicas para otimizar a ventilação natural em diferentes contextos. Ramponi, Angelotti e Blocken (2014) analisaram o potencial de economia de energia proporcionado pela ventilação noturna, destacando a influência dos coeficientes de pressão na determinação da taxa de ventilação e o consumo energético. Loche *et al.* (2024) investigaram como o design de sacadas pode influenciar a ventilação e o desempenho energético de edifícios de escritórios de grande porte, considerando diferentes geometrias e posicionamentos. Weerasuriya *et al.* (2019) desenvolveram um modelo integrado para otimizar a ventilação natural em edifícios residenciais de grande altura, integrando modelagem CFD, simulação de fluxo de ar multi-zona e simulação energética para encontrar soluções eficientes. Bittar *et al.* (2023) avaliaram a influência do posicionamento das aberturas de entrada e saída na velocidade do ar ao passar por dentro do ambiente isolado. Além disso, Iskandar *et al.* (2024) exploraram o uso da ventilação natural como estratégia passiva para melhorar o conforto térmico em edifícios históricos, demonstrando que soluções arquitetônicas, como ventilação cruzada, ventilação por efeito chaminé e ventilação noturna podem reduzir a necessidade de sistemas mecânicos de resfriamento.

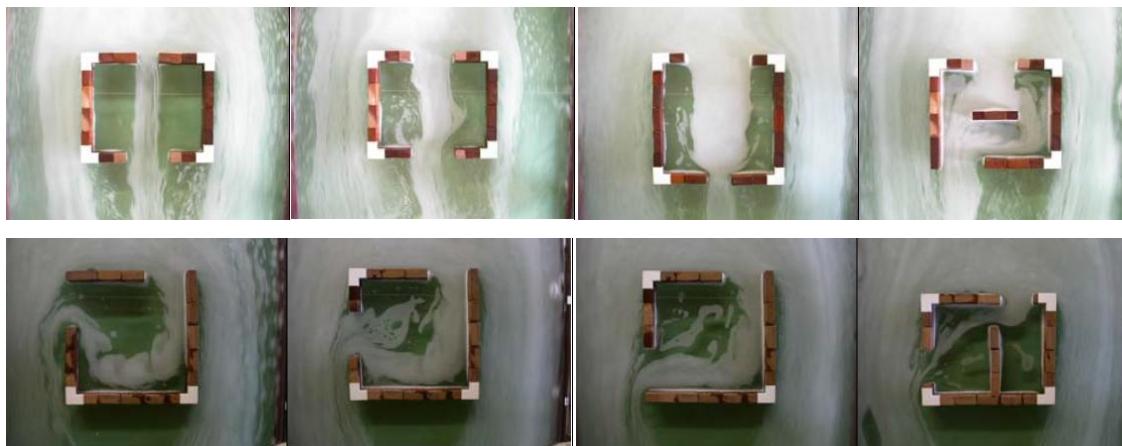
Toledo (2006) desenvolveu e aplicou dois métodos para avaliação natural em edifícios residenciais na cidade de Maceió, sendo eles o Método de Análise Simplificado e Qualitativo de Ventilação Natural pela Ação do Vento (MASQ-VENTO) e a Metodologia de Avaliação Multicritério de Ventilação Natural (MAM-VN). O primeiro consiste em um método simplificado, considerando apenas o escoamento bidimensional e o regime de escoamento externo laminar e permanente. Seu caráter é qualitativo, sem medir nem estimar valores de velocidade do ar ou taxas de ventilação.

O MAM-VN, por sua vez, é baseado na Metodologia Multicritério de Apoio à Decisão, aplicada para a solução de problemas complexos. Nesse método, o autor considerou três níveis de avaliação: padrão de escoamento do ar recomendado para o uso residencial, o potencial sazonal de ventos e a desejabilidade sazonal de ventilação natural. Com isso, o autor propôs um Índice de Desempenho Global de Ventilação Natural (IDG-VN).

Para a avaliação do escoamento do ar, considerou-se a abrangência do escoamento nos ambientes das unidades habitacionais, por meio da relação

entre a área de piso do ambiente e da estimativa da área que o escoamento de ar ocupa no recinto, a partir da visualização de ensaios realizados em mesa d'água (Figura 2).

Figura 2 - Imagens fluidodinâmicas na mesa d'água



Fonte: Toledo (2006).

A abrangência do escoamento foi classificada por meio de uma escala de cinco pontos: muito ampla (superior a 80% da área do piso), ampla (entre 60% e 80%), média (entre 40% e 60%), restrita (entre 20% e 40%) e muito restrita (abaixo de 20% da área de piso). Ressalta-se que a estimativa da abrangência do escoamento do ar a partir de imagens de ensaios em mesa d'água auxilia na compreensão do comportamento do fluido no interior dos ambientes, porém, não é identificada a faixa de velocidade que o escoamento interno atinge.

Em suma, os estudos sobre ventilação natural empregam uma ampla gama de métodos para avaliar seu desempenho, desde simulações CFD até ensaios experimentais e medições in loco. A integração entre esses diferentes métodos permite validar modelos numéricos e obter uma compreensão mais aprofundada dos fatores que afetam a ventilação natural nas edificações.

A análise quantitativa, baseada em índices como a taxa de ventilação e o coeficiente de descarga, complementa as investigações qualitativas sobre estratégias arquitetônicas que podem otimizar a ventilação e o conforto térmico.

2.2.2 Fatores que influenciam o desempenho da ventilação natural

Para o estudo da ventilação natural, é necessário considerar as combinações de vento e os efeitos de flutuabilidade causados pelas variações de temperatura.

A efetividade da ventilação natural é dependente do desenho do edifício, incluindo a forma da edificação e o tamanho e posição das aberturas (Audilla; Wizaka; Prawata, 2021; Meroney, 2009). Um projeto adequado que considera a ventilação natural de maneira estratégica pode aumentar a eficiência energética e melhorar a qualidade do ambiente interno, ao otimizar a distribuição interna e trocas de ar (Heiselberg, 2004; Remion; Moujalled; El Mankibi, 2019).

O desempenho da ventilação natural impulsionada pelo vento é significativamente influenciado pelas condições de contorno estabelecidas para o vento. Em situações reais, a direção do vento varia constantemente, tornando essencial incluir experimentos e simulações (Ji *et al.*, 2011).

Em estudos mais específicos sobre ventilação natural, foram conduzidas análises da influência do tipo de abertura no perfil de velocidades, pressão e temperatura do ar interno (Cuce *et al.*, 2019; Widiastuti *et al.*, 2020), do posicionamento das aberturas (Bittar *et al.*, 2023) e do comportamento de torres de vento em edificações (Carreto-Hernandez *et al.*, 2022).

A influência da posição das aberturas e de dispositivos como venezianas e marquises é evidenciada em diversos estudos, com foco na distribuição do escoamento de ar, velocidade e taxas de ventilação. Meroney (2009) investigou diferentes configurações de aberturas, concluindo que a correta disposição das entradas e saídas de ar pode dobrar a eficiência da ventilação. Bittar *et al.* (2023) identificaram que a ventilação cruzada é mais eficiente quando as aberturas são posicionadas estrategicamente de forma a criar uma diferença de pressão significativa entre entrada e saída. Por meio de simulações CFD, os autores mostraram que janelas dispostas na diagonal aumentam a velocidade do ar interno em comparação com configurações paralelas. Isso evidenciou que o posicionamento estratégico é mais eficaz do que aumentar o número de aberturas.

Aberturas localizadas mais próximas ao teto, favorecem a exaustão do ar quente, enquanto as inferiores maximizam a entrada de ar fresco, resultando em

um melhor controle térmico do ambiente interno (Karava; Stathopoulos; Athienitis, 2011; Kosutova *et al.*, 2019). Entretanto, a posição ideal das aberturas varia conforme a orientação do edifício e a direção predominante dos ventos. Zhou *et al.* (2014) destacam que o posicionamento ideal das aberturas deve considerar a orientação do edifício, bem como o número, tamanho e localização das janelas para maximizar o efeito da ventilação natural.

Widiastuti *et al.* (2020) reforçam que a escolha do tipo de abertura afeta diretamente o desempenho térmico do edifício, sendo que janelas do tipo veneziana permitem maior controle sobre a entrada e dissipação de calor.

A presença de venezianas e marquises também influencia a ventilação natural, pois altera a distribuição de pressão nas fachadas. Estudos como o de Tai *et al.* (2022), mostram que a variação do ângulo das venezianas pode otimizar a taxa de ventilação e melhorar a distribuição do escoamento interno. Loche *et al.* (2024) destacam que a inclusão de varandas e marquises pode contribuir para a ventilação natural, ao canalizar fluxos de ar, reduzindo a carga térmica interna e melhorando o conforto térmico dos ocupantes.

Outro fator identificado que influencia o desempenho da ventilação natural é a forma das fachadas. Morais e Labaki (2017) analisaram diferentes tipologias de habitações do programa Minha Casa, Minha Vida, considerando o efeito de três ângulos de incidência do vento na velocidade do ar interno. Os resultados mostraram que tipologias com fachadas monolíticas, sem reentrâncias, apresentaram menor desempenho de ventilação natural, enquanto tipologias com aberturas bem distribuídas e reentrâncias estrategicamente posicionadas permitiram melhor aproveitamento do fluxo de ar nos cômodos. As autoras destacaram que a velocidade do ar no interior das edificações está diretamente relacionada ao posicionamento das janelas e às diferenças de pressão entre as fachadas.

A maior parte dos trabalhos revisados englobou a análise da ventilação natural no contexto de edificações isoladas, com foco no escoamento interno. Entretanto, as condições do terreno e do entorno da edificação influenciam no regime de vento que incide na construção. Bardhan *et al.* (2018) investigaram o impacto das edificações vizinhas no fluxo de vento incidente sobre parte de um conjunto habitacional de baixa renda composto por diversos edifícios baixos. As análises do escoamento externo, ao redor dessas edificações, permitiram

observar como diferentes configurações de layout urbano impactam na ventilação dos espaços internos.

Os autores compararam três diferentes arranjos de edificações, sendo um layout base, representativo da configuração existente, e outras duas propostas de alternativas. Eles destacaram que um dos fatores mais críticos para a ventilação natural é a relação entre a altura dos edifícios e a largura das ruas ou espaços entre eles, conhecida como razão de aspecto do cânion urbano. Quando essa razão é alta (edifícios muitos próximos e altos em relação à largura das ruas), há redução na penetração do vento em níveis mais baixos, criando zonas de ar estagnado. Isso reforça a necessidade de planejamentos urbanos que considerem a morfologia do espaço e permitam a ventilação adequada.

A ventilação natural também é influenciada pelos coeficientes de pressão do vento (C_p), que representam a relação entre a pressão do vento na superfície do edifício e a pressão dinâmica do escoamento de ar a montante. A revisão de literatura identificou diferentes abordagens, incluindo a utilização de C_p em simulações computacionais, sua validação por meio de experimentos em túnel de vento e CFD e sua influência na taxa de renovação do ar e conforto térmico interno.

Xie *et al.* (2023) discutiram a importância da correta aplicação dos coeficientes de pressão na simulação da ventilação natural em ferramentas BES, como programa *EnergyPlus*, destacando que erros na atribuição dos C_p s podem levar a desvios significativos nos resultados de taxa de ventilação. O estudo identificou três principais fontes de erro que podem comprometer a precisão das simulações. O primeiro está relacionado ao uso do coeficiente de pressão na altura de referência com velocidades de vento medidas na altura da abertura, em vez da altura de referência do edifício, o que gera inconsistências nos cálculos. O segundo erro decorre das diferenças nos perfis de vento entre os modelos computacionais e os experimentos utilizados para derivar os coeficientes de pressão, o que pode levar a estimativas incorretas da ventilação. O terceiro problema identificado refere-se ao uso de velocidades de vento urbanizadas sem a devida correção dos C_p s, o que pode resultar tanto em superestimação quanto em subestimação da ventilação natural.

Em relação ao método de determinação dos coeficientes de pressão, alguns autores adotaram uma abordagem de decomposição do domínio

computacional, considerando uma primeira simulação CFD para determinação do escoamento externo à edificação, considerando as aberturas (janelas/portas) fechadas, e uma segunda simulação voltada ao estudo do escoamento interno à edificação (Kurabuchi; Ohba; Nonaka, 2009; Meroney, 2009).

Esse método de decomposição do domínio é uma alternativa para diminuir o custo computacional, mas, pode levar a erros consideráveis, uma vez que a hipótese de tal abordagem se baseia na ideia de que a distribuição da pressão nas fachadas da edificação não é afetada pela presença de aberturas e que o efeito da pressão dinâmica no fluxo de ar que passa pelas aberturas de entrada pode ser desconsiderado. Porém, essa ideia não se mostrou adequada quando aplicada para aberturas grandes (Ramponi; Blocken, 2012).

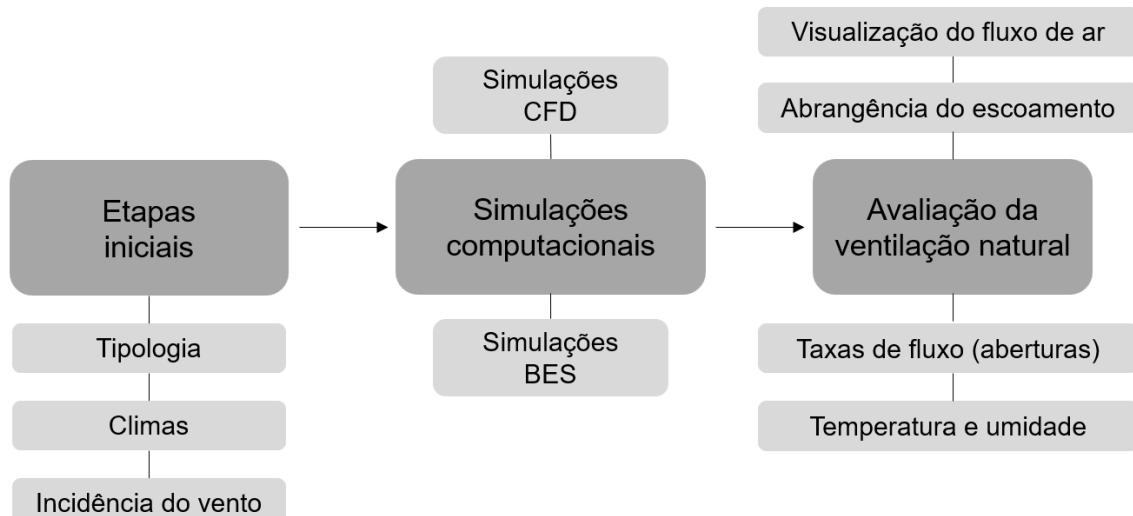
A ventilação natural depende do desenho arquitetônico, incluindo a forma do edifício e o posicionamento das aberturas, que influenciam o conforto térmico e a eficiência energética da edificação. A ventilação impulsionada pelo vento varia conforme as condições do entorno e layout urbano, sendo essencial considerar a orientação do edifício e a disposição estratégica das janelas.

Conforme mostrado, elementos como venezianas, marquises e reentrâncias nas fachadas podem otimizar o escoamento do ar. A proximidade entre edificações afeta a ventilação, destacando a importância do planejamento urbano. Além disso, a correta aplicação dos coeficientes de pressão é crucial para a precisão da avaliação da ventilação natural por meio das simulações computacionais.

3 MÉTODOS

O desenvolvimento desta pesquisa se dividiu em três partes: etapas iniciais, simulações computacionais e procedimentos de avaliação da ventilação natural. A Figura 3 apresenta o organograma de divisão das etapas da pesquisa.

Figura 3 - Organograma das etapas da pesquisa



Fonte: elaborado pela autora (2024).

Inicialmente, foi feita a delimitação do objeto de estudo, a partir do trabalho de caracterização de tipologias representativas de edifícios para projetos de interesse social no Brasil (Triana; Lamberts; Sassi, 2015), considerando características construtivas da edificação de referência estipuladas pela ABNT NBR 15.575/2021. Ainda, nessa etapa preliminar, foram definidos os contextos climáticos para a investigação do comportamento da ventilação natural no objeto de estudo.

Então, definiram-se os casos de estudo, considerando diferentes ângulos de incidência do vento (0° , 90° , 180° e 270°), para avaliação da ventilação natural, por meio de análises detalhadas utilizando Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD).

As simulações computacionais englobaram as sub etapas de pré-processamento, processamento e pós-processamento, com divisão em duas frentes: aplicação da ferramenta CFD, para as análises do comportamento do escoamento do ar e determinação dos coeficientes de pressão, e

complementação do estudo das temperaturas e umidade relativa, por meio de um programa específico para simulação termoenergética de edifícios (BES).

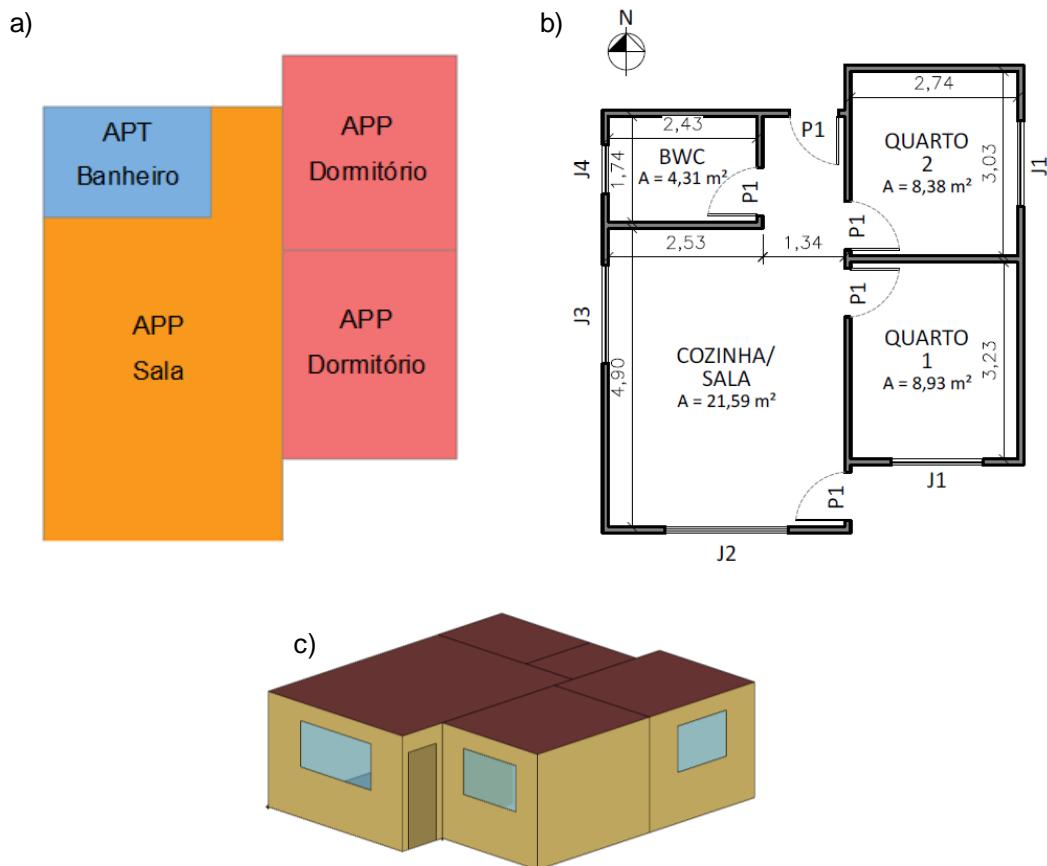
Por fim, avaliou-se a ventilação natural na HIS estudada. A análise qualitativa compreendeu a visualização do escoamento do ar, interno e externo, para os quatro cenários investigados de incidência do vento. De maneira quantitativa, investigaram-se a abrangência do escoamento, taxas de ventilação nas aberturas, temperaturas internas e umidade relativa interna dos ambientes.

3.1 ETAPAS INICIAIS

3.1.1 Caracterização do objeto de estudo

O caso base delimitado para o presente estudo, corresponde ao projeto representativo de uma Habitação de Interesse Social (HIS), a partir do estudo conduzido por Triana, Lamberts e Sassi (2015), apresentada na Figura 4.

Figura 4 - Representação gráfica dos APP e APT (a); planta baixa (b); perspectiva da edificação (c).



Fonte: adaptado de Triana, Lamberts e Sassi (2015).

A tipologia estudada consiste em uma edificação residencial unifamiliar, composta por dois dormitórios, um banheiro e uma sala e cozinha conjugadas. A escolha dessa tipologia se deve à relevância desse tipo de construção no cenário brasileiro de habitações, representando 35% das principais tipologias identificadas com maior frequência de ocorrência na faixa de renda 1 do programa social Minha Casa Minha Vida (Triana; Lamberts; Sassi, 2015).

A orientação solar do projeto representativo considera a fachada principal, que corresponde aos ambientes sala e dormitório 1, voltada para a direção sul. A planta baixa, a perspectiva e a representação gráfica dos ambientes de permanência prolongada (APP) e transitória (APT), conforme Figura 4.

A Tabela 1 apresenta as áreas úteis de cada ambiente, bem como a área total da edificação.

Tabela 1 - Área útil dos ambientes e da edificação

Ambiente	Área útil [m ²]
Estar (cozinha, sala e circulação)	21,59
Quarto 1	8,93
Quarto 2	8,38
Banheiro	4,31
Área total UH	43,21

Fonte: adaptado de Triana, Lamberts e Sassi (2015).

As características geométricas do caso base incluem: pé-direito de 2,50 m, esquadrias compostas por metal e vidro simples comum incolor. Não são consideradas venezianas nas aberturas e as portas internas e externas são de madeira, com 0,80 m de largura e 2,10 m de altura, com folha única de giro. Todas as janelas da edificação, com exceção do banheiro, são de correr com duas folhas e peitoril de 1,10 m. No banheiro, a janela é do tipo pivotante, com eixo horizontal superior e peitoril de 1,60 m. Demais características relacionadas às janelas são apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1 - Parâmetros geométricos das janelas da edificação

Ambiente	Nome	Área de abertura [m ²]	Orientação
Sala (estar e cozinha)	J2	2,02	Sul
	J3	1,62	Oeste
Dormitório 1	J1	1,51	Sul
Dormitório 2	J1	1,51	Leste
Banheiro	J4	0,48	Oeste

Fonte: adaptado de Triana, Lamberts e Sassi (2015).

3.1.2 Localidades e climas

Levando em consideração a diversidade climática existente no país (ABNT, 2024) e as faixas de temperatura para avaliação do desempenho térmico da edificação (ABNT, 2021), foram selecionadas cidades representativas de regiões consideradas quentes e úmidas, de regiões litorâneas. As cidades selecionadas para o presente estudo foram Recife-PE, localizada no nordeste brasileiro e Joinville-SC, na região sul do país. O Quadro 2 apresenta as zonas bioclimáticas (ABNT, 2024a) para cada cidade, a tipologia climática conforme a classificação de Köppen-Geiger e suas respectivas médias anuais de temperatura de bulbo seco (TBS).

Recife está inserida no clima tropical quente de monção (Am), caracterizado por alto índice de chuvas durante o verão. Joinville, apresenta clima temperado com verão quente e sem estação seca (Cfa). Pelo zoneamento bioclimático brasileiro, Recife está dentro da ZB 5A, representando uma localidade quente e úmida, enquanto Joinville está inserida na ZB 3A, região caracterizada como mista e úmida.

Quadro 2 - Cidades, zonas bioclimáticas, classificação Köppen-Geiger e TBS

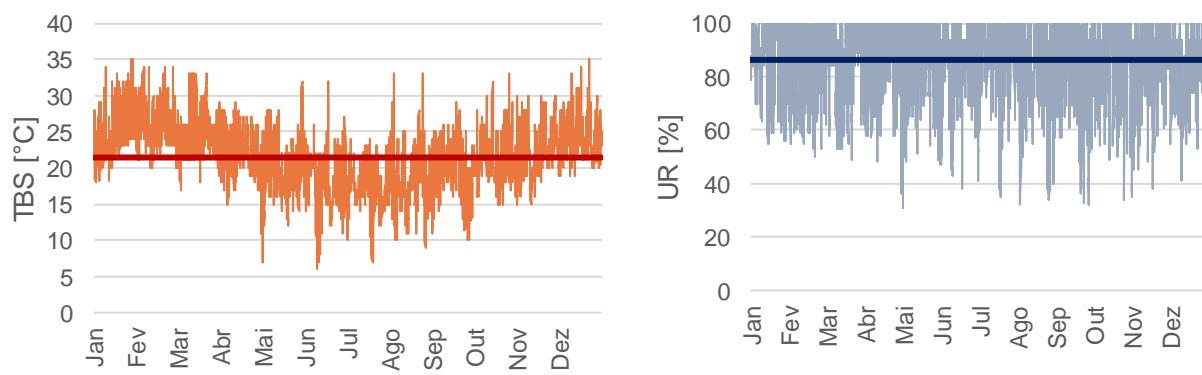
Cidade	NBR 15220 ZB	Classificação Köppen-Geiger	TBS média [°C]	Latitude	Longitude
Joinville	3A	Cfa – Temperado úmido	21,35	-26,22400	-48,79700
Recife	5A	Am – Tropical quente de monção	25,73	-8,12600	-34,92400

Fonte: elaborado pela autora (2024).

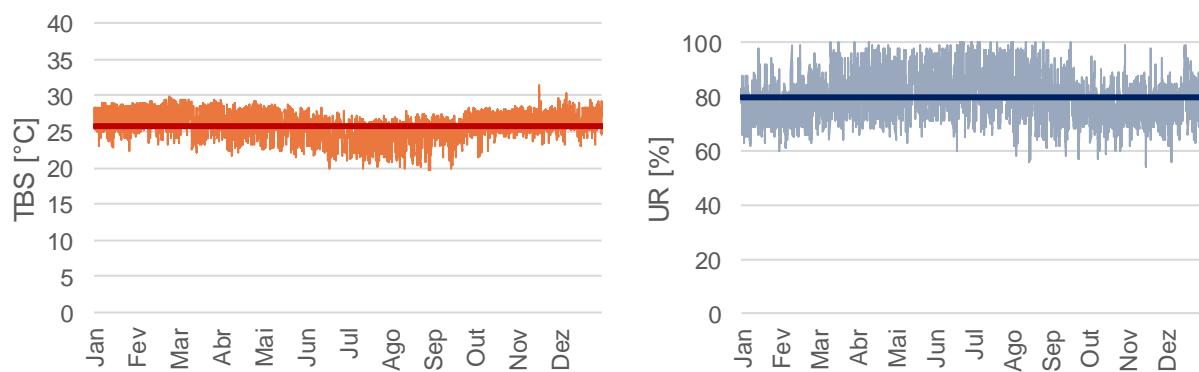
As variações de TBS e umidade relativa (UR) são apresentadas na Figura 5 para cada cidade. Esses dados foram gerados a partir dos arquivos climáticos do tipo *Typical Meteorological Year* (TMY), que se refere a conjuntos de dados climáticos representativos de condições médias de uma determinada localidade (Crawley; Lawrie, 2021). As temperaturas para Joinville apresentam maior amplitude térmica ao longo do ano, com extremos chegando a 35°C e 7°C. A umidade se mantém elevada durante todo o ano, com valores frequentemente acima de 80% e poucas variações flutuações diárias que indicam quedas temporárias, com valores raramente abaixo de 60%.

Figura 5 – Variação anual de TBS e UR para a) Joinville e b) Recife

a) Joinville



b) Recife



Fonte: elaborado pela autora (2024), a partir de (Crawley; Lawrie, 2021)

Recife apresenta uma faixa de temperatura mais estável, variando entre 20°C e 30°, com média anual em torno de 26°C, o que caracteriza um clima quente. A UR para Recife apresenta valores elevados durante o ano inteiro,

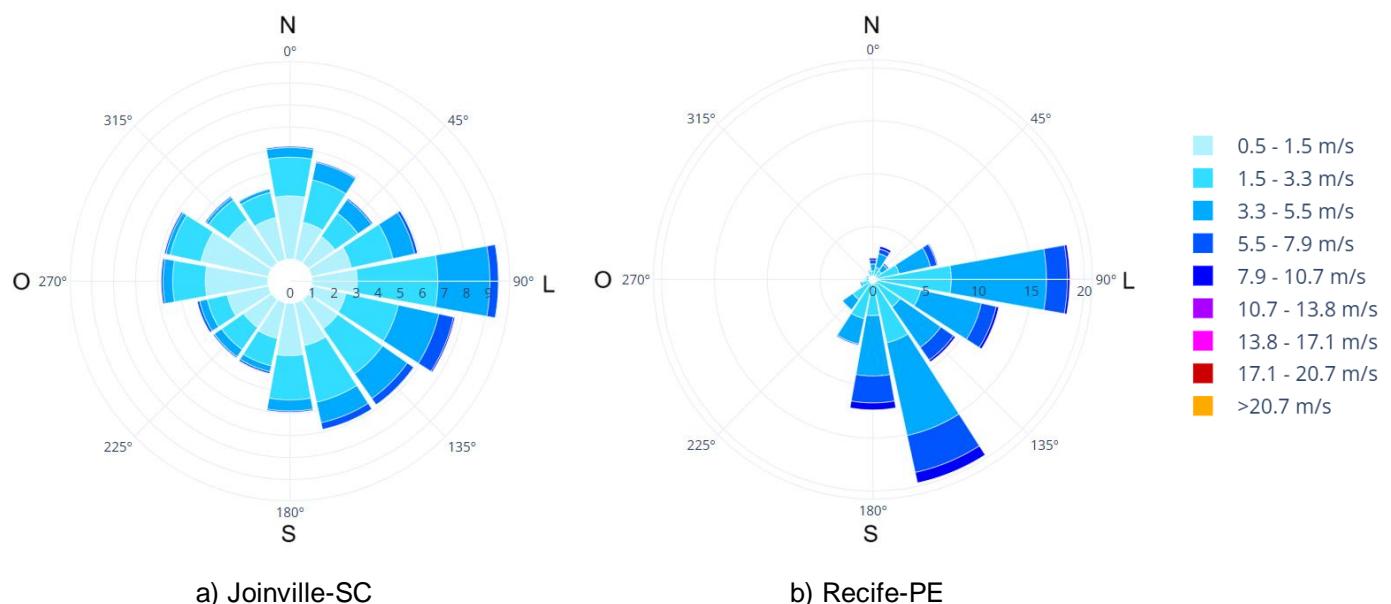
situando-se entre 70% e 90%. As variações diárias e sazonais são relativamente pequenas, mantendo o ambiente constantemente úmido.

De acordo com a NBR 15.220-3 (ABNT, 2024a), a ventilação natural cruzada se apresenta como estratégia relevante para ambas as localidades, uma vez que a alta umidade relativa pode dificultar a dissipação de calor pelo corpo humano, aumentando a sensação de desconforto em dias quentes.

A partir da ferramenta aberta *CBE Clima Tool* (Betti et al., 2023) foram gerados os gráficos de ventos incidentes para ambas as localidades (Figura 6). Tal procedimento deu-se pela inserção dos arquivos climáticos das duas localidades na ferramenta.

Para a localidade de Joinville, os ventos predominantes são provenientes da direção Leste (90°), com uma intensidade mais elevada em comparação com as outras direções. Isso demonstra a influência de ventos marítimos, dado que Joinville está relativamente próxima ao litoral. Os ventos do quadrante Sul-Leste (entre 90° e 135°), também apresentam contribuição significativa, mas em menor intensidade.

Figura 6 - Rosa dos ventos para a) Joinville-SC e b) Recife-PE



Fonte: elaborado pela autora (2024).

Os ventos predominantes na cidade estão na faixa de velocidade entre 1,5 m/s e 5,5 m/s. Há uma menor ocorrência de ventos mais fortes, entre 5,5 m/s

e 7,9 m/s. A direção Leste apresenta as maiores velocidades, indicando que é a principal rota para ventos mais intensos. Ventos provenientes do quadrante Oeste e Noroeste são mais fracos, entre 0,5 m/s e 1,5 m/s, e de menor frequência.

Em Recife, os ventos predominam do setor Leste (90°), seguido pelo quadrante Sul-Leste (entre 90° e 135°). A maior frequência dos ventos ocorre na faixa de velocidade entre 3,3 m/s e 7,9 m/s. Há registros de ventos com velocidades mais elevadas, entre 7,9 m/s e 10,7 m/s, ainda que menos frequentes, indicando um padrão constante de ventos marítimos. As direções Oeste e Noroeste apresentam as menores ocorrências de ventos, reforçando a característica litorânea da cidade.

3.1.3 Variáveis para análise

A fim de estudar o comportamento da ventilação natural no interior da HIS, foi considerada a variação do ângulo de incidência do vento na residência. A geometria do caso base foi fixada para os demais casos (0°, 90°, 180° e 270°) analisados por meio da ferramenta de CFD.

O Quadro 3 apresenta as configurações de incidência do vento para cada caso analisado pela ferramenta CFD.

A comunicação entre todos os cômodos da edificação foi estabelecida com as portas internas abertas. Todas as aberturas externas da edificação foram mantidas abertas durante o período de simulação, incluindo as portas e a janela do banheiro.

Para cada um dos quatro casos de incidência de vento, foram obtidos os coeficientes de pressão médios (C_p) para cada abertura, calculados pela integral dos valores dos C_p s nas superfícies das janelas e portas externas. Estes valores, então, serviram como parâmetros de entrada para as simulações termoenergéticas.

Quadro 3 - Configurações de incidência de vento

Caso	Incidência do vento	Caso	Incidência do vento
0°		90°	
180°		270°	

Fonte: elaborado pela autora (2024).

Os coeficientes de pressão foram obtidos pelo cálculo da integral da média ponderada pela área de cada superfície, retornando, assim, um valor médio para os Cps. A média ponderada por área de uma quantidade é calculada dividindo a soma do produto da variável de campo selecionada (no caso, o coeficiente de pressão, Cp) e da área superficial externa de cada célula, A_i , pela área total da superfície, A (Equação 1).

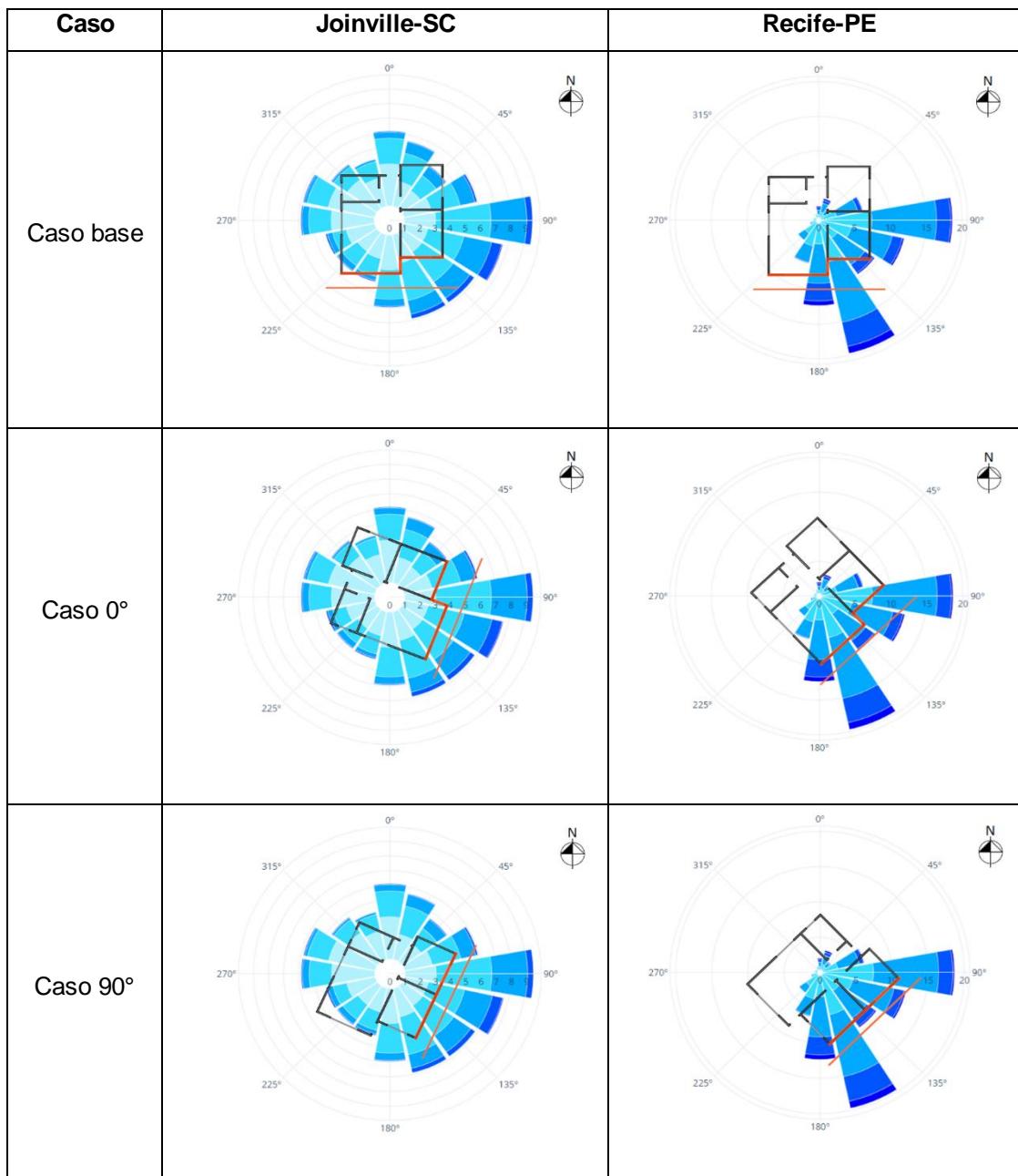
$$\frac{1}{A} \int Cp dA = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^n Cp_i |A_i| \quad (1)$$

A interação entre ventilação natural e orientação solar foi avaliada por meio das simulações BES, considerando os quatro casos de incidência de vento analisados por CFD (0°, 90°, 180° e 270°), com as fachadas posicionadas perpendicularmente à direção predominante dos ventos em cada localidade. Além desses quatro casos, também foi simulada a orientação solar do caso base (Quadro 4).

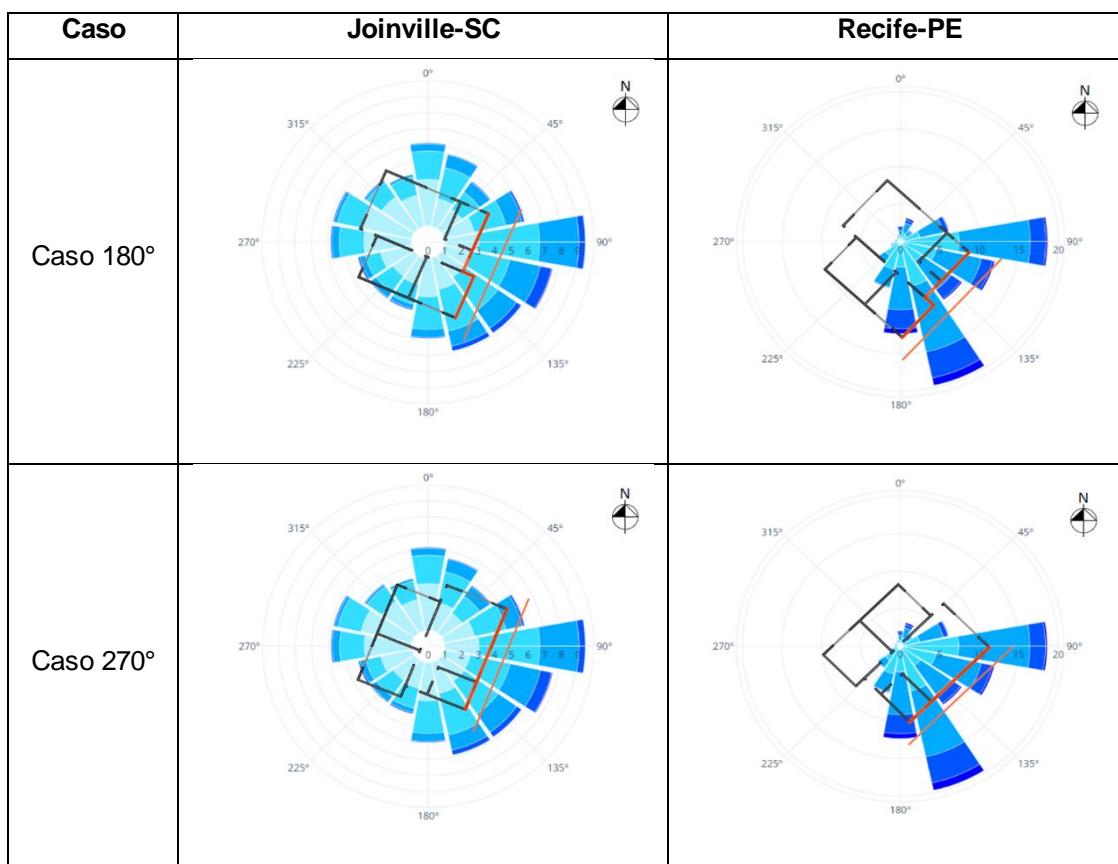
A definição das orientações foi feita a partir dos dados climáticos apresentados em 3.2, considerando o ângulo de orientação solar que

proporciona maior incidência de ventos. Para Joinville, o ângulo definido para orientação das fachadas foi de 110° e para Recife, considerou-se a orientação de 135°, ambas no quadrante Sul-Leste.

Quadro 4 - Orientação solar da HIS com base na incidência de ventos para cada localidade



Quadro 4 - continuação



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

3.2 SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

A simulação computacional representa um método de teste dos elementos integrantes de um projeto, para avaliar como será a performance desses elementos sob certas condições específicas que se aproximam da realidade. Isto é feito com a utilização de modelos matemáticos numéricos que recriam essas condições dentro de um ambiente virtual (Zhou; Ooka, 2022).

No contexto da simulação termoenergética de edificações (BES), informações como clima, luminosidade, perfis de ocupação e parâmetros termofísicos dos materiais contemplam o grupo de dados de entrada para o modelo numérico e, então, obter dados de saída como temperaturas internas e consumo de energia.

No entanto, as simulações BES apresentam algumas limitações, devido à sua natureza unidimensional para o desenvolvimento dos cálculos, baseando-se em modelos simplificados de rede de fluxo (DOE, 2023), em que as zonas

térmicas são representadas como nós conectados por caminhos de fluxo (portas, janelas, frestas etc.). Já a Dinâmica dos Fluidos Computacional utiliza métodos numéricos que modelam o comportamento dos fluidos e suas interações com superfícies, considerando as três dimensões. Assim, as simulações CFD fornecem dados de campo completos, ou seja, dados sobre parâmetros relevantes em cada ponto do domínio computacional, permitindo visualizar padrões de fluxo como vórtices, estratificação térmica e zonas de recirculação.

Por isso, foram conduzidas simulações CFD para complementar e ampliar o entendimento do comportamento do vento incidente em uma edificação, de modo a superar a limitação da simulação da ventilação natural pela ferramenta BES.

3.2.1 *Building Energy Simulation* (BES)

O comportamento térmico de uma edificação é determinado a partir de ferramentas que utilizam modelos matemáticos, capazes de simular as trocas de calor por condução, convecção e radiação que ocorrem entre os ambientes internos e externo. Essas simulações computacionais são conhecidas como *Building Energy Simulation* (BES) e, entre as ferramentas disponíveis, o programa computacional *EnergyPlus*, desenvolvido pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos, se destaca pela flexibilidade de modelagem, sendo uma fusão dos programas *BLAST* e *DOE-2* (Sousa, 2020).

Para garantir a consistência dos resultados, é fundamental a definição de parâmetros iniciais responsáveis por governar os aspectos básicos das simulações a serem realizadas. Os itens a seguir descrevem as condições comuns a todos os modelos simulados neste estudo com o programa *EnergyPlus* 23.1.0.

3.2.1.1 *Controle de simulação e iteração*

Para as simulações realizadas neste estudo, adotou-se como parâmetro a utilização de dados anuais provenientes do arquivo climático, uma vez que a análise foi conduzida com base em um ciclo completo de um ano, para as duas localidades consideradas.

O intervalo de iteração (*time step*) refere-se à frequência com que os cálculos de transferência de calor são executados dentro do intervalo predefinido de uma hora. Quanto maior o número de *time steps* por hora, maior a precisão dos resultados. Neste caso, foi adotado um total de 20 *time steps* por hora, o que equivale a um intervalo de três minutos entre cada iteração (0,05 h).

3.2.1.2 Coeficiente de convecção superficial

O *EnergyPlus* possibilita a escolha de diferentes modelos para o cálculo dos coeficientes de convecção nas superfícies voltadas para o interior e exterior das zonas térmicas. Para esta pesquisa, foi selecionado o algoritmo TARP, que considera a convecção natural variável com base na diferença de temperatura do ar entre as superfícies internas e da zona térmica, conforme a equação abaixo (2).

$$h = 1,31|\Delta T|^{1/3} \quad (2)$$

Para o coeficiente de convecção natural para as superfícies externas, foi escolhido o algoritmo DOE-2, que estabelece correlações para superfícies lisas (Equação 3) e rugosas (Equação 4).

$$h_c = \sqrt{h_n^2 + aV_z^b} \quad (3)$$

onde h_c é o coeficiente de convecção externa, h_n é o coeficiente de transferência de calor convectivo natural, a é uma constante com dimensão $[W/(m^2.K.m/s)^b]$ e b é uma constante adimensional.

$$h_c = h_n + R_f(h_{c,glass} - h_n) \quad (4)$$

onde h_c é o coeficiente de convecção externa, h_n é o coeficiente de transferência de calor convectivo natural e R_f é a constante de rugosidade da superfície adimensional.

3.2.1.3 Algoritmo de balanço térmico

O algoritmo de balanço térmico padrão para simulação termoenergética com o *EnergyPlus* é o *Conduction Transfer Function Model* (CTF), que calcula a condução de calor transiente através de uma camada de material homogênea com superfícies de propriedades térmicas constantes. No entanto, esse modelo não considera os efeitos de transporte e armazenamento de umidade, o que pode causar uma lacuna nos resultados de desempenho da edificação (Araújo; Souza; Gomes, 2022).

Existem dois modelos higrotérmicos disponíveis no *EnergyPlus*, sendo eles *Effective Moisture Penetration Depth Model* (EMPD) e *Combined Heat and Moisture Transfer Model* (HAMT). Esse último demanda maior tempo de simulação para as análises, porém, é esperado ser mais realista fisicamente na modelagem de transporte e armazenamento de umidade do que o modelo EMPD (Araújo; Souza; Gomes, 2022).

Para a condução das simulações BES, utilizou-se o modelo HAMT, que consiste em um algoritmo de solução de transferência de calor e umidade combinado, unidimensional, de elementos finitos, que simula o movimento e armazenamento de calor e umidade em superfícies simultaneamente dos ambientes interno e externo.

Para validar o modelo HAMT em simulações termoenergéticas, Farias, Disconzi e Borghi (2024) realizaram um experimento com medições locais de temperatura e umidade em uma sala de um edifício da Universidade do Estado de Santa Catarina, localizado na cidade de Joinville-SC. Utilizaram-se dataloggers posicionados interna e externamente ao ambiente. Os dados experimentais foram comparados com simulações dos modelos CTF e HAMT, tendo este último apresentado resultados mais alinhados aos valores medidos, especialmente para temperatura, apesar de apresentar diferença de até 10 pontos percentuais na umidade relativa. O modelo CTF superestimou temperaturas e divergiu nos dados de umidade, enquanto o HAMT demonstrou maior precisão, embora sensível ao teor inicial de umidade inserido para cada material componente da envoltória. As limitações do experimento incluíram o curto período de medição e a estabilidade das condições climáticas.

Além de simular os efeitos do amortecimento de umidade, o HAMT também é capaz de fornecer perfis de temperatura e umidade através das paredes e ajudar a identificar superfícies com alta umidade superficial (DOE, 2023).

As equações utilizadas por esse modelo são derivadas de equações de equilíbrio de calor e umidade (equações 5 e 6) e foram extraídas de Künzel (1995). Elas descrevem um modelo teórico para a transferência de calor e umidade através de um material (DOE, 2023).

$$\frac{\partial H}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k^w \frac{\partial T}{\partial x} \right) + h_v \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\delta}{\mu} \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (5)$$

Os três termos da equação 5 descrevem o armazenamento, transporte e geração de calor, respectivamente, sendo $\frac{\partial H}{\partial T}$ a capacidade de armazenamento de calor dependente da umidade, T a temperatura, k^w a condutividade térmica dependente da umidade, h_v a entalpia de evaporação da água (2.489 kJ/kg), δ o coeficiente de difusão de vapor no ar, μ o fator de resistência à difusão de vapor, dependente da umidade (adimensional).

$$\frac{\partial w}{\partial \emptyset} \frac{\partial \emptyset}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D^w \frac{\partial w}{\partial \emptyset} \frac{\partial \emptyset}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\delta}{\mu} \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (6)$$

Os três termos da equação 6 descrevem, respectivamente, o armazenamento de umidade, o transporte de umidade líquida e o transporte de vapor, onde $\frac{\partial w}{\partial \emptyset}$ é a capacidade de armazenamento de umidade dependente da umidade, D^w é o coeficiente de transporte de líquido.

O coeficiente de difusão de vapor no ar é calculado pela equação 7, também extraída de Künzel (1995), relacionando a temperatura com a pressão atmosférica local, $P_{ambient}$.

$$\delta = \frac{2 \times 10^{-7} \times T \times 273,15^{0,81}}{P_{ambient}} \quad (7)$$

A capacidade de armazenamento de calor, dependente do teor de umidade do material, é dada pela equação 8.

$$\frac{\partial H}{\partial T} = (c\rho + c^w w) \quad (8)$$

onde c é a capacidade de calor específico do material seco, ρ é a densidade do material, c^w é a capacidade de calor específico da água (4.810 kJ/kg a 20°C).

3.2.1.4 Contato com o solo

Para simular a transferência de calor das superfícies horizontais em contato com o solo nesse estudo, considerou-se o modelo *GroundDomain:Slab*. Esse modelo simula a transferência de calor com as superfícies horizontais da edificação através do domínio do solo. O domínio pode simular a transferência de calor tanto para cenários de laje sobre o solo quanto cenários de subsolo (DOE, 2023).

Para as simulações dessa pesquisa, foram considerados os mesmos parâmetros termofísicos relacionados ao solo (condutividade térmica, densidade e calor específico), para cada caso inserido nas diferentes zonas bioclimáticas abordadas. O Quadro 5 relaciona os parâmetros termofísicos do solo, adotados nas simulações.

Quadro 5 - Parâmetros termofísicos do solo

Parâmetro	Valor
Condutividade térmica	1,2 W/m.K
Densidade	1.500 kg/m ³
Calor específico	1.300 J/kg.K

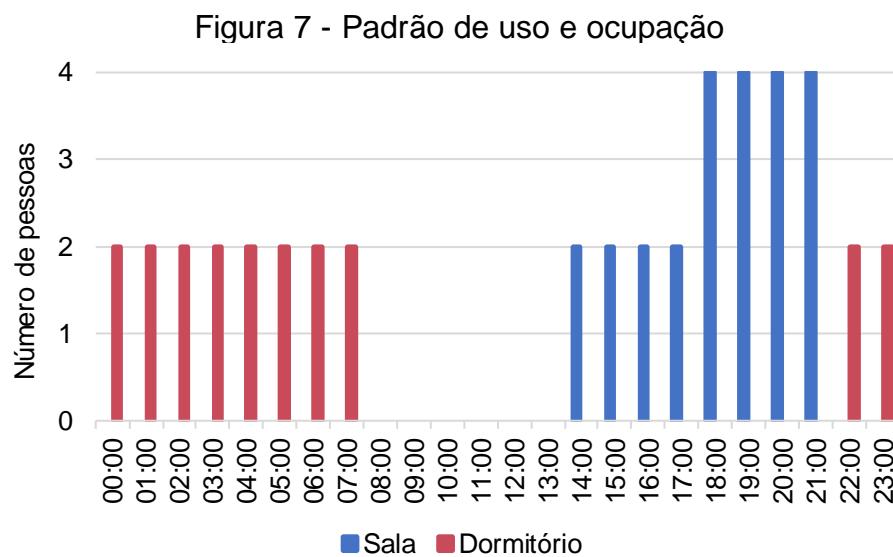
Fonte: elaborado pela autora, 2024.

3.2.1.5 Condições de operação

A operação da edificação está relacionada com as interações dos indivíduos que ocupam essa edificação com o próprio espaço. Essas interações são divididas em padrões de uso e ocupação, ou seja, como e quando as

pessoas utilizam os ambientes; acionamento e/ou desligamento dos sistemas de iluminação; utilização de equipamentos elétricos.

Abaixo, são relacionados todos os padrões de operação considerados nos modelos simulados, para todos os dias da semana (Figura 7, Quadro 6, Quadro 7, Quadro 8). Esses padrões seguiram as recomendações para avaliação da edificação por simulação computacional, estipuladas pela NBR 15.575 (ABNT, 2021).



Fonte: elaborado pela autora (2024).

Quadro 6 - Padrão de uso e potência dos equipamentos

Ambiente	Período de uso	Potência [W]
Sala	14:00 até 21:59	120

Fonte: adaptado de ABNT (2021).

Quadro 7 - Padrão de uso do sistema de iluminação

Ambiente	Período de uso	Densidade de potência instalada [W/m ²]
Sala	Durante ocupação	5,0
Dormitório	Durante ocupação	5,0

Fonte: adaptado de ABNT (2021).

Quadro 8 - Taxa metabólica para os usuários

Ambiente	Período de uso	Atividade realizada	Calor produzido [W/m ²]	Calor produzido para área de pele = 1,80 m ² [W]
Sala	Durante ocupação	Sentado ou assistindo TV	60	108
Dormitório	Durante ocupação	Dormindo ou descansando	45	80

Fonte: adaptado de ABNT (2021).

3.2.1.6 Parâmetros termofísicos

Os parâmetros termofísicos apresentados nessa seção são considerados para a envoltória do caso base e dos demais casos (Quadro 9). Os valores considerados foram retirados da NBR 15.575 (ABNT, 2021), considerando os parâmetros indicados para o modelo de referência da norma, no procedimento de simulação computacional.

Quadro 9 - Parâmetros termofísicos dos elementos da envoltória da HIS

Elemento construtivo	Espessura [m]	Condutividade térmica [W/m.K]	Densidade [kg/m ³]	Calor específico [J/kg.K]	Absortividade solar
Paredes externas (concreto)	0,10	1,75	2.200	1.000	0,58
Paredes internas (concreto)	0,10	1,75	2.200	1.000	0,50
Telha cerâmica	0,006	1,05	2.000	920	0,65
Portas (madeira)	0,03	0,15	600	1.340	0,50
Lajes (concreto)	0,10	1,75	2.200	1.000	0,50

Fonte: adaptado de ABNT (2021).

A partir das densidades dos materiais da edificação, apresentados no Quadro 9, foram calculados os teores de umidade mássico para cada material

(massa de água por massa de material), conforme apresentado no Quadro 10. As curvas de teor de umidade volumétrica (massa de água por volume de material), para cada material, foram obtidas pelo programa *WUFI Light 6.7*.

Quadro 10 - Teor inicial de água dos materiais da envoltória

Material	Concreto	Telha cerâmica
Teor inicial de umidade [kg/kg]	0,056555	0,13425

Fonte: elaborado pela autora (2024).

3.2.2 Dinâmica computacional dos fluidos (CFD)

Em relação a outros métodos, a dinâmica computacional dos fluidos tem sido cada vez mais aplicada em estudos para investigar a ventilação natural em edificações, por ser uma opção econômica, ágil e capaz de gerar um volume maior de informações, como dados detalhados do campo do escoamento (Blocken, 2018; Karava; Stathopoulos; Athienitis, 2011; Meroney, 2009; Zhang; Weerasuriya; Tse, 2020).

As simulações CFD aplicadas a essa pesquisa foram conduzidas com a utilização de uma malha de alta resolução, a fim de capturar o comportamento detalhado do escoamento do ar no interior da edificação estudada.

O código de volumes finitos *ANSYS Fluent 2024 R2* foi utilizado para as simulações de CFD, considerando um estado transiente e regime incompressível, com as propriedades do fluido (ar) constantes. Adotou-se um passo de tempo de tempo variável entre 0,01 e 0,5 segundos e um tempo físico de simulação de 3.000 segundos.

3.2.2.1 Modelos para simulação

Para a construção do modelo 3D, adotou-se a escala real da edificação. Em contrapartida, é comum encontrar na literatura alguns trabalhos que utilizaram modelos com escala reduzida, como no caso de Meroney (2009), Derakhshan e Shaker (2016), Kosutova *et al.* (2019), Kumar *et al.* (2021).

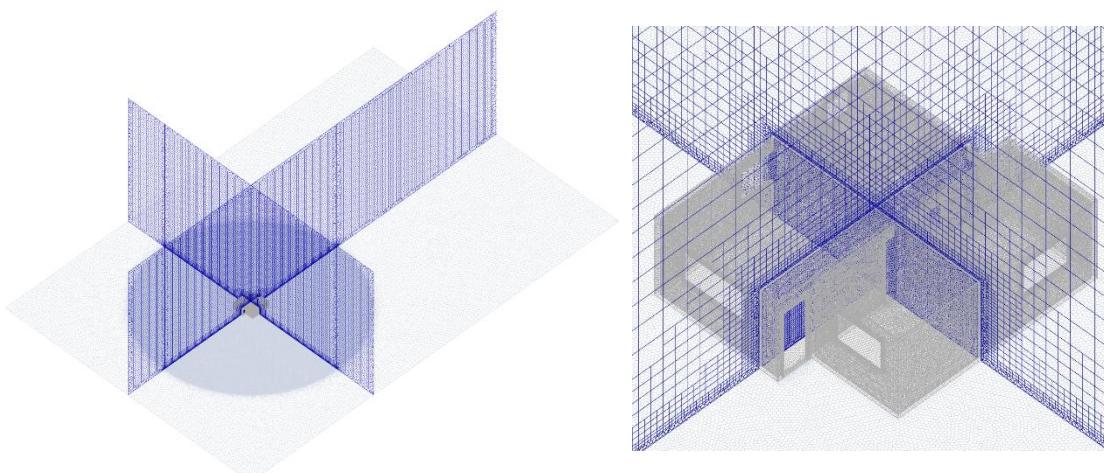
Van Hooff e Blocken (2010) destacam que, além da escala, outro fator que influencia a qualidade da simulação CFD é o método de composição do

domínio a ser utilizado no estudo da ventilação natural. Uma abordagem comumente utilizada é a de decomposição do domínio ou, simulação desacoplada. Esse método realiza duas simulações separadas, uma para o escoamento externo e outra para o escoamento interno, cada uma em seu próprio domínio computacional. Na simulação do escoamento externo, as aberturas de ventilação são fechadas e os coeficientes de pressão nas posições dessas aberturas são extraídos e usados como condição de contorno na simulação do escoamento interno. Embora seja amplamente adotado, os autores reforçam que esse método pode perder precisão devido às simplificações envolvidas.

O outro método explorado no estudo de Van Hoof e Blocken (2010) é a simulação acoplada, a qual simula simultaneamente os escoamento de ar externo e interno no mesmo domínio. Essa abordagem permite um cálculo mais preciso do escoamento do ar nas proximidades e através das aberturas. Porém, exige uma malha computacional de alta resolução, elevando o custo computacional.

O método usado no presente trabalho foi o da simulação acoplada, com uma malha computacional modelada com estrutura poliédrica, totalizando 5,7 milhões de elementos (Figura 8).

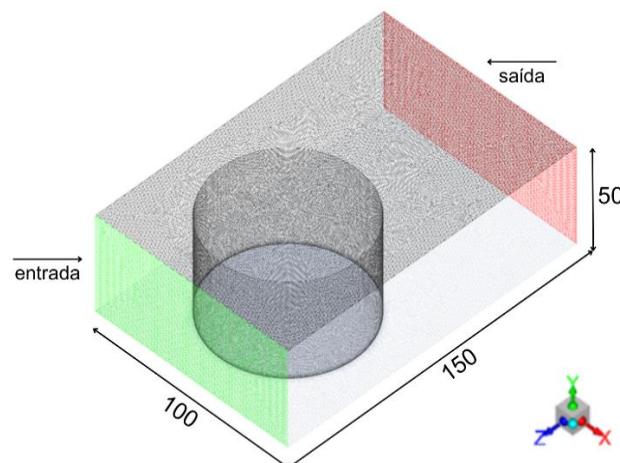
Figura 8 - Malha computacional



Fonte: elaborado pela autora (2024).

O domínio é o volume limitante da simulação, no qual o modelo está inserido. Assim, foi desenvolvido um domínio tridimensional (Figura 9) com as seguintes dimensões: largura x profundidade x altura = $100 \times 150 \times 50$ m³.

Figura 9 – Domínio computacional



Fonte: elaborado pela autora (2024).

Essas dimensões são referentes a um domínio externo retangular. Um segundo domínio cilíndrico, com malha mais refinada, foi construído dentro do domínio retangular, sendo que o modelo 3D da HIS foi posicionado de forma a conciliar seu centroide com o centro do cilindro.

Essa abordagem de refinamento da malha na região do objeto de estudo, também utilizada por Perén *et al.* (2015), permitiu a rotação da HIS em relação às diferentes incidências de vento estudadas.

3.2.2.2 Método numérico

A abordagem de volumes finitos no programa *ANSYS Fluent 2024 R2* foi utilizada para resolver as equações governantes de massa, momento e energia do escoamento turbulento. O programa *ANSYS Fluent 2024 R2* utiliza o método de volumes finitos, que divide o domínio da simulação em pequenos volumes de controle interconectados, ou células. Em seguida, calcula os valores de variáveis como velocidade e temperatura no centro de cada volume. Por fim, algoritmos

iterativos são usados para resolver as equações e alcançar uma solução convergente.

As equações governantes foram resolvidas para quantidades médias temporais, usando a abordagem de Simulação via Média de Reynolds (*Reynolds Averaged Navier-Stokes Equations* – RANS), que consistem nas equações de conservação de massa, momento linear e energia, acrescidas de termos adicionais que representam os efeitos médios das flutuações turbulentas. A conservação de massa garante que não haja acúmulo de massa no volume de controle, enquanto a conservação de momento descreve a variação do movimento do fluido em função das forças atuantes, incluindo os esforços viscosos e os tensores de Reynolds associados à turbulência. Já a equação de energia assegura o balanço entre a energia transportada e a dissipada no escoamento. As equações de conservação da massa, quantidade de movimento e energia em termos de grandezas médias são (Versteeg; Malalasekera, 1995):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial(\rho U_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i U_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \overline{\rho u_i u_j} \right] + F_i \quad (10)$$

$$\frac{\partial(\rho H)}{\partial t} + \frac{\partial(U_i \rho H)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(K \frac{\partial T}{\partial x_i} - \overline{\rho u_i h} \right) \quad (11)$$

onde ρ é a densidade, U_i é a média da componente de velocidade na direção i , μ é a viscosidade molecular, P é a média da pressão, F_i é a média das forças de corpo atuando sobre o fluido, H é a média da entalpia do fluido, K é a condutividade térmica do fluido e T é a média da temperatura. O termo $\overline{u_i u_j}$ é o tensor de Reynolds, ou o fluxo da quantidade de movimento turbulento.

Para o fechamento do modelo RANS, utilizou-se o modelo de turbulência $k-\omega$ SST para estimar o transporte turbulento seguindo o conceito de viscosidade turbulenta, μ_t . Este modelo combina as vantagens dos modelos $k-\varepsilon$ e $k-\omega$, proporcionando melhor resolução das camadas-limite próximas às superfícies e maior robustez na previsão do comportamento do escoamento em regiões de

recirculação e separação. Apesar de não ser tão utilizado quanto o modelo $k-\varepsilon$ para estudos de ventilação natural, este modelo apresentou maior concordância com dados medidos experimentalmente e se mostrou mais adequado (van Hooff; Blocken; Tominaga, 2017), principalmente para escoamentos próximos a paredes, sendo já aplicado em outros trabalhos (Derakhshan; Shaker, 2017; Kosutova *et al.*, 2019; Kumar *et al.*, 2021; Loche *et al.*, 2024; Perén *et al.*, 2015).

As equações de transporte para k e ω do modelo SST são as seguintes:

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial \rho k U_i}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} + G_k - Y_k \quad (12)$$

$$\frac{\partial \rho \omega}{\partial t} + \frac{\partial \rho \omega U_i}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} + G_\omega - Y_\omega + D_\omega \quad (13)$$

onde ρ é a densidade do fluido, U_i é a componente da velocidade média na i -direção, μ e μ_t são as viscosidades molecular e turbulenta, respectivamente. Para as equações k e ω , tem-se, respectivamente, os números turbulentos de Prandtl, σ , os termos de geração de energia, G , os termos de dissipação devido à turbulência, Y , e D_m é o termo de difusão cruzada.

Considerou-se que a convergência foi alcançada quando todos os resíduos escalonados se estabilizaram e atingiram os valores mínimos de 10^{-4} para os momentos em x , y e z , k , ω e continuidade.

3.2.2.3 Perfil de velocidade

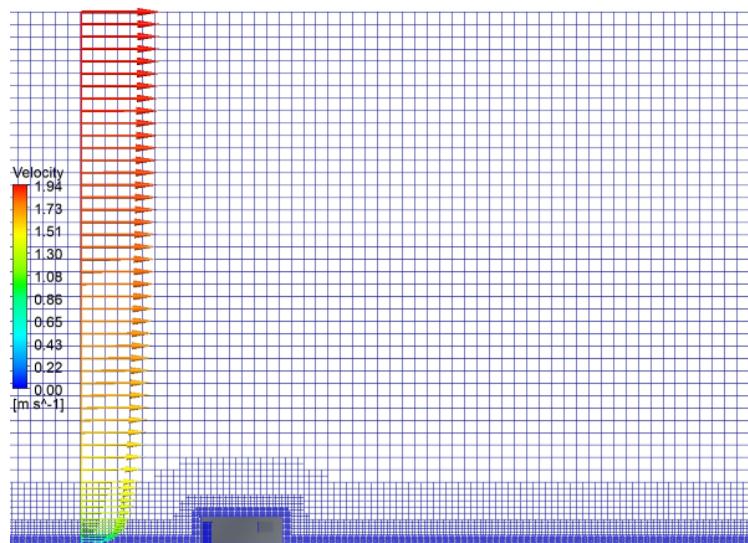
Para o perfil de velocidade do vento incidente na edificação (Figura 10), foi utilizada a lei logarítmica, considerando clima, construções urbanas e rugosidade das superfícies do terreno. O perfil de entrada da velocidade média do vento é descrito a seguir:

$$U(z) = \frac{u^*}{k} \ln \left(\frac{z + z_0}{z_0} \right) \quad (14)$$

onde u^* é a velocidade de fricção, k é a constante de Von Karman, igual a 0,40, z_0 é o comprimento de rugosidade dinâmica e z é a coordenada de altura.

A velocidade inicial do vento na entrada do domínio, considerada nas simulações, foi de 2 m/s, para uma temperatura do ar igual a 26°C.

Figura 10 - Perfil de velocidade do vento



Fonte: elaborado pela autora (2024).

3.3 AVALIAÇÃO DA VENTILAÇÃO NATURAL

O comportamento da ventilação natural para a HIS estudada foi analisado de maneira qualitativa e o desempenho de maneira quantitativa. A análise qualitativa compreendeu a visualização do escoamento do ar, interno e externo, para os cenários investigados. Para a análise quantitativa, foram consideradas a velocidade do vento interna e taxa de ventilação, temperatura interna, umidade relativa interna e temperatura e umidade da face interna das paredes da envoltória.

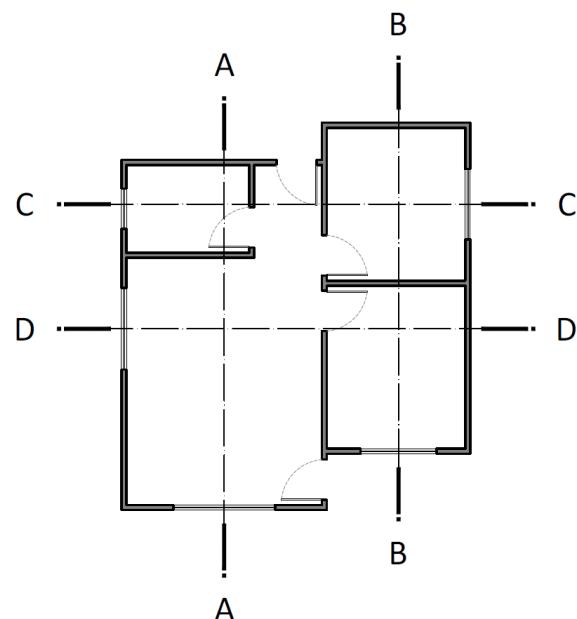
3.3.1 Comportamento do escoamento de vento

O comportamento do escoamento de vento foi analisado para dois contextos: externo e interno à edificação.

Foram definidos dois planos de corte horizontais e quatro planos de corte verticais, para possibilitar a visualização do escoamento do ar dentro dos APPs da HIS. Os planos verticais foram posicionados de maneira a cortar o centro das janelas de cada dormitório e sala (Figura 11). Os planos horizontais (Figura 12)

foram posicionados nas alturas de 0,80m e 1,60m, que representam o usuário sentado e a altura do centro da janela, respectivamente (Nascimento, 2021).

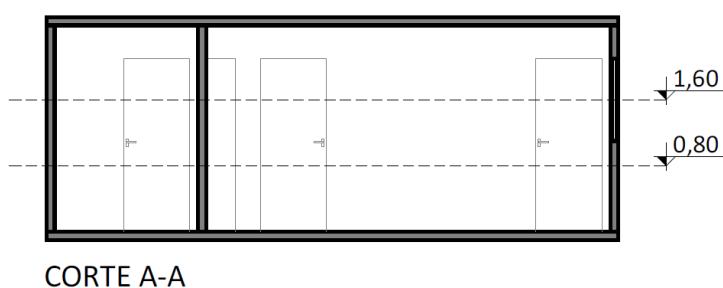
Figura 11 - Posição dos planos verticais de corte



Fonte: elaborado pela autora (2024).

A partir dos planos, foram extraídas imagens dos dois cortes horizontais e dos quatro cortes verticais, para cada caso de incidência do vento. Nas imagens, foram plotados os contornos e vetores de velocidade, além das linhas de corrente para visualização escoamento externo à edificação.

Figura 12 – Posição dos planos horizontais



Fonte: elaborado pela autora (2024).

Essa análise qualitativa permite facilitar o entendimento dos fenômenos relacionados ao escoamento, tais como: direção e padrão do escoamento do ar,

identificação de zonas de baixa ventilação (áreas de estagnação), movimentos de aceleração, presença de recirculações e ventilação cruzada.

3.3.2 Taxa de ventilação e abrangência do escoamento

Para cada APP, foram extraídos os valores das vazões volumétricas de ar em cada abertura a barlavento (abertura que permite a entrada do vento), a partir do console do *Fluent*. Com esses valores, foi calculado, para cada ângulo de incidência do vento, o valor da taxa de ventilação adimensional, DFR , para cada abertura que contribuiu para a entrada de ar na edificação (Equação 15).

$$DFR = \frac{Q}{(U_{ref} \cdot A_w)} \quad (15)$$

onde, Q [m^3/s] é a vazão volumétrica através da edificação na região de abertura de entrada, U_{ref} é a velocidade de referência na altura da edificação (1,3 m/s) e A_w é a área da abertura. Esse índice adimensional representa a razão entre a vazão volumétrica através da abertura e o produto da velocidade de referência pelo tamanho da abertura, tendo sido utilizado em diversos estudos para avaliar a ventilação natural em edificações (Kosutova *et al.*, 2019; Meroney, 2009; Tai *et al.*, 2022).

Também foi calculada a abrangência do escoamento para os ambientes de permanência prolongada (sala e quartos), sendo classificada por meio da escala de cinco pontos utilizada por Toledo (2006): muito ampla (superior a 80% da área do piso), ampla (entre 60% e 80%), média (entre 40% e 60%), restrita (entre 20% e 40%) e muito restrita (abaixo de 20% da área de piso).

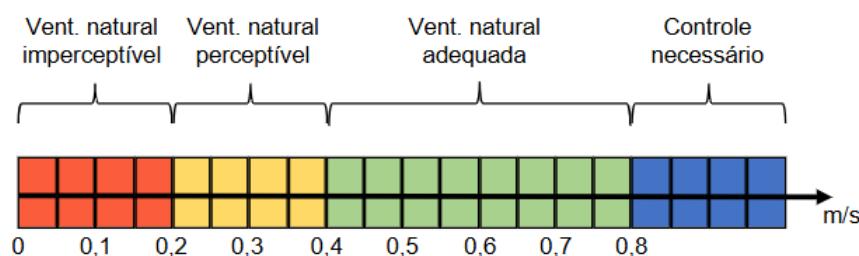
A estimativa da abrangência do escoamento a partir de imagens fluidodinâmicas de ensaios em mesa d'água, auxilia na compreensão do comportamento do fluido no interior dos ambientes, porém, não identifica a faixa de velocidade que o escoamento interno atinge.

Por isso, para a avaliação quantitativa da abrangência do escoamento do presente estudo, foi feita uma adaptação da aplicação da escala de cinco pontos mencionada acima, com sua aplicação para imagens geradas a partir das

simulações CFD, considerando as velocidades internas como limitantes da abrangência do escoamento.

Para determinação das velocidades limitantes da faixa de avaliação, foram considerados os valores da escala cromática da Figura 13, estabelecida por Morais e Labaki (2017), para os dois planos horizontais a 0,80 m e 1,60 m do piso. As velocidades compreendidas pela escala são: ventilação natural imperceptível (entre 0 e 0,2 m/s), ventilação natural perceptível (entre 0,2 m/s e 0,4 m/s), ventilação natural adequada (entre 0,4 m/s e 0,8 m/s) e controle necessário da ventilação (velocidade acima de 0,8 m/s).

Figura 13 - Escala cromática de velocidades médias



Fonte: adaptado de Morais e Labaki (2017).

Para o cálculo efetivo da abrangência do escoamento, foi utilizada a ferramenta CAD, do programa *ZWCAD 2024*, para fazer o levantamento da área em que o escoamento apresentou valores acima de 0,4 m/s. Também foram consideradas as áreas com valores acima de 0,8 m/s, por estarem na faixa de velocidade onde o controle de ventilação é necessário, sendo esse controle dependente do comportamento e preferência do ocupante, ou seja, podem haver eventuais excessos de velocidade do vento, mas essas áreas ainda representam locais onde a ventilação atinge velocidades que são convenientes como estratégia de resfriamento.

3.3.3 Temperatura e umidade

As análises quantitativas de temperatura e umidade foram desenvolvidas a partir dos resultados das simulações computacionais BES, avaliando o desempenho térmico da edificação de estudo na condição naturalmente ventilada.

Os critérios de avaliação de temperatura foram delimitados pela normativa NBR 15.575 (ABNT, 2021), que utiliza um intervalo de temperaturas variáveis que se correlaciona às variações climáticas locais. No caso da NBR 15.575, esse intervalo é denominado intervalo de temperaturas externas e é definido com base na média anual da temperatura externa de bulbo seco (TBSm).

Cada intervalo de temperatura externa define uma faixa de temperatura operativa (To) a ser considerada nos APPs. A temperatura operativa refere-se à média da temperatura média do ar da zona térmica (MAT) e da temperatura radiante média da zona térmica (MRT), sendo:

$$To = 0,5MAT + 0,5MRT \quad (16)$$

A temperatura operativa de cada ambiente foi obtida pela simulação BES, como dado de saída do software *EnergyPlus* (DOE, 2023). Foram, então, calculadas as temperaturas operativas máximas ($To_{máx}$) e médias (To_{med}) para cada APP.

O Quadro 11 apresenta os intervalos e faixas de temperatura operativa relativos às localidades consideradas no estudo.

Quadro 11 - Intervalos para avaliação da temperatura operativa

Localidade	TBSm [°C]	Intervalo	Faixa de To a ser considerada [°C]
Joinville	TBSm < 25,0°C	Intervalo 1	18,0°C < To < 26,0°C
Recife	25,0°C ≤ TBSm < 27,0°C	Intervalo 2	To < 28,0°C

Fonte: adaptado de ABNT (2021).

A partir do Quadro 11, que apresenta os intervalos e faixas de temperatura operativa relativos às localidades estudadas, calculou-se o percentual de horas em que cada APP da residência se encontrou dentro de uma faixa de temperatura operativa ($PHFT_{APP}$), calculado conforme a seguinte equação:

$$PHFT_{APP} = \frac{Nh_{FT}}{Nh_{Occup}} * 100 \quad (17)$$

onde, Nh_{FT} é o número de horas em que o APP se encontra ocupado e com temperaturas dentro da faixa de temperatura operativa ao longo do ano e Nh_{Occup} é o número de horas em que o APP é ocupado ao longo do ano, equivalente a 2920 horas para salas e 3650 horas para dormitórios. Para o cálculo do percentual de horas em que a unidade habitacional (UH) se encontrou dentro da faixa de temperatura operativa ($PHFT_{UH}$), considerou-se a média aritmética dos valores de cada APP.

Para a ampliar a avaliação da ventilação natural pelas simulações BES, também foi considerado o dado de saída de trocas de ar por hora de cada ambiente (zona térmica). Esse dado representa o número de renovações de ar por hora produzido pelo fluxo de ar externo que entra na zona por meio de aberturas de janelas/portas nas superfícies externas da zona (DOE, 2023). A partir dos dados obtidos pelas simulações, calculou-se a média de renovação de ar por hora (ACH_{med}) de cada APP, considerando apenas as respectivas horas de ocupação. A equação 18 traz a fórmula básica utilizada pelo programa *EnergyPlus* para calcular o número de renovações por hora de cada zona térmica.

$$ACH = \frac{Q_{vent}}{V_{zone}} * 3600 \quad (18)$$

onde Q_{vent} representa a vazão de ar, em m^3/s , que entra na zona via aberturas da envoltória e V_{zone} é o volume da zona térmica, em m^3 .

Além dos critérios de avaliação normativos referentes à avaliação da temperatura e do critério de número de renovações de ar por hora, o estudo expandiu a investigação para as condições de umidade relativa dos ambientes de permanência prolongada da UH. Assim, analisaram-se os índices de umidade relativa média de cada ambiente quando ocupado (UR_{med}). Esse último critério ainda não é contemplado pelas normas brasileiras relacionadas ao desempenho térmico de edificações. No entanto, a umidade se relaciona com o conforto higrotérmico dos ocupantes e com a qualidade do ar dos ambientes (Silveira; Pinto; Westphal, 2019).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir da investigação inicialmente proposta, buscou-se avaliar o desempenho da ventilação natural em uma habitação de interesse social (HIS) como estratégia de resfriamento passivo para climas tropicais e subtropicais.

Investigou-se o comportamento da ventilação natural em dois climas brasileiros – tropical e subtropical – ambos caracterizados como quentes e úmidos.

Foram avaliados o impacto da incidência do vento sobre uma HIS representativa e sua influência na ventilação natural, utilizando Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD), considerando a escala real da edificação.

Também foi avaliada a interação entre ventilação natural e orientação solar, por meio de simulações termoenergéticas, utilizando os coeficientes de pressão do vento obtidos por CFD. Assim, identificaram-se padrões de temperatura e umidade relativa no interior da residência.

Um dos aspectos abordados neste estudo foi a consideração da umidade nos modelos numéricos das simulações BES. Isso auxiliou a expandir os conhecimentos acerca do desempenho térmico das edificações, visto que a consideração da umidade nos cálculos de transferência de calor tem impacto relevante na avaliação do desempenho térmico.

Com a utilização da ferramenta de CFD, complementarmente às simulações BES, foi possível ampliar o entendimento do comportamento da ventilação natural dentro dos ambientes da residência estudada, para quatro diferentes ângulos de incidência do vento.

4.1 VERIFICAÇÃO DA MALHA COMPUTACIONAL

Para a parte de CFD deste trabalho, foi feita uma análise de sensibilidade da malha computacional da HIS, a fim de garantir a confiabilidade das simulações. Para isso, foi realizado um teste de independência da malha, com quatro diferentes quantidades de elementos: 3,2 milhões, 5,3 milhões, 8,2 milhões e 11,5 milhões. O ângulo de incidência do vento para os quatro modelos foi de 0°, considerando medições de velocidade média (v_m) na abertura

perpendicular ao fluxo. Assim, considerou-se a análise para a janela frontal da sala.

A solução numérica deve se manter independente do refinamento da malha. Contudo, quanto mais refinada for a malha, maior será o custo computacional em termos de tempo da simulação, o que pode tornar a simulação inviável.

Ao comparar os resultados obtidos a partir dos diferentes tamanhos de malha, foi observado que não houve alterações significativas nas tendências da variável considerada nessa análise de sensibilidade. A análise dos resultados foi feita com base no cálculo de erro relativo do refinamento, $\varepsilon_{i,ref}$, (Equação 19), considerando a média dos resultados obtidos (Tabela 2) para o total de 12000 iterações de cada simulação.

$$\varepsilon_{i,ref} = \frac{|\|y_i\|_{ref1} - \|y_i\|_{ref2}|}{\|y_i\|_{ref1}} \leq 0,01 \quad (19)$$

onde y_i representa a variável em análise, no caso, a velocidade média na abertura perpendicular ao vento incidente (janela frontal da sala).

O erro relativo do refinamento é calculado a partir da comparação dos resultados de uma malha menos refinada, menor número de elementos (ref1), com os resultados de uma malha mais refinada, maior número de elementos (ref2). Os refinamentos cessam quando o critério do erro relativo do refinamento é atendido.

Tabela 2 - Erro relativo do refinamento das malhas computacionais

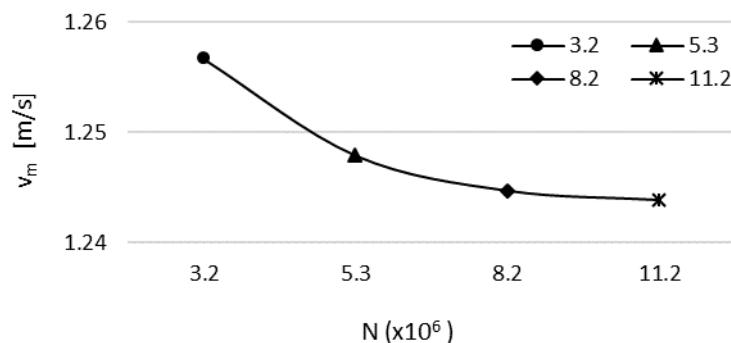
$N(x10^6)$	3,2	5,3	8,2	11,2
v_m [m/s]	1,25672492	1,247905	1,244703	1,24386
$\varepsilon_{i,ref}$	-	0,00702	0,00257	0,000676

Fonte: elaborado pela autora (2024).

Constatou-se uma pequena variação da velocidade média, com erro relativo médio de 0,7% entre a malha mais grossa e a malha de 5,3 milhões de elementos. Apesar de já atender ao critério do erro relativo estipulado, prosseguiu-se com o refinamento, a fim de complementar a análise da solução

numérica, principalmente devido à complexidade da geometria, que influencia o desenvolvimento do escoamento interno à residência. Assim, constatou-se uma tendência nos valores para a velocidade média na janela da sala, a partir do refinamento da malha (Figura 14).

Figura 14 - Velocidade média na janela perpendicular ao fluxo - sala



Fonte: elaborado pela autora (2024).

4.2 COMPORTAMENTO DO ESCOAMENTO DE VENTO INTERNO

A seguir, são apresentados os resultados da avaliação qualitativa sobre o comportamento do escoamento de vento interno e externo à edificação, em relação a cada ângulo de incidência abordado na pesquisa.

4.2.1 Ângulo de incidência 0°

Com o vento incidente a 0°, as janelas da sala (J2) e do quarto 1 (J1) estão posicionadas a barlavento, pelas quais o fluxo de ar entra na edificação. A porta externa da sala, adjacente à janela J2 também contribui para a entrada de ar, porém, com contribuição menos expressiva. Com a distribuição interna à medida que o escoamento se desenvolve dentro da residência, as janelas laterais da sala (J3) e do quarto 2 (J1) e a porta dos fundos funcionam como saída do ar.

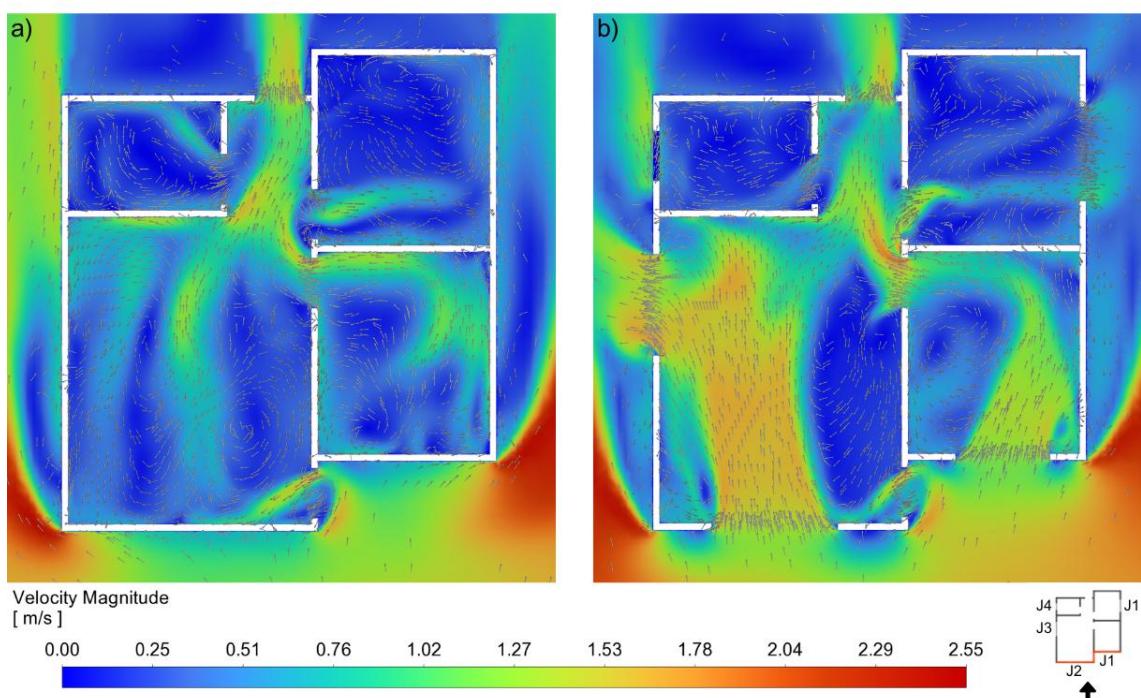
Esse sentido de percurso é considerado adequado do ponto de vista projetual, uma vez que o ar percorre ambientes secos e sai por ambientes considerados molhados e produtores de odores, como cozinha e banheiro (Morais; Labaki, 2017).

Considerando os planos horizontais a 0,80 m e 1,60 m do piso, a Figura 15 apresenta os mapas da magnitude da velocidade incidente na residência. É possível identificar que os cômodos apresentam diferentes magnitudes de velocidade de vento, indicadas pelas variações de cores do mapa.

Para o plano a 0,80 m do piso, as velocidades internas predominantes estão em torno de 0,25 m/s e 0,76 m/s, com algumas regiões internas apresentando velocidades ainda menores. As áreas com maiores velocidades, superando 1,20 m/s, indicam o percurso do ar, evidenciando a relação entre a posição das aberturas de entrada e saída e a distribuição de vento no interior da HIS.

A sala apresenta regiões com velocidades relativamente maiores em comparação aos outros ambientes, indicando um maior fluxo de ventilação. Para os quartos 1 e 2, as velocidades são predominantemente baixas, entretanto, o primeiro apresenta maior movimentação de ar, justificada pela presença da janela frontal à incidência do vento.

Figura 15 - Campo de vetores de velocidade plotado sobre o mapa da magnitude da velocidade - plano horizontal a) 0,80 m e b) 1,60 m - 0° para um instante de tempo $t = 3000$ s

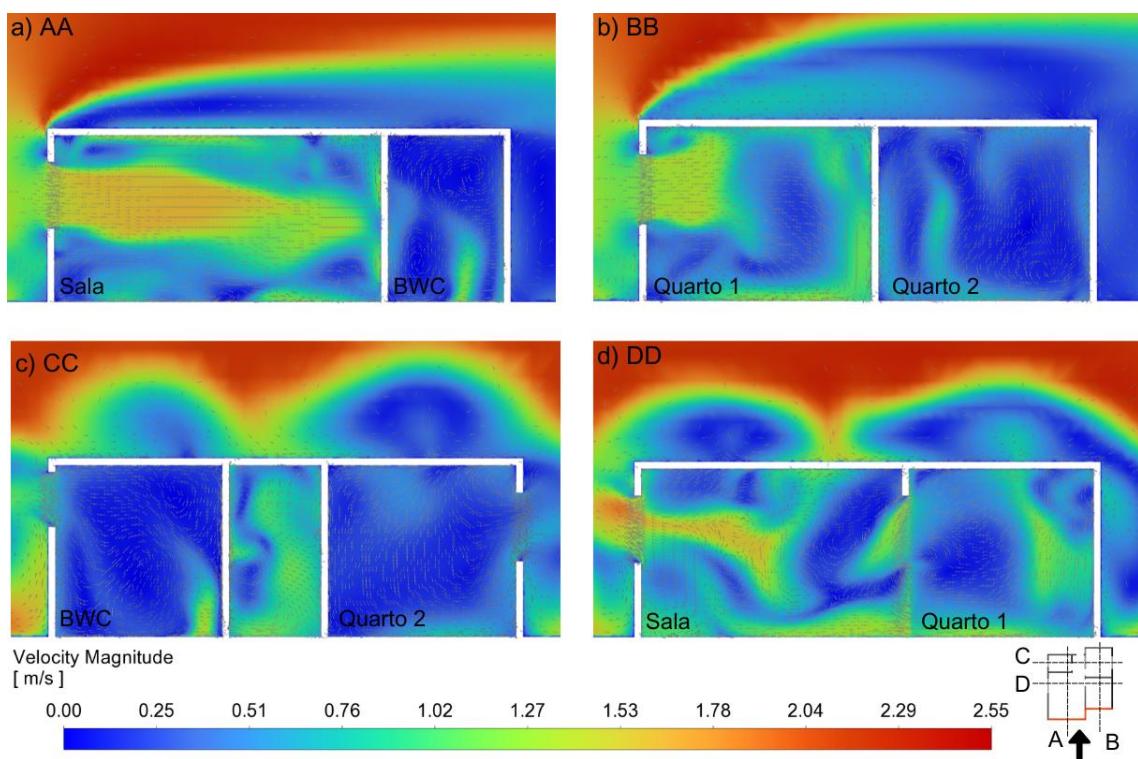


Fonte: elaborado pela autora (2025).

No plano a 1,60 m do piso, é possível observar o aumento nas velocidades, principalmente na sala e no quarto 1, pelos quais o escoamento entra na casa. Nesse plano, a distribuição interna do escoamento é menos homogênea, evidenciando o percurso da ventilação natural, com áreas de maior velocidade em contraponto a regiões com velocidades mais baixas.

Analizando os planos de corte verticais, é possível compreender a distribuição vertical da ventilação. Na Figura 16, o plano de corte AA mostra os vetores com os mapas da magnitude da velocidade na sala e no banheiro. Percebe-se que a janela frontal da sala (J2) contribui majoritariamente para o escoamento, com vetores direcionados para dentro do ambiente e uniformidade no escoamento entre os planos das extremidades superior e inferior da janela (J2), desde a entrada até a parede de divisa com o banheiro.

Figura 16 – Campo de vetores de velocidade plotado sobre o mapa da magnitude da velocidade - plano vertical a) AA; b) BB; c) CC; d) DD - 0° para um instante de tempo $t = 3000$ s



Fonte: elaborado pela autora (2025).

Já no banheiro, observa-se a predominância de velocidades baixas, o que indica o efeito de obstrução causado pela geometria interna. Os vórtices indicam que o ar circula nessa área, porém sem troca efetiva com o ambiente externo.

Pelo plano de corte BB, percebe-se que o quarto 1 apresenta uma entrada significativa de vento, mas há também a formação de áreas de baixa velocidade nas extremidades internas, onde o vento tende a perder energia e formar recirculações.

O escoamento no quarto 2 é caracterizado por baixas velocidades e maior ocorrência de vórtices. Isso sugere que a ventilação natural nesse cômodo é limitada, com menor eficiência na renovação do ar, comparado ao quarto 1.

A partir de outra perspectiva, pelo plano de corte CC, observam-se mais vórtices no banheiro, à parte do fluxo de ar que entra pela porta desse ambiente e sai pela janela (J4). No quarto 2, também é mostrada a saída do ar pela janela (J1), com o vento circulando por todo o cômodo.

No plano de corte DD, observa-se que a circulação de ar no quarto 1 é razoavelmente homogênea, mas há áreas de menor movimento perto das paredes internas. O escoamento, então, sai pela porta e parte dele é direcionada pela janela lateral da sala (J3). Nessa região, há um incremento na velocidade. Ainda na sala, percebe-se a formação de recirculações próximas ao piso e ao teto. A velocidade, de maneira geral, é moderada, mas as zonas de recirculação podem causar estagnação do ar em áreas específicas.

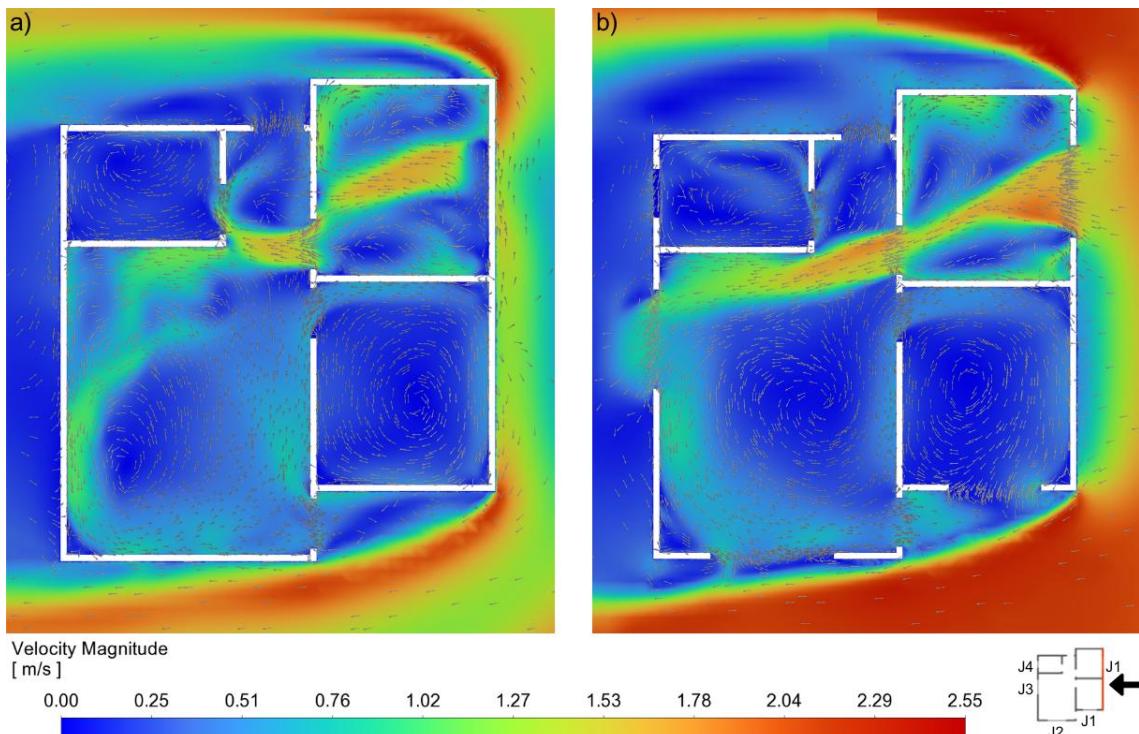
4.2.2 Ângulo de incidência 90°

Para o ângulo de incidência do vento a 90°, o vento entra na residência pela janela J1 do quarto 2. As demais aberturas externas da casa direcionam o fluxo de ar para fora da residência.

A partir da análise da Figura 17, observa-se que as velocidades internas nos cômodos são predominantemente baixas, indicando áreas de estagnação do ar. As velocidades mais elevadas estão concentradas próximas às aberturas, mas sua propagação para o interior é limitada devido à geometria da casa.

Analizando o plano horizontal a 0,80 m, percebe-se que o gradiente de velocidade é mais suave. As velocidades diminuem ao se afastar das aberturas, o que sugere que a disposição interna das paredes e a falta de aberturas na altura desse plano são fatores influentes na propagação do fluxo de ar.

Figura 17 - Campo de vetores de velocidade plotado sobre o mapa da magnitude da velocidade - plano horizontal a) 0,80 m e b) 1,60 m - 90° para um instante de tempo $t = 3000$ s



Fonte: elaborado pela autora (2025).

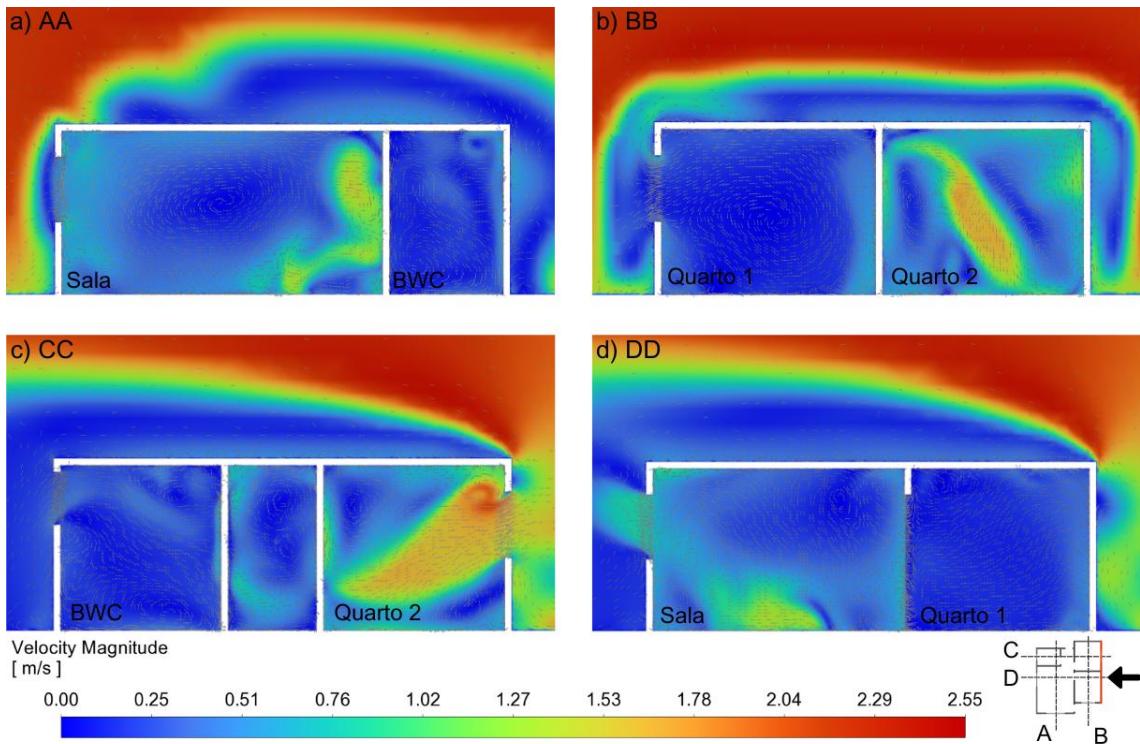
Em contrapartida, no plano a 1,60 m, o gradiente é mais acentuado. As velocidades se propagam mais pelo ambiente, abrangendo mais áreas internas. Isso reflete uma ventilação menos obstruída nesse plano, mas o comportamento ainda se assemelha ao plano inferior, destacando que o vento incidente se concentra no percurso de entrada pela janela J1 do quarto 2 e saída pela janela lateral da sala (J3). Consequentemente, a ventilação natural no restante dos cômodos é comprometida.

Para os dois planos horizontais, a 0,80 m e 1,60 m do piso, as regiões de recirculação do vento são bem evidentes, com velocidades reduzidas nas áreas centrais de alguns cômodos, como o quarto 1 e a sala.

Analizando o comportamento da ventilação pelos planos verticais, é possível observar que no plano AA (Figura 18), a recirculação do ar abrange praticamente toda a área da sala, com exceção da área frontal ao escoamento que sai pela janela lateral da sala (J3). Parte do escoamento sai pela janela e porta frontais. Novamente, observam-se velocidades muito baixas no banheiro,

com movimentos de recirculação, indicando ausência de trocas de ar efetivas com o ambiente externo.

Figura 18 - Campo de vetores de velocidade plotado sobre o mapa da magnitude da velocidade - plano vertical a) AA; b) BB; c) CC; d) DD - 90° para um instante de tempo $t = 3000$ s



Fonte: elaborado pela autora (2025).

No quarto 1, há recirculação de ar significativa pelo cômodo, com parte do escoamento saindo pela janela. No quarto 2, ainda existem áreas de recirculação próximas ao piso e às paredes, apesar desse ambiente permitir a entrada principal do vento para esse ângulo de incidência do vento.

Pelo corte vertical CC, verifica-se o perfil de entrada do fluxo de vento pela janela J1 do quarto 2. As maiores velocidades concentram-se na altura da janela, decaindo conforme o escoamento avança pelo ambiente.

Semelhante ao caso 0°, o banheiro também apresenta vórtices e velocidades baixas. Ainda, o escoamento recircula pelo corredor da sala, mostrando estagnação do ar nessa área.

Verifica-se novamente velocidades baixas predominando no quarto 1, com redemoinhos mais próximos ao teto. Na sala, vê-se o escoamento saindo pela janela lateral (J3), com breve aceleração nessa abertura. Porém, as maiores

velocidades concentram-se próximas ao piso. Isso indica que, apesar da abertura de saída (J3) estabelecer o efeito de ventilação cruzada com a abertura de entrada pelo quarto 2, a parede imediatamente abaixo da abertura J3 da sala cria um obstáculo para o vento, criando um vórtice e desviando o escoamento, com redução da velocidade.

4.2.3 Ângulo de incidência 180°

Com o vento incidindo na HIS a 180°, a única abertura de entrada para esse ângulo de incidência é a porta dos fundos, entre o banheiro e o quarto 2. O estreitamento da abertura à barlavento cria um efeito de aceleração do escoamento do ar logo na entrada da edificação, resultando em altas velocidades, superiores a 2,0 m/s, imediatamente após essa abertura.

O ar que entra pela porta dos fundos se distribui inicialmente pelo quarto 2, apresentando velocidades maiores nas áreas próximas à abertura de entrada desse cômodo. No plano horizontal a 0,80 m do piso (Figura 19), observa-se uma diminuição das velocidades ao se afastar da entrada, evidenciando a dificuldade do escoamento do ar em se propagar uniformemente pelo restante do ambiente.

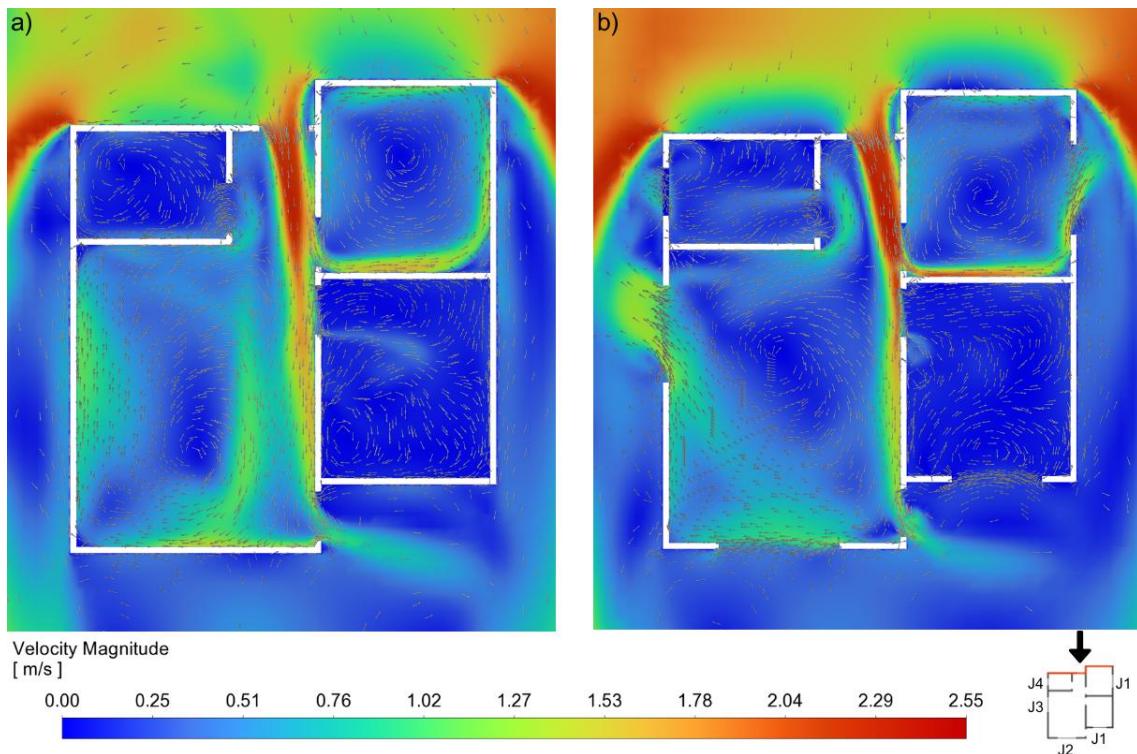
No plano superior (1,60 m), as velocidades são mais uniformes, alcançando áreas mais distantes da entrada. Isso reflete uma melhor distribuição do escoamento do ar nesse plano.

Após passar pelo quarto 2, o escoamento se propaga pela sala, apresentando comportamento semelhante ao observado no quarto 2. Novamente, as velocidades apresentam maior uniformidade no plano superior.

No plano a 0,80 m, o gradiente de velocidade é mais acentuado, com baixas velocidades predominando nas regiões centrais dos ambientes. No plano acima, o escoamento é mais eficiente, alcançando áreas centrais com velocidades mais elevadas. Isso indica uma melhor distribuição da ventilação natural nesse nível.

Localizado à sotavento e sem conexão direta com o escoamento principal, o quarto 1 apresenta estagnação do ar em praticamente toda a área, tanto no plano inferior quanto no superior. A posição das aberturas interna (porta) e externa (janela J1) não é eficaz para a ventilação natural nesse caso.

Figura 19 - Campo de vetores de velocidade plotado sobre o mapa da magnitude da velocidade – plano horizontal a) 0,80 m e b) 1,60 m – 180° para um instante de tempo $t = 3000$ s



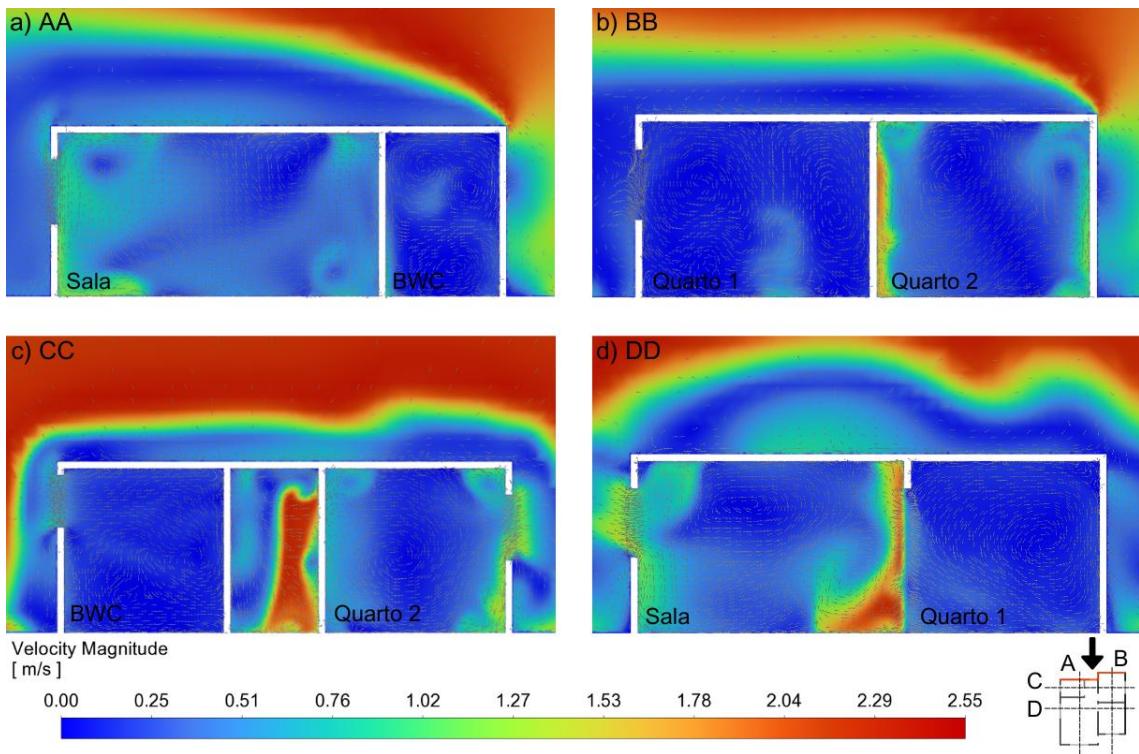
Fonte: elaborado pela autora (2025).

Assim como no dormitório 1, o banheiro apresenta baixa movimentação de ar na maior parte da área. No entanto, no plano a 1,60 m do piso, observa-se um ligeiro incremento nas velocidades, indicando alguma movimentação de ar no nível superior. Essa melhora pode ser atribuída à propagação vertical do fluxo a partir da porta dos fundos.

O plano vertical AA (Figura 20), revela uma baixa movimentação de ar na maior parte do banheiro, com velocidades limitadas próximas ao piso. Contudo, há um ligeiro incremento nas velocidades a partir de uma altura intermediária do piso, indicando maior movimentação de ar em níveis superiores.

Na área da sala, a região próxima à janela J2, verifica-se a formação de vórtices tanto na parte inferior, próxima ao piso, quanto na parte superior, acima da abertura. A velocidade de saída do escoamento por essa abertura é moderada, em torno de 0,80 m/s.

Figura 20 - Campo de vetores de velocidade plotado sobre o mapa da magnitude da velocidade - plano vertical a) AA; b) BB; c) CC; d) DD - 180° para um instante de tempo $t = 3000$ s



Fonte: elaborado pela autora (2025).

A análise revela um padrão de distribuição similar ao observado no plano BB, com baixa movimentação de ar próximo ao piso e um aumento nas velocidades em níveis superiores. Esse padrão sugere, para o quarto 2, uma ventilação limitada nas áreas inferiores, enquanto as camadas superiores beneficiam-se da circulação vertical proveniente da porta dos fundos. Para o quarto 1, a formação de vórtices aliada à predominância de baixas velocidades indica que a ventilação natural nesse cômodo é insuficiente.

Para o plano vertical CC, o comportamento da ventilação reflete os padrões observados nos planos AA e BB, com incrementos na movimentação de ar em níveis superiores. Isso reforça a ideia de que a distribuição vertical do fluxo é favorecida pela configuração das aberturas e pelo posicionamento da porta dos fundos.

No plano vertical DD, similarmente, há uma predominância de velocidades mais baixas próximo ao piso da sala e do quarto 1, enquanto na sala, as velocidades aumentam em níveis superiores. Ainda, para a sala, nota-se a

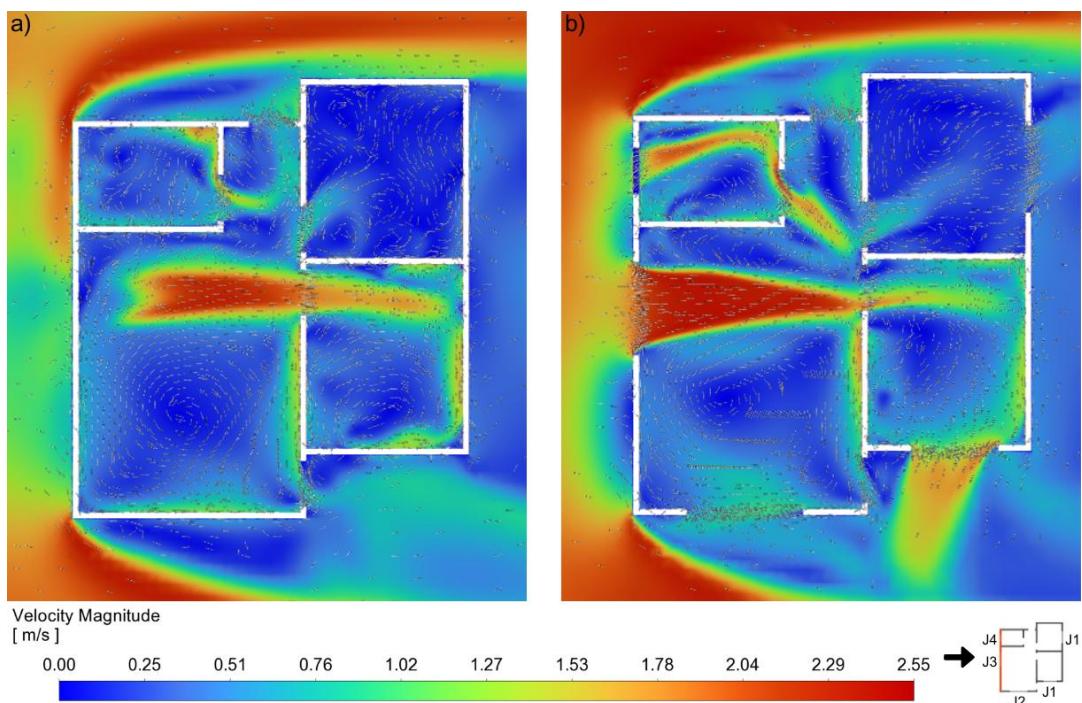
concentração do jato de ar alinhado com a posição da porta de entrada, com velocidades superando 2,0 m/s principalmente na parte inferior próxima ao piso. Isso evidencia a má distribuição do escoamento do ar pelo ambiente.

4.2.4 Ângulo de incidência 270°

A principal abertura que atua como entrada de ar é a janela lateral da sala (J3), localizada à barlavento. Essa abertura canaliza grande parte do escoamento externo para dentro da edificação. Uma parcela menor do escoamento entra pela janela do banheiro, especialmente em níveis superiores, indicando uma entrada secundária de ar para esse ângulo de incidência do vento.

Assim como nos demais casos de incidência do vento, há maior predominância de velocidades mais baixas no plano horizontal a 0,80 m (Figura 21), indicando menor movimentação do ar próximo ao piso. O plano superior (1,60 m) apresenta gradiente de velocidade mais acentuado em relação ao plano inferior.

Figura 21 – Campo de vetores de velocidade plotado sobre o mapa da magnitude da velocidade - plano horizontal a) 0,80 m e b) 1,60 m - 270° para um instante de tempo $t = 3000$ s



Fonte: elaborado pela autora (2025).

As regiões mais centrais dos cômodos apresentam velocidades maiores, assim como no caso do ângulo de incidência do vento a 0° . Isso indica menos estagnação, contribuindo para melhorar a distribuição interna do escoamento.

A sala e o dormitório 1 apresentaram as maiores velocidades em ambos os planos. A sala se beneficia do efeito de ventilação cruzada, uma vez que o escoamento entra pela janela J3 e atravessa o cômodo, criando um gradiente de velocidade que se propaga em direção às demais áreas próximas das paredes.

Assim como a sala, o quarto 1 apresenta boas condições de ventilação natural, com velocidades mais altas tanto no plano inferior quanto no superior. O escoamento do ar que atravessa a sala alcança o quarto 1, criando um padrão de distribuição semelhante, embora com intensidades levemente reduzidas em comparação com a sala.

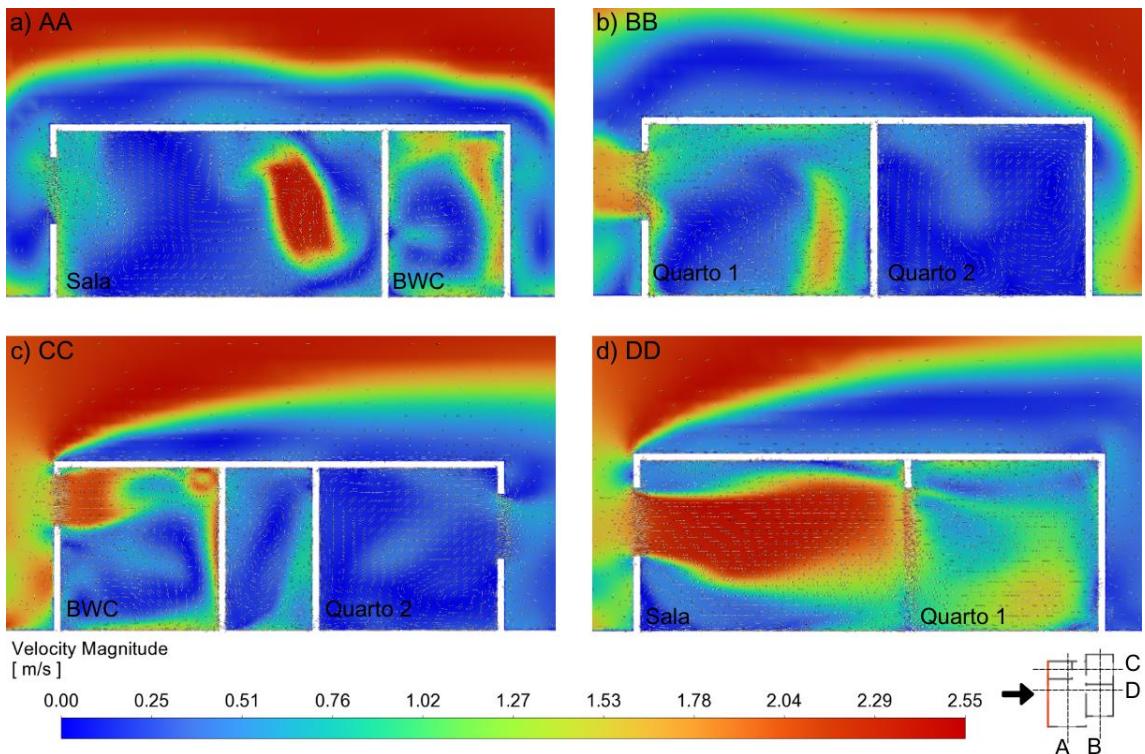
O dormitório 2 é o ambiente mais comprometido em termos de ventilação natural. Os padrões de velocidade são baixos, na ordem de 0,20 m/s. Consequentemente, zonas de estagnação são mais pronunciadas nesse quarto, ao contrário dos demais ambientes da residência.

O banheiro apresenta baixa movimentação de ar na maior parte de sua extensão, mas a janela superior (J4) permite a entrada de parte do escoamento, que melhora as condições no plano a 1,60 m do piso. As velocidades permanecem inferiores às observadas na sala e no quarto 1, mas mostram um incremento no nível superior, sugerindo um efeito de circulação do ar.

Pelo plano vertical AA (Figura 22), é possível identificar a entrada principal do escoamento incidente, indicado pela grande variação do gradiente de velocidade nesse plano. Similarmente ao caso 180° , observa-se a concentração do escoamento no alinhamento das aberturas J3 (à barlavento), passando pela porta do quarto 1 e saindo pela abertura J1 desse mesmo cômodo. Isso implica em uma distribuição menos uniforme da ventilação pelo restante dos ambientes da residência.

Novamente, verifica-se a distribuição desigual da ventilação pelos cômodos a partir do plano BB. A análise revela um padrão similar de distribuição, com a ventilação cruzada continuando a influenciar significativamente o quarto 1, porém, o quarto 2 baixas velocidades e formação de vórtices nas extremidades do cômodo.

Figura 22 - Campo de vetores de velocidade plotado sobre o mapa da magnitude da velocidade - plano vertical a) AA; b) BB; c) CC; d) DD - 270° para um instante de tempo $t = 3000$ s



Fonte: elaborado pela autora (2025).

No plano vertical CC, observa-se uma redução nas velocidades dos vetores de ar ao se afastarem da sala, evidenciando uma queda na eficiência da ventilação natural conforme o escoamento se propaga. A estagnação é mais notável, especialmente nas regiões adjacentes ao banheiro e ao quarto 2, o que pode comprometer a qualidade da ventilação nesses ambientes.

No plano vertical DD, observa-se que o escoamento do ar é direcionado em grande parte pela janela lateral da sala para o quarto 1. O efeito de ventilação cruzada é evidente, com o ar entrando pela janela J3 e propagando-se de forma relativamente uniforme ao longo do plano. Os vetores indicam uma forte corrente que atravessa a sala e alcança o quarto 1, resultando em uma boa circulação de ar e minimizando as zonas de estagnação nesse plano.

No entanto, o sentido de percurso resultante da incidência do vento à 270° é considerado inadequado do ponto de vista projetual, uma vez que o ar entra na residência por ambientes considerados molhados e produtores de odores, sendo a cozinha e o banheiro, e, então percorre o restante dos ambientes.

4.2.5 Síntese da análise qualitativa

A análise qualitativa, a partir das figuras apresentadas, revelou um panorama detalhado do comportamento e da distribuição do escoamento de vento que passa pelo interior da casa, representado pelos campos de vetores sobre os mapas da magnitude da velocidade nos planos de corte horizontais (0,80m e 1,60m) e verticais (AA, BB, CC e DD).

Pela análise qualitativa, a ventilação natural se mostrou mais eficiente para o ângulo de incidência do vento a 0° , devido ao posicionamento das aberturas que permitem a entrada do escoamento. Nos ângulos de 90° e 270° , a ventilação cruzada também ocorreu, no entanto, para a incidência do vento a 90° , as velocidades foram mais uniformes na distribuição do escoamento pela casa. Para os casos 180° e 270° , a entrada do escoamento foi mais canalizada, o que prejudicou a distribuição do ar no interior da residência.

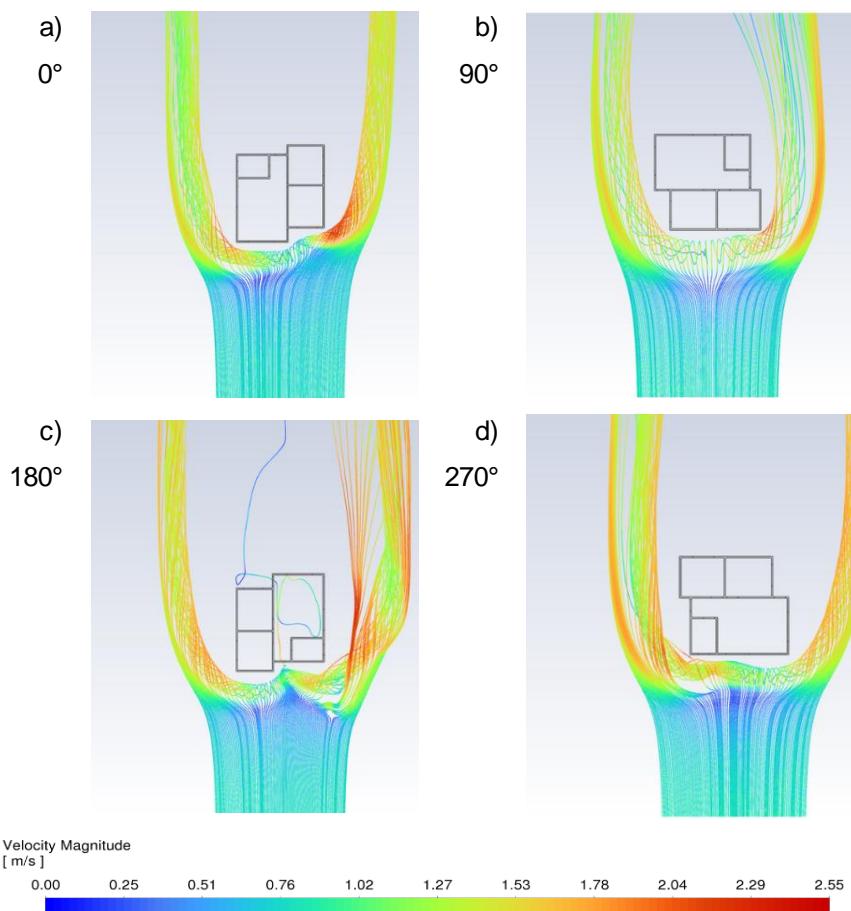
A sala foi o cômodo mais ventilado em todos os casos, enquanto o quarto 2 e o banheiro apresentaram maior comprometimento, devido à formação de vórtices e áreas de estagnação do ar.

4.3 COMPORTAMENTO DO ESCOAMENTO DE VENTO EXTERNO

O comportamento do escoamento de vento externo é outro aspecto importante para a compreensão da ventilação natural em edificações. Padrões de escoamento são influenciados por diversos fatores, incluindo altura do edifício, posição e a presença de estruturas vizinhas.

A Figura 23 e Figura 24 trazem os resultados para o comportamento do escoamento externo à HIS estudada, tratada como isolada no terreno, em que se observa um fator comum em todos os casos: a formação do vórtice de ferradura. Esse fenômeno aerodinâmico, caracterizado por um movimento de recirculação na base frontal do volume da edificação, ocorre sempre que o escoamento encontra um obstáculo sólido e precisa contorná-lo pelas laterais e pela base (Sattar *et al.*, 2018).

Figura 23 - Vista superior do escoamento externo à HIS: 0°, 90°, 180° e 270°



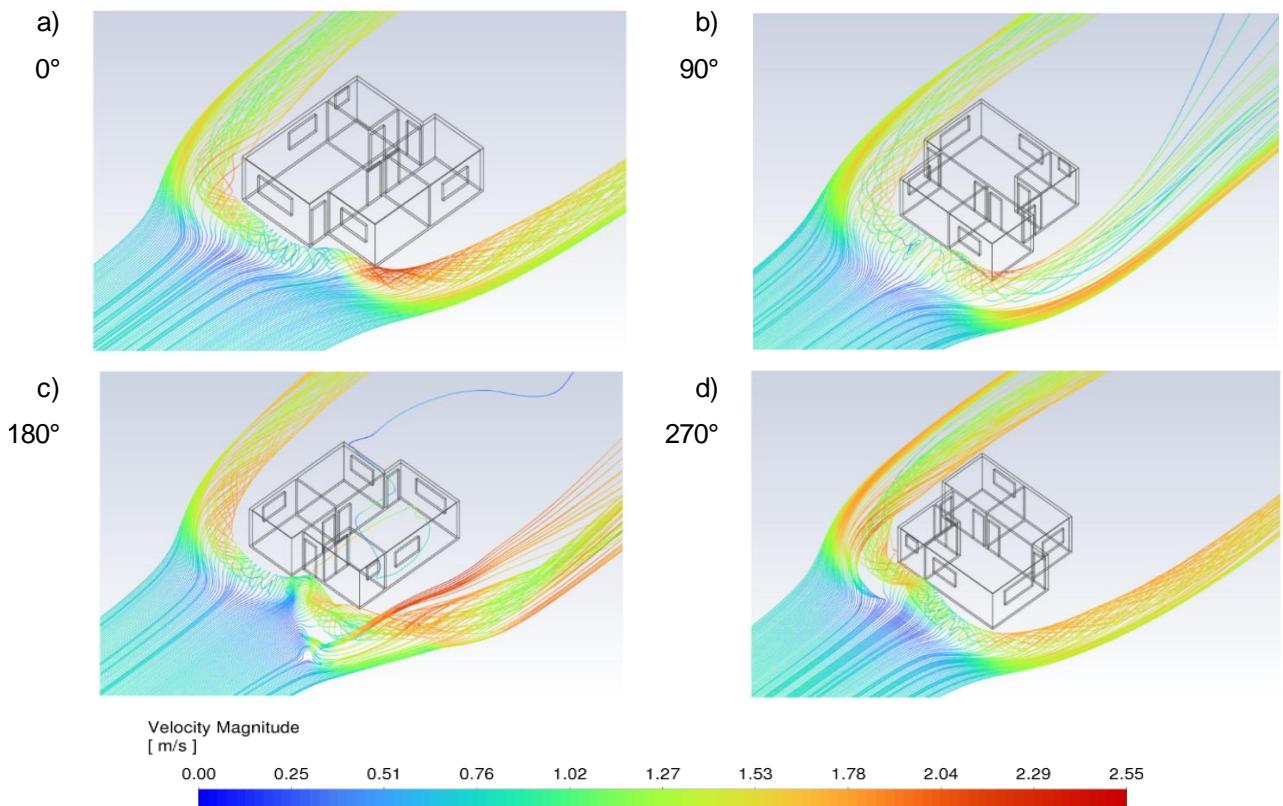
Fonte: elaborado pela autora (2025).

Nos casos 0° e 180°, o escoamento encontra a edificação diretamente pelas fachadas opostas, frontal e posterior. Em ambas as situações, o vórtice de ferradura é identificado na base da face de perpendicular ao vento incidente, com recirculações bem definidas e redemoinhos nas laterais. A diferença principal está na configuração das aberturas e no interior da edificação: no caso 0°, o escoamento se bifurca mais simetricamente e apresenta maior desvio lateral externo, enquanto no caso 180°, há uma tendência de maior penetração do escoamento para o interior, o que influencia o comportamento interno do escoamento.

Nos casos de 90° e 270°, o vento incide perpendicularmente sobre as fachadas laterais da edificação, também se observando a formação do vórtice de ferradura. Embora os dois casos compartilhem o mesmo princípio de escoamento, há diferenças na distribuição interna do escoamento, que decorrem da configuração das aberturas e compartimentos internos. No caso 270°, o vento

consegue penetrar mais no interior da edificação, estabelecendo uma ventilação cruzada mais efetiva. Já no caso 90°, o escoamento tende a se manter mais restrito à região externa, com menor entrada de ar nos ambientes internos, sugerindo um impacto mais limitado sobre a ventilação natural.

Figura 24 - Vista isométrica do escoamento externo à HIS: 0°, 90°, 180° e 270°



Fonte: elaborado pela autora (2025).

Em conjuntos habitacionais adensados, como é comum em projetos de habitação social, a interação do vento com as edificações pode gerar dois efeitos críticos: de um lado, zonas de aceleração do escoamento entre os blocos, o que pode resultar em desconforto térmico e aumento das cargas de vento sobre as superfícies; de outro, a redução drástica da ventilação em algumas unidades. Isso ocorre porque, ao incidir sobre uma edificação, o vento forma o vórtice de ferradura e se desvia pelas laterais e pelo topo, deixando imediatamente atrás e ao redor da edificação regiões com poucas ou nenhuma linha de corrente. Assim, casas vizinhas dispostas lado a lado na direção do vento incidente podem ficar em zonas de sombra aerodinâmica, sem renovação adequada do ar.

Para mitigar esses efeitos e garantir qualidade ambiental nos espaços internos e externos, é essencial considerar o comportamento do vento no planejamento urbano, adotando estratégias como quebra na repetição do alinhamento das unidades, variações volumétricas, reentrâncias, sombreamentos e barreiras vegetais, que favoreçam tanto a dissipação das zonas de aceleração quanto a redistribuição do escoamento do ar entre as construções.

4.4 TAXA DE VENTILAÇÃO E ABRANGÊNCIA DO ESCOAMENTO

Os parâmetros quantitativos, relacionados ao CFD, avaliados nesse trabalho foram a taxa de ventilação adimensional (DFR) e a abrangência do escoamento.

4.4.1 Taxa de ventilação adimensional (DFR)

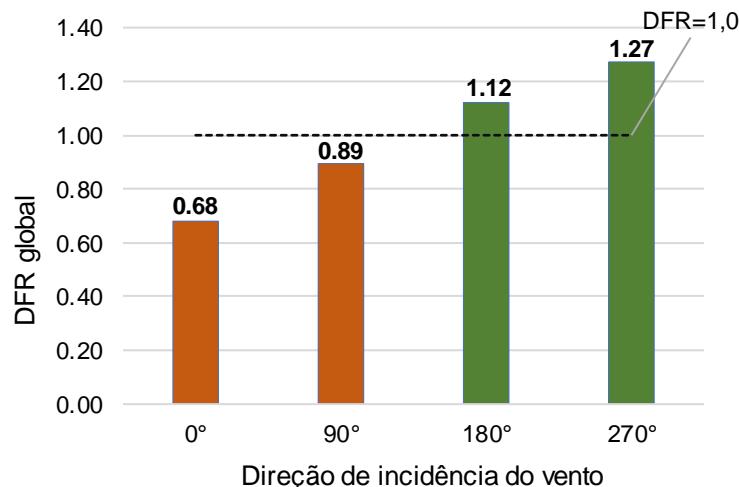
A Figura 25 apresenta os valores da taxa de ventilação adimensional DFR global para as quatro diferentes direções de incidência do vento sobre a edificação: 0°, 90°, 180° e 270°. Este índice representa a razão entre a vazão volumétrica de ar que entra na edificação e o valor de referência baseado na área de abertura e velocidade do vento incidente. Valores de DFR superiores a 1 indicam desempenho de ventilação acima do esperado; valores próximos a 1 indicam bom desempenho e valores muito abaixo de 1 indicam desempenho inferior.

Observa-se que os casos de vento nas direções 180° e 270° apresentaram os maiores valores para a taxa de ventilação adimensional, com DFR globais de 1,12 e 1,27, respectivamente. Este resultado pode ser atribuído à orientação favorável das aberturas, permitindo maior escoamento de ar.

Nos casos 180° e 270°, as velocidades de entrada foram maiores, influenciando em vazões volumétricas superiores aos casos 0° e 90°. Por outro lado, os casos com vento nas direções 0° e 90° apresentaram valores para DFR abaixo de 1 (0,68 e 0,89, respectivamente), evidenciando menor eficiência na ventilação natural, em relação aos outros dois casos.

Embora o caso 0° possua aberturas diretamente voltadas para o vento, a distribuição interna dos ambientes e a posição das aberturas de saída podem ter limitado a vazão efetiva, uma vez que esses fatores contribuem para a velocidade do jato de ar que entra e percorre internamente a residência.

Figura 25 - DFR global para cada direção de vento



Fonte: elaborado pela autora (2025).

No entanto, ao observar os valores de DFR para cada abertura (Tabela 3), é possível analisar que as janelas da sala e do dormitório 1, no caso 0°, possuem valores altos, indicando bom desempenho. Apesar de a taxa global para esse caso ser inferior aos demais, é o caso que possui o maior número de aberturas a barlavento em diferentes cômodos, conforme observado nas imagens das simulações CFD analisadas em 4.2.

Comparando os resultados obtidos com outros estudos, observa-se a limitação da análise da ventilação natural apenas pela perspectiva dessa taxa adimensional. A aplicação do cálculo de DFR foi feita, principalmente, para casos de edificações simplificadas (com apenas um cômodo), para analisar o impacto do posicionamento das aberturas de entrada e saída (Derakhshan; Shaker, 2017; Karava; Stathopoulos; Athienitis, 2011; Meroney, 2009), além da influência de dispositivos, como venezianas externas (Kosutova *et al.*, 2019; Tai *et al.*, 2022), na taxa de ventilação interna.

Tabela 3 - DFR local e global para cada direção de vento

Abertura a barlavento		Vazão volumétrica [m ³ /s]	A _w [m ²]	U _{ref} (z=2,5m) [m/s]	DFR	DFR global
Caso 0°	J2 (sala)	2,45	2,02	1,32	0,92	0,68
	P1 (sala)	0,58	1,68	1,32	0,26	
	J1 (quarto 1)	1,65	1,51	1,32	0,83	
Caso 90°	J1 (quarto 2)	1,78	1,51	1,32	0,89	0,89
Caso 180°	P1 (sala)	2,49	1,68	1,32	1,12	1,12
Caso 270°	J3 (sala)	2,61	1,62	1,32	1,22	1,27
	J4 (banheiro)	0,92	0,48	1,32	1,46	

Fonte: elaborado pela autora (2025).

4.4.2 Abrangência do escoamento

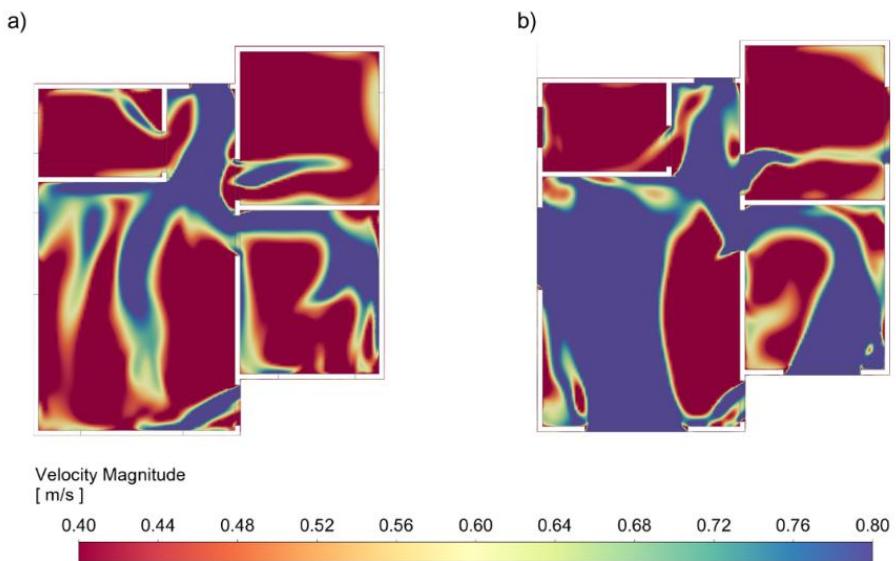
A abrangência do escoamento foi classificada por meio da escala de cinco pontos utilizada por Toledo (2006): muito ampla (superior a 80% da área do piso), ampla (entre 60% e 80%), média (entre 40% e 60%), restrita (entre 20% e 40%) e muito restrita (abaixo de 20% da área de piso).

Com base na escala cromática estabelecida por Morais e Labaki (2017), o gradiente da magnitude das velocidades foi configurado para uma faixa de velocidade entre 0,4 m/s e 0,8 m/s, onde os valores abaixo ou acima dos limites inferior e superior aparecem, respectivamente, em rosa escuro ou azul. Dessa maneira, é possível visualizar as regiões onde a ventilação está na faixa considerada adequada, bem como áreas onde há limitação ou excesso de vento.

A abrangência do escoamento para o ângulo de incidência do vento a 0° (Figura 26), em geral, foi classificada como média (52,25%) para o plano a 0,80 m do piso e ampla (63,08%) para o plano a 1,60 m. Considerando os cômodos separadamente, a sala e o quarto 1 são os ambientes em que a abrangência foi maior, enquanto o quarto 2 apresentou um escoamento restrito.

Ainda, para a sala e o quarto 1, destaca-se a predominância de velocidades superiores a 0,8 m/s, indicando grande potencial da ventilação natural como estratégia de resfriamento. No entanto, as velocidades altas sugerem maior necessidade de controle das aberturas pelos usuários.

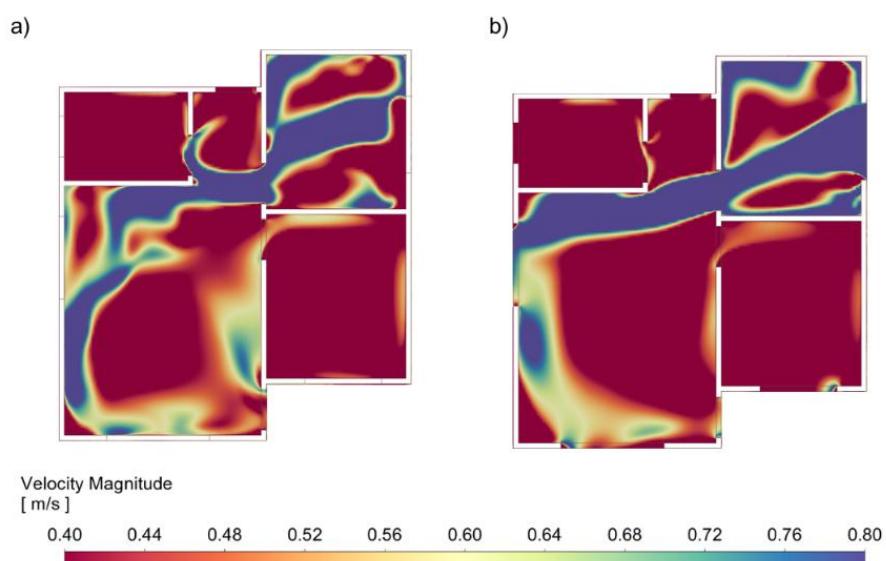
Figura 26 - Abrangência do escoamento para o ângulo de incidência do vento a 0° : a) plano 0,80 m e b) plano 1,60 m



Fonte: elaborado pela autora (2025).

Para o ângulo de incidência do vento a 90° (Figura 27), a abrangência do escoamento foi, em geral, média para os planos horizontais inferior e superior, com 50,89% e 48,75%, respectivamente. Observa-se a redução da abrangência no plano a 1,60 m, possivelmente devido à maior canalização do escoamento pelas aberturas de entrada e saída do ar.

Figura 27 - Abrangência do escoamento para o ângulo de incidência do vento a 90° : a) plano 0,80 m e b) plano 1,60 m

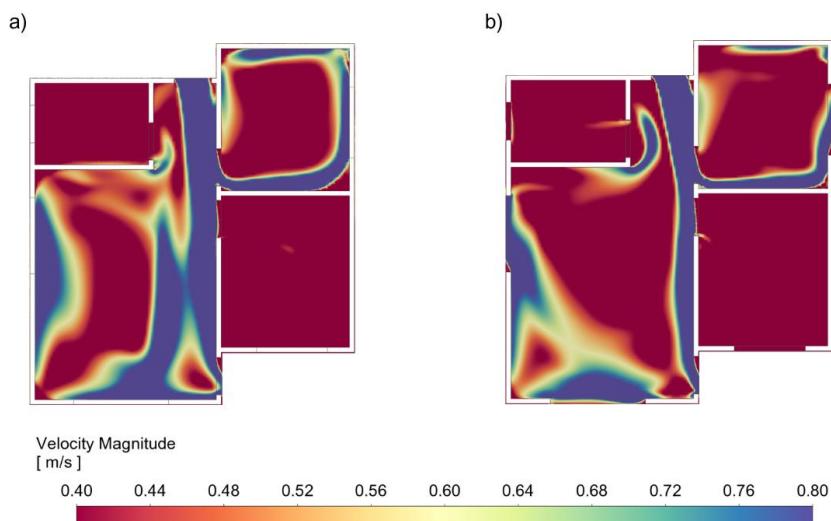


Fonte: elaborado pela autora (2025).

Nesse caso, o quarto 2 destaca-se pelo maior alcance do escoamento com velocidades adequadas ou superiores para a ventilação natural. Na sequência, a sala é o ambiente com a segunda maior cobertura do escoamento, no entanto, com redução 26,4% na abrangência do escoamento, passando de ampla (68,45%), no plano inferior, para média (50,38%), no plano superior. O quarto 1, então, apresentou escoamento com cobertura muito restrita, em torno de 15% para ambos os planos.

O caso de incidência do vento a 180° (Figura 28) foi o mais crítico, em termos de abrangência do escoamento. A cobertura média total para o plano a 0,80m do piso foi de 45,32%, sendo classificada como média, enquanto para o plano superior, reduziu para 35,74% (restrita).

Figura 28 - Abrangência do escoamento para o ângulo de incidência do vento a 180° : a) plano 0,80 m e b) plano 1,60 m



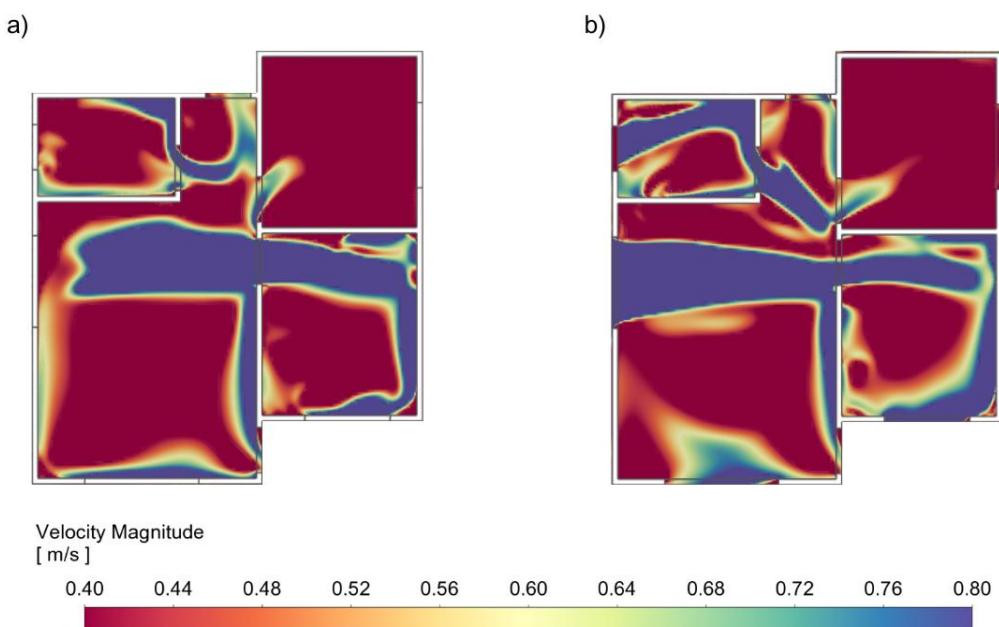
Fonte: elaborado pela autora (2025).

Entretanto, a sala apresentou abrangência muito ampla (82,97%) no plano inferior e ampla (62,79%) no plano superior. Essa redução pode ser atribuída à posição e formato das aberturas de entrada e saída, sendo elas, respectivamente, uma porta e uma janela. Com isso, o escoamento de ar entra na residência próximo ao chão, porém, no plano inferior, apenas a porta oposta permite a saída do vento, contribuindo para maior distribuição do escoamento pelo ambiente, em relação ao plano superior.

O dormitório 1 apresentou as piores abrangências, 0,95% e 0,51%, sendo classificadas como muito restritas para ambos os planos. Em contrapartida, o quarto 2 mostrou uma cobertura média de 52,04% para o plano a 0,80m e 43,91% para o plano a 1,60 m.

Por fim, o caso de incidência do vento a 270° (Figura 29) apresentou abrangência total média de 49,42%, sendo classificada como média. Inicialmente, a sala apresentou distribuição média de 55,40% no plano inferior, passando para 63,39% (ampla) no plano superior.

Figura 29 - Abrangência do escoamento para o ângulo de incidência do vento a 270°: a) plano 0,80 m e b) plano 1,60 m



Fonte: elaborado pela autora (2025).

O mesmo incremento foi observado para os dois quartos. No entanto, o quarto 1, foi o ambiente com maior abrangência, com valores de 65,35% e 74,43% (ampla). O quarto 2, ao contrário, teve uma cobertura muito restrita, com 6,44% e 10,44%.

Para sintetizar a análise referente à abrangência do escoamento para todos os casos de incidência de vento, a Tabela 4 apresenta os valores e a classificação para distribuição do escoamento em cada ambiente, além da abrangência total média.

O Quadro 12 mostra a legenda da classificação da escala de cinco pontos, adaptada de Toledo (2006).

Quadro 12 - Legenda da classificação da escala de cinco pontos para a abrangência do escoamento

muito ampla	ampla	média	restrita	muito restrita
$A > 80\%$	$80\% \geq A > 60\%$	$60\% \geq A > 40\%$	$40\% \geq A > 20\%$	$A < 20\%$

Fonte: elaborado pela autora (2025).

Tabela 4 - Abrangência do escoamento

Plano de corte horizontal a 0,80 m do piso

Ângulo de incidência	Sala	Quarto 1	Quarto 2	Total (média)
0°	62,37%	63,12%	31,24%	52,25%
90°	68,45%	14,50%	69,74%	50,89%
180°	82,97%	0,95%	52,04%	45,32%
270°	55,40%	65,35%	6,44%	42,40%

Plano de corte horizontal a 1,60 m do piso

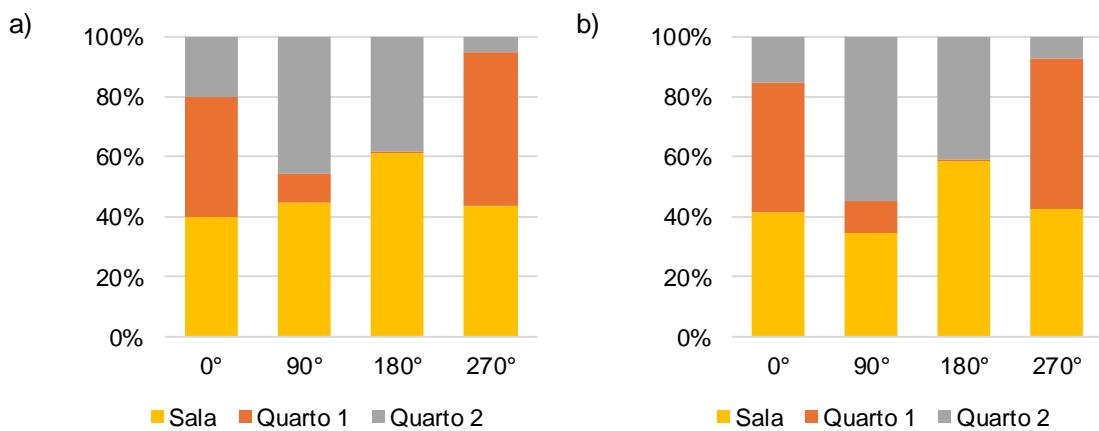
Ângulo de incidência	Sala	Quarto 1	Quarto 2	Total (média)
0°	78,88%	81,72%	28,35%	62,98%
90°	50,38%	16,05%	79,82%	48,75%
180°	62,79%	0,51%	43,91%	35,74%
270°	63,39%	74,43%	10,44%	49,42%

Fonte: elaborado pela autora (2025).

A Figura 30 e Figura 31 mostram que, de maneira geral a distribuição interna da ventilação natural ocorreu de forma heterogênea entre os ambientes.

O ângulo de 0° apresentou melhor distribuição, destacando-se a sala e o quarto 1 como os cômodos mais beneficiados. O vento incidente a 270° na HIS proporcionou comportamento semelhante, apresentando escoamentos razoavelmente abrangentes no dormitório 1 e na sala, mas ventilação muito restrita no dormitório 2.

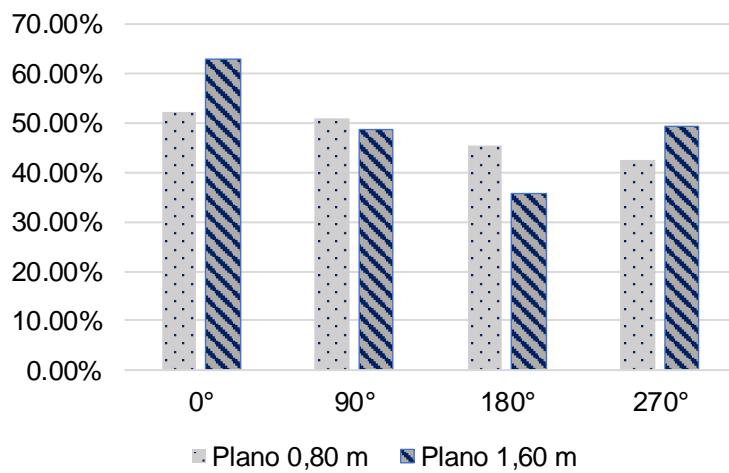
Figura 30 - Abrangência do escoamento por ambiente para: a) plano a 0,80 m do piso e b) plano a 1,60 m do piso



Fonte: elaborado pela autora (2025).

O ângulo de 90° beneficiou mais o quarto 2, com abrangência ampla para ambos os planos de corte horizontais. Entretanto, o quarto 1 se mostrou muito restrito em relação à distribuição do escoamento interno de ar. O ângulo de incidência a 180° evidenciou a distribuição desigual do vento, com ventilação muito ampla na sala (plano de corte horizontal a 0,80m do piso), mas quase inexistente no dormitório 1.

Figura 31 - Abrangência total média para cada ângulo de incidência do vento



Fonte: elaborado pela autora (2025).

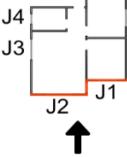
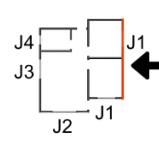
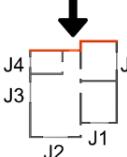
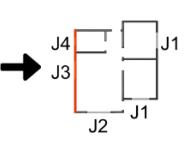
A avaliação da ventilação natural sob o aspecto da abrangência do escoamento proposto nesse trabalho, revelou-se uma ferramenta relevante na

avaliação da ventilação natural da edificação. Ao quantificar a proporção de áreas internas que recebem escoamento de ar em diferentes condições de incidência e altura, este indicador permite identificar de forma mais precisa os ambientes com velocidades de vento satisfatórias e, sobretudo, aqueles com deficiências significativas. Diferentemente de análises que consideram apenas quantidades pontuais, como a taxa de ventilação adimensional (DFR), a abrangência do escoamento oferece uma visão mais ampla e espacial da efetividade da ventilação natural no ambiente construído. Assim, seu uso representa um avanço metodológico importante no campo da simulação computacional aplicada às estratégias de conforto térmico e eficiência energética em edificações.

4.5 TEMPERATURA E UMIDADE

A análise dos parâmetros de temperatura e umidade na HIS estudada foi conduzida por meio de simulações termoenergéticas anuais, considerando as cidades de Joinville e Recife. Essas localidades estão inseridas, respectivamente, no clima temperado com verão quente e sem estação seca (ZB 3A) e no clima tropical quente de monção (ZB 5A).

Quadro 13 - Coeficientes de pressão do vento

Abertura	0°	90°	180°	270°
				
Janela J1 (dormitório 1)	0,633	-0,338	-0,185	-0,138
Janela J2 (sala)	0,576	-0,0818	-0,126	-0,421
Porta P1 (frente)	0,117	-0,216	-1,371	-0,373
Janela J1 (dormitório 2)	-0,181	0,398	-0,527	-0,165
Janela J3 (sala)	-0,0512	-0,164	-0,385	0,211
Janela J4 (banheiro)	-0,201	-0,211	-0,496	0,398
Porta P1 (fundos)	-0,125	-0,334	0,0303	-0,303

Fonte: elaborado pela autora (2025).

A partir das simulações BES, foram obtidos dados de temperatura operativa, ventilação (trocas de ar por hora) e umidade relativa nos ambientes de permanência prolongada. Esses resultados revelaram aspectos da interação entre ventilação natural e orientação solar para cada caso analisado.

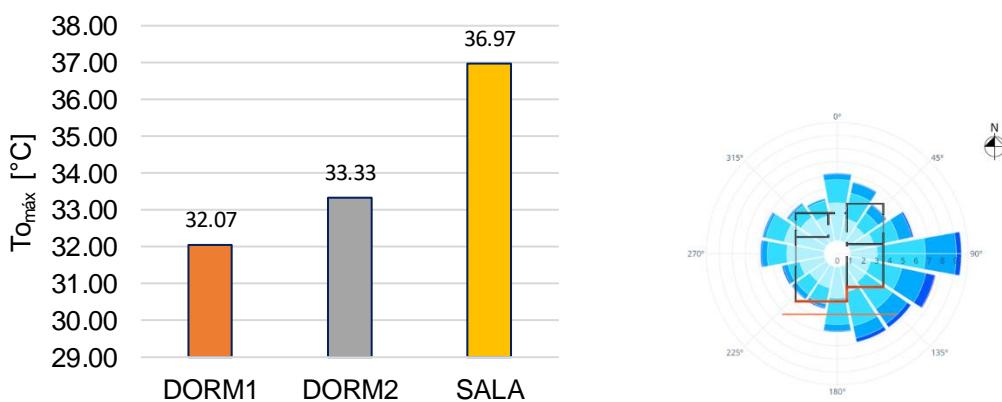
Realizou-se a integração entre as simulações CFD e BES com o objetivo de aprimorar a representatividade das condições reais da edificação estudada. Para isso, os coeficientes de pressão obtidos nas simulações CFD foram utilizados como dados de entrada nas simulações BES. Os dados são apresentados no quadro abaixo.

4.5.1 Joinville-SC

4.5.1.1 Caso base

Para a simulação termoenergética realizada em Joinville, considerando o caso base, ou seja, a orientação original de projeto (fachada principal voltada para a direção Sul), observou-se que a maior temperatura ($T_{\text{omáx}}$) verificada na HIS, considerando o período de ocupação de cada cômodo para o ano inteiro, foi na sala, com valor de 36,97°C, enquanto os dormitórios apresentaram valores mais amenos, com 32,07°C no dormitório 1 e 33,33°C no dormitório 2. A Figura 32 traz os valores para $T_{\text{omáx}}$ de cada ambiente de permanência prolongada.

Figura 32 - Temperatura operativa máxima - $T_{\text{omáx}}$ - caso base - Joinville

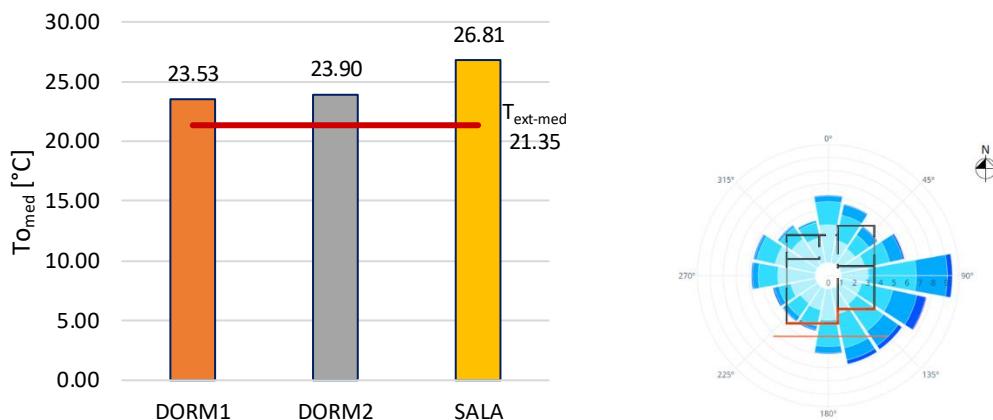


Fonte: elaborado pela autora (2025).

No que se refere à temperatura operativa média (T_{omed}) durante o período de ocupação do ambiente, a sala apresentou um valor de 26,81°C, indicando

uma tendência ao superaquecimento, enquanto os dormitórios mantiveram temperaturas médias dentro de um intervalo mais próximo do conforto térmico, com 23,53°C no dormitório 1 e 23,90°C no dormitório 2, ficando acima da média da temperatura externa (Figura 33).

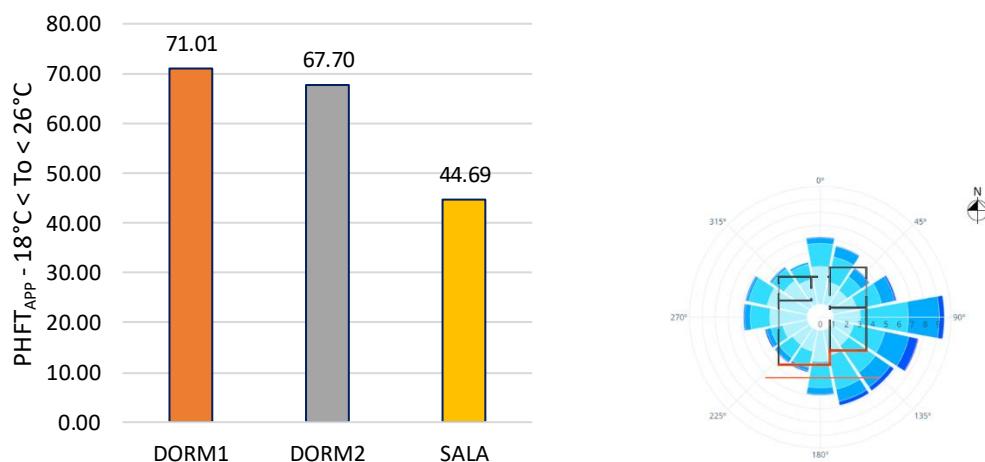
Figura 33 - Temperatura operativa média - T_{Omed} - caso base - Joinville



Fonte: elaborado pela autora (2025).

A análise do percentual de horas dentro da faixa de $18^{\circ}\text{C} < T_{\text{O}} < 26^{\circ}\text{C}$, representado pelo PHFT (Figura 34), evidencia a diferença de desempenho entre os ambientes. Enquanto os dormitórios 1 e 2 apresentaram percentuais relativamente altos (71,01% e 67,70%, respectivamente), a sala demonstrou um desempenho inferior, com apenas 44,69% das horas ocupadas dentro da faixa de conforto para o clima Cfa (ZB 3A).

Figura 34 - Percentual de horas na faixa de temperatura - PHFT_{APP} - caso base - Joinville

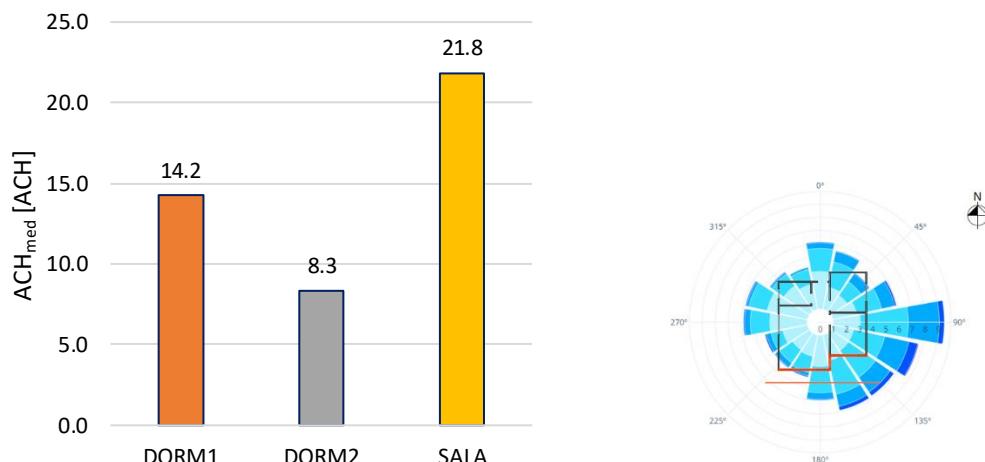


Fonte: elaborado pela autora (2025).

O PHFT_{UH} total da HIS, obtido pela média aritmética dos PHFT_{APP} de cada ambiente, totalizou 61,13%. Isso indica que, durante uma parte considerável do tempo ao longo do ano, os ambientes não estão dentro dos limites ideais de conforto térmico indicados pela NBR 15.575, apontando para a necessidade de arrefecimento ou aquecimento dos ambientes.

A ventilação natural desempenha um papel essencial na regulação térmica dos ambientes, e os dados de trocas de ar por hora média (ACH_{med}) durante a ocupação do ambiente, apresentados na Figura 35, evidenciam variações importantes entre os cômodos. A sala apresentou a maior taxa de ventilação, com 21,8 renovações de ar por hora, o que pode contribuir para o resfriamento em determinados períodos, mas também favorecer a entrada de calor quando as condições externas são adversas. O dormitório 1 registrou um valor intermediário de 14,2 trocas de ar por hora, enquanto o dormitório 2 obteve a menor taxa de ventilação (8,3), o que pode dificultar a dissipação do calor acumulado.

Figura 35 - Trocas de ar por hora média - ACH_{med} - caso base - Joinville

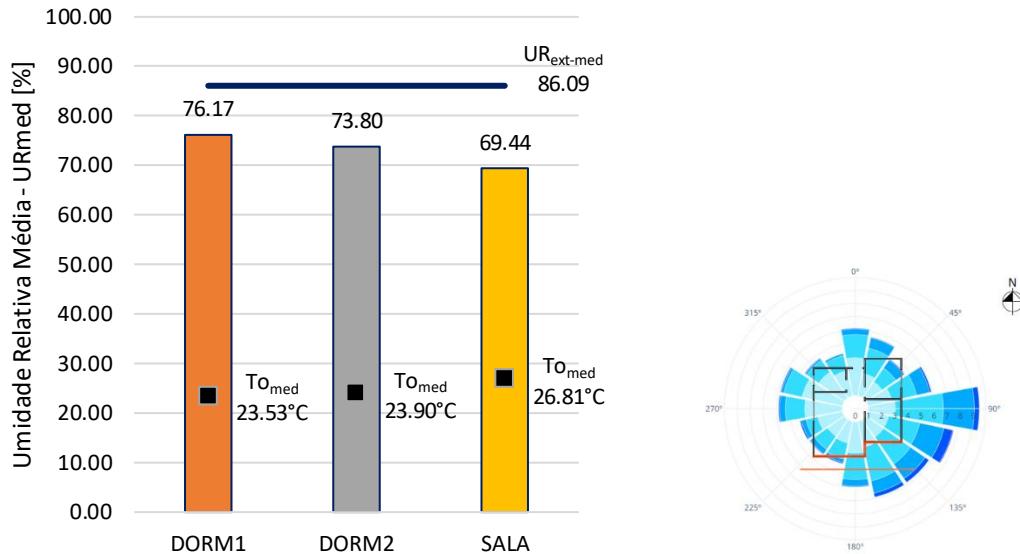


Fonte: elaborado pela autora (2025).

Além da temperatura e da ventilação, a umidade relativa do ar é outro fator determinante para o conforto ambiental. A umidade relativa média nos ambientes da residência apresentou variações consideráveis. A Figura 36 mostra que o dormitório 1 registrou um valor médio de 76,17%, seguido pelo dormitório 2, com 73,80%. A sala, apesar de ter obtido as maiores temperaturas, apresentou a menor umidade relativa média, de 69,44%.

Em comparação, a umidade relativa externa média foi de 86,09%, o que indica que os ambientes internos, apesar de mais secos, ainda apresentam um nível elevado de umidade, o que pode influenciar na sensação térmica e no conforto dos ocupantes.

Figura 36 - Umidade relativa média - UR_{med} - caso base - Joinville



Fonte: elaborado pela autora (2025).

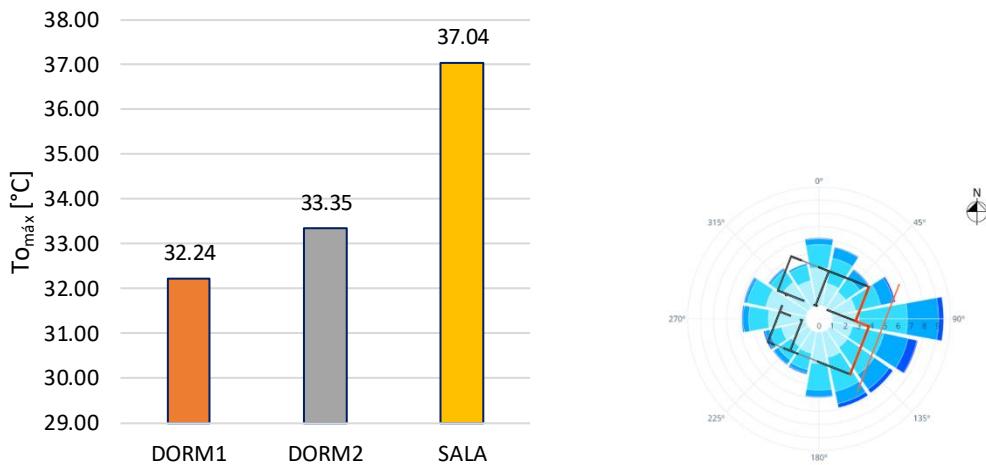
4.5.1.2 Caso 0°

O caso 0° considerou a fachada principal voltada perpendicularmente à direção Sudeste (110°), de modo a coincidir com o caso 0° das simulações CFD.

As temperaturas operativas máximas ($To_{máx}$) variaram significativamente entre os ambientes. O maior valor foi registrado na sala, atingindo 37,04°C, enquanto os quartos apresentaram valores menores: 33,35°C no dormitório 2 e 32,24°C no dormitório 1 (Figura 37). Essa diferença pode ser explicada pelo maior ganho térmico na sala, possivelmente devido à maior incidência solar.

Em relação à temperatura operativa média (To_{med}), a sala apresentou um valor de 26,58°C, indicando novamente uma tendência ao superaquecimento, enquanto os dormitórios mantiveram temperaturas médias de 23,67°C no dormitório 1 e 23,94°C no dormitório 2, ficando ainda acima, porém mais próximas da média da temperatura externa (Figura 38).

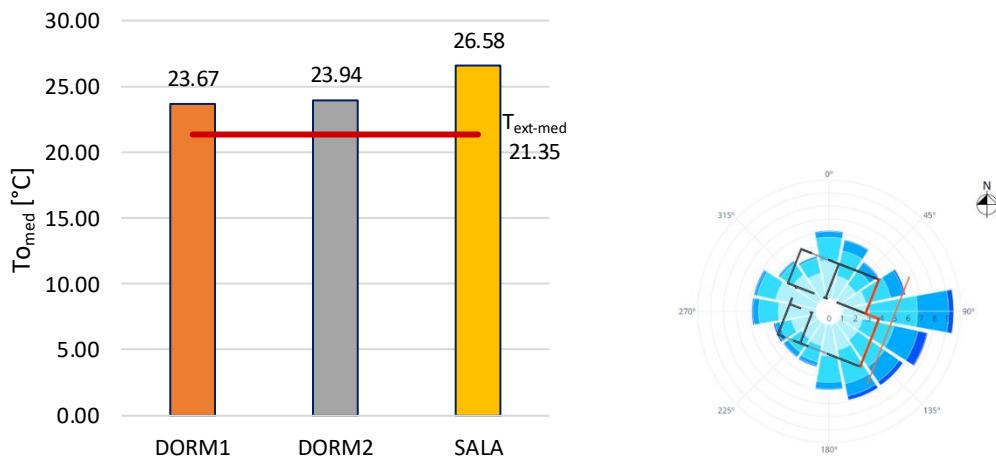
Figura 37 - Temperatura operativa máxima - $T_{\text{o máx}}$ - caso 0° - Joinville



Fonte: elaborado pela autora (2025).

Em relação ao percentual de horas na faixa de conforto térmico (PHFT), a Figura 39 mostra que o dormitório 1 registrou 70,66% das horas dentro dessa faixa, o dormitório 2 apresentou 67,51%, e a sala apenas 46,30%, confirmando a tendência a temperaturas mais elevadas. O PHFT_{UH} para a residência foi de 61,49%, o que significa que, em aproximadamente 40% do tempo, a residência encontrou-se fora da faixa de conforto.

Figura 38 - Temperatura operativa média - $T_{\text{o med}}$ - caso 0° - Joinville



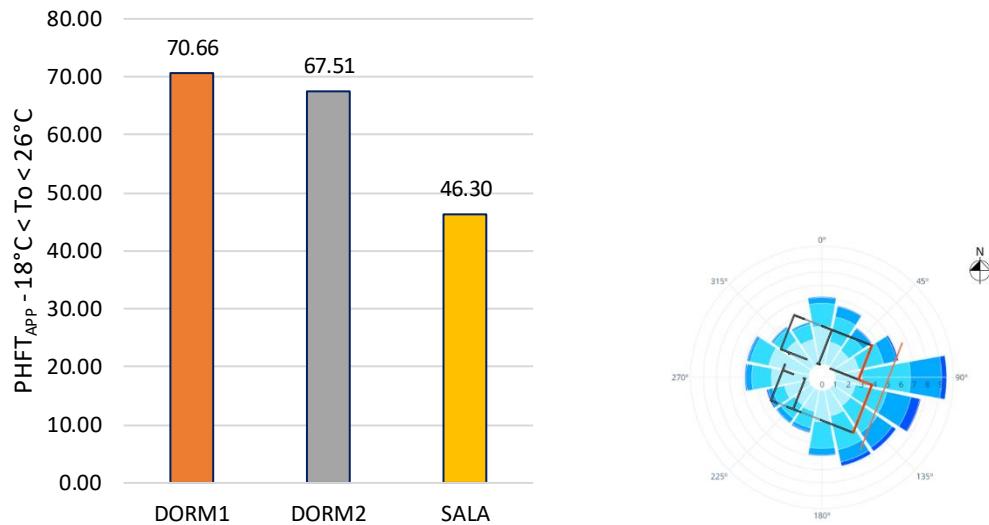
Fonte: elaborado pela autora (2025).

Os dados de trocas de ar por hora média (ACH_{med}) na Figura 40 mostram que o dormitório 1 apresentou em média 14,4 renovações de ar por hora, o dormitório 2 8,9 ACH, e a sala 25,1 ACH, evidenciando que a sala tem uma

renovação de ar mais elevada, o que pode contribuir para a dissipação do calor acumulado.

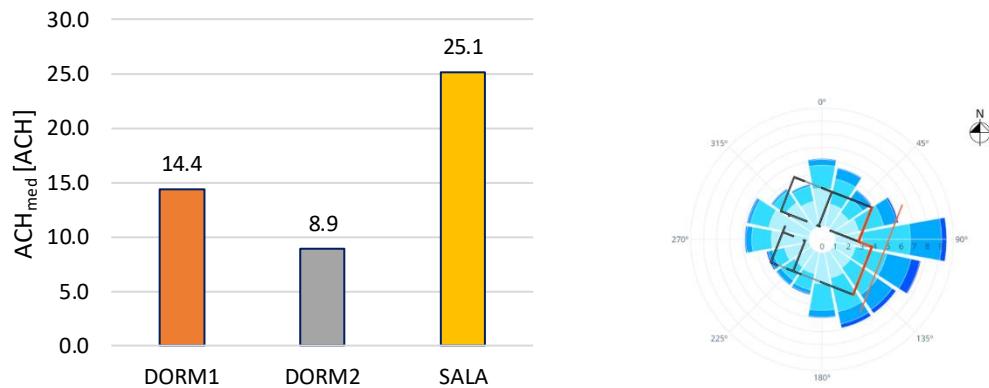
Contudo, a ventilação não pareceu ser suficiente para reduzir a $T_{o\max}$ da sala, indicando possíveis ganhos térmicos excessivos devido à orientação da edificação e à incidência solar.

Figura 39 - Percentual de horas na faixa de temperatura - $PHFT_{APP}$ - caso 0° - Joinville



Fonte: elaborado pela autora (2025).

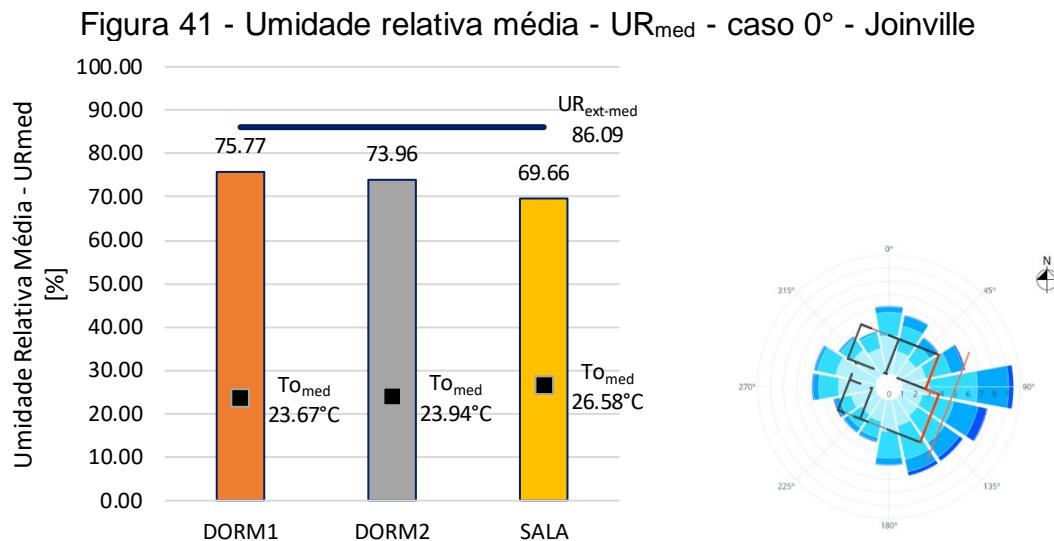
Figura 40 - Trocas de ar por hora média - ACH_{med} - caso 0° - Joinville



Fonte: elaborado pela autora (2025).

A análise da umidade relativa média (UR_{med}) na Figura 41 demonstra que os três ambientes apresentam níveis médios inferiores à umidade externa média (86,09%): 75,77% no dormitório 1, 73,96% no dormitório 2 e 69,66% na sala.

Novamente, observou-se a tendência da sala com maiores temperaturas e menores índices de umidade interna.



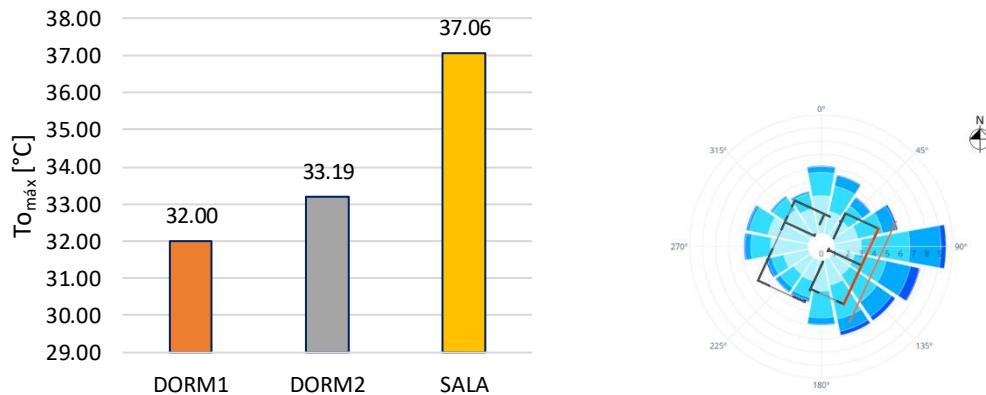
Fonte: elaborado pela autora (2025).

4.5.1.3 Caso 90°

O caso 90° considerou a fachada principal voltada para a direção Sudoeste (200°), com a fachada que compreende os dois dormitórios voltada para a direção de maior incidência de ventos, de modo a coincidir com o caso 90° das simulações CFD.

A Figura 42 fornece os valores de $To_{máx}$, indicando que a sala apresentou a temperatura mais elevada na residência, atingindo 37,06°C, seguida pelo quarto 2 (33,19°C) e pelo quarto 1 (32,00°C).

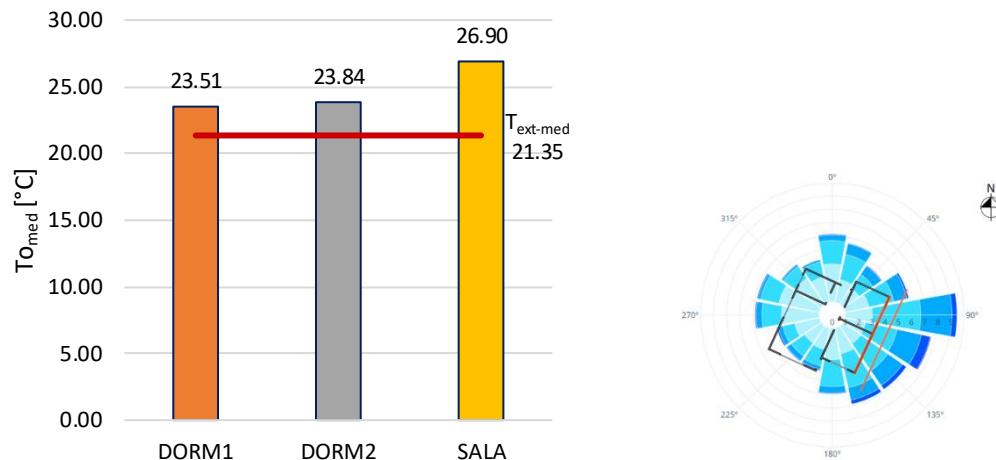
Figura 42 - Temperatura operativa máxima - $To_{máx}$ - caso 90° - Joinville



Fonte: elaborado pela autora (2025).

No que diz respeito à temperatura operativa média (T_{Omed}), a sala também registrou o valor mais alto (26,90°C), seguido pelos dormitórios 2 (23,84°C) e 1 (23,51°C). Os dados apresentados na Figura 43 mostram que os três ambientes da residência alcançaram temperaturas médias ainda acima da média da temperatura externa.

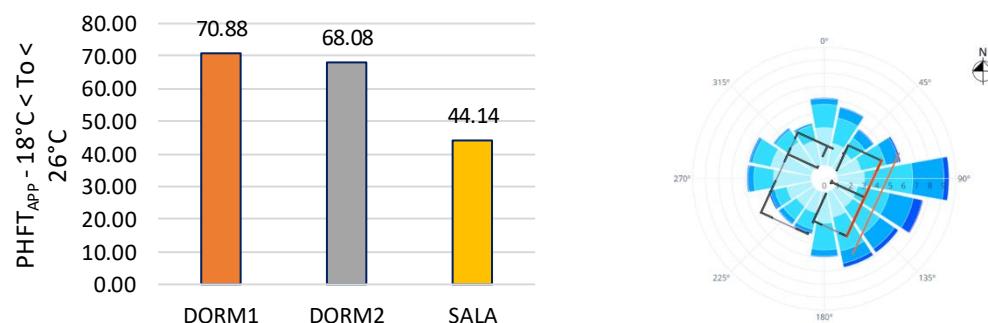
Figura 43 - Temperatura operativa média - T_{Omed} - caso 90° - Joinville



Fonte: elaborado pela autora (2025).

O percentual de horas dentro da faixa de conforto térmico (PHFT), apresentado na Figura 44, variou significativamente entre os dormitórios e a sala. O dormitório 1 apresentou o maior PHFT_{APP}, com 70,88%, seguido pelo dormitório 2 (68,08%) e, por último, a sala, com apenas 44,14%. Isso demonstra que os dormitórios permaneceram mais frequentemente dentro da faixa de conforto térmico, enquanto a sala apresentou um desempenho inferior nesse quesito.

Figura 44 - Percentual de horas na faixa de temperatura - PHFT_{APP} - caso 90° - Joinville

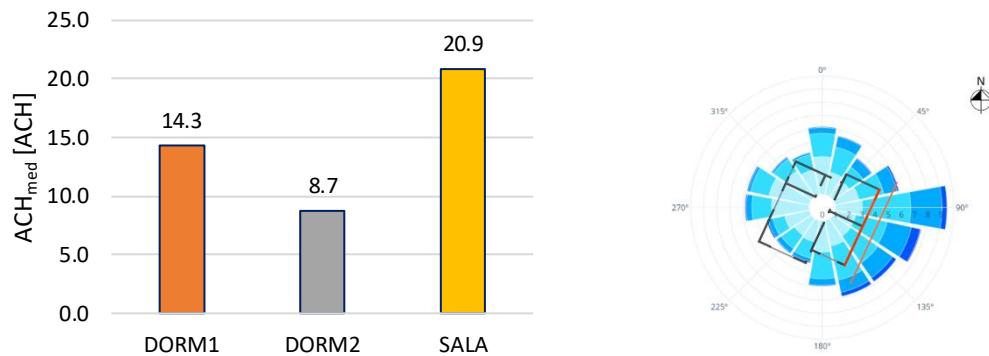


Fonte: elaborado pela autora (2025).

O PHFTUH alcançado pela HIS nesse caso foi de 61,03%, ou seja, a residência, em média, manteve-se dentro da faixa de conforto térmico durante 61,03% do tempo ao longo do ano.

A análise da taxa de renovação de ar (ACH_{med}) também revela diferenças importantes entre os ambientes. A sala apresentou a maior taxa de trocas de ar por hora (20,9 ACH), enquanto o dormitório 1 registrou 14,3 e o dormitório 2, 8,7 renovações de ar por hora (Figura 45).

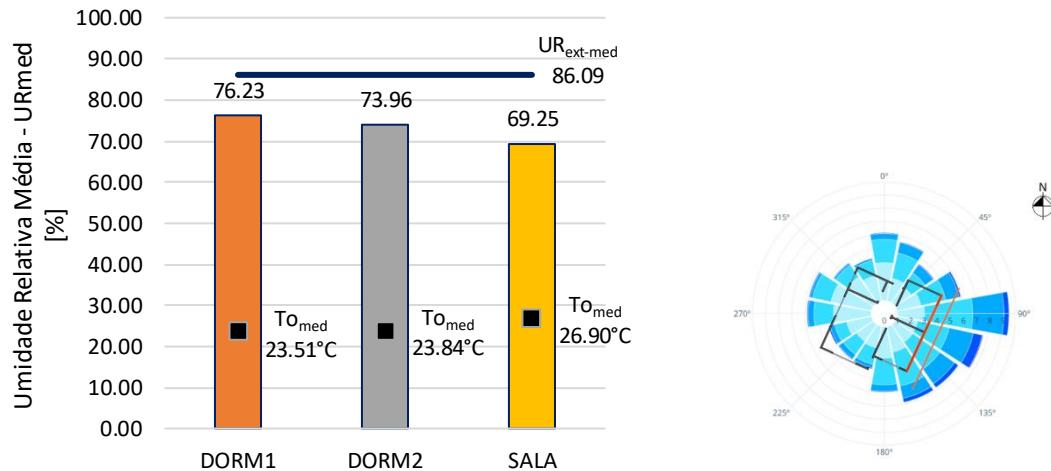
Figura 45 - Trocas de ar por hora média - ACH_{med} - caso 90° - Joinville



Fonte: elaborado pela autora (2025).

Em relação à umidade relativa média (UR_{med}), os dormitórios novamente apresentaram valores superiores à sala: dormitório 1 com 76,23%, dormitório 2 com 73,96% e sala com 69,25% (Figura 46). Comparando com a umidade relativa externa média, percebe-se que os ambientes internos apresentaram um nível de umidade reduzido em relação ao exterior.

Figura 46 - Umidade relativa média - UR_{med} - caso 90° - Joinville



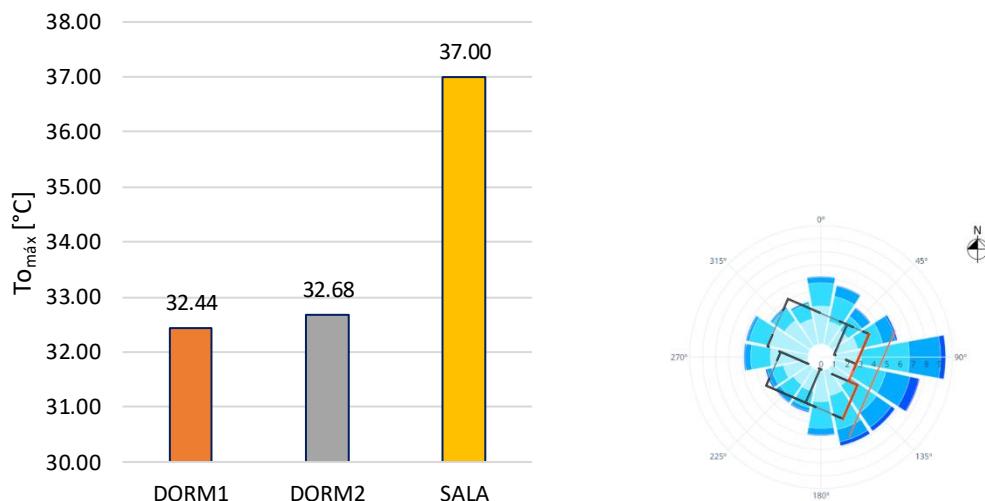
Fonte: elaborado pela autora (2025).

4.5.1.4 Caso 180°

O caso 180° considerou a fachada principal voltada para a direção Noroeste (290°), com a fachada que compreende o dormitório 2 e o banheiro voltada para a direção de maior incidência de ventos, de modo a coincidir com o caso 180° das simulações CFD.

A Figura 47 apresenta as temperaturas operativas para os três ambientes de permanência prolongada da residência. Novamente, a maior temperatura operativa máxima ($T_{o\max}$) foi registrada na sala, atingindo 37,00°C, enquanto os dormitórios apresentaram valores mais baixos, 32,44°C no dormitório 1 e 32,68°C no dormitório 2. Isso sugere que a sala possui maior exposição ao ganho térmico, possivelmente devido à orientação da edificação em relação à incidência solar.

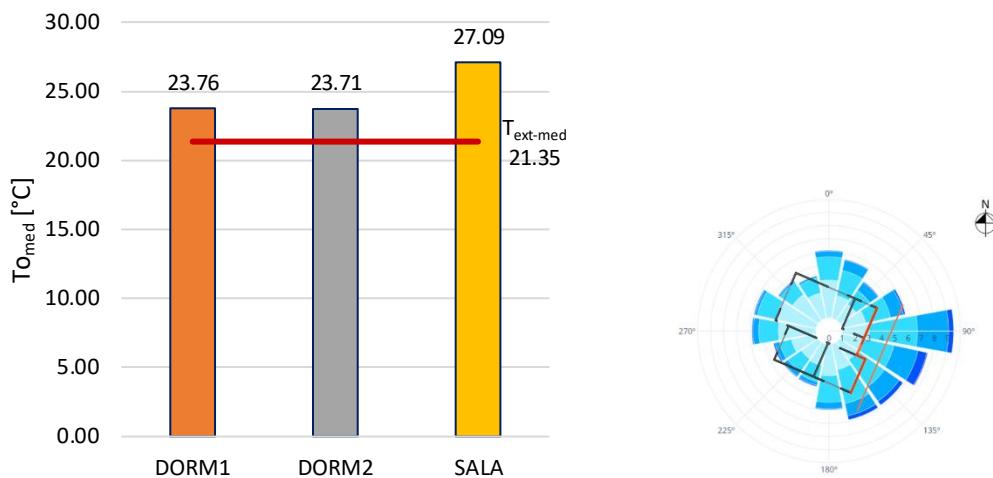
Figura 47 - Temperatura operativa máxima - $T_{o\max}$ - caso 180° - Joinville



Fonte: elaborado pela autora (2025).

A temperatura operativa média ($T_{o\text{med}}$) foi 27,09°C na sala, superior aos valores dos dormitórios, que ficaram próximos a 23,76°C (dormitório 1) e 23,71°C (dormitório 2). Esses valores (Figura 48) indicam que os dormitórios apresentaram um desempenho térmico mais favorável, mantendo-se mais próximos das condições de conforto térmico ao longo do ano.

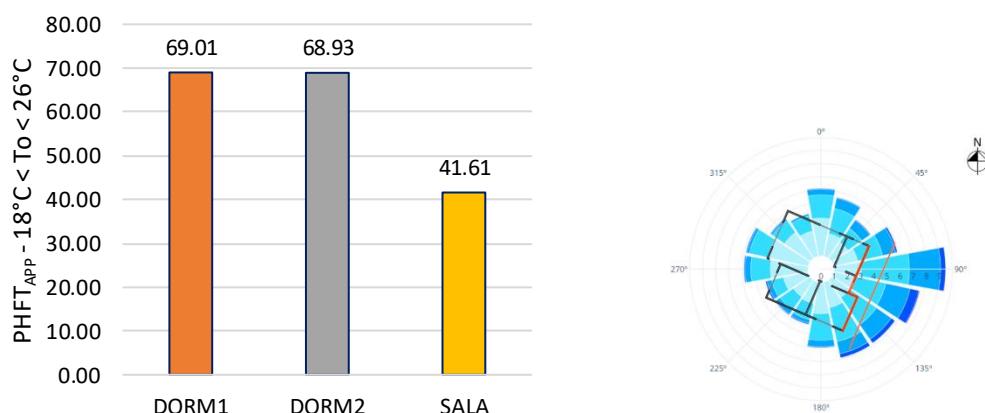
Figura 48 - Temperatura operativa média – $T_{O_{med}}$ - caso 180° - Joinville



Fonte: elaborado pela autora (2025).

O percentual de horas em que os ambientes permaneceram na faixa de conforto térmico ($18^{\circ}\text{C} < T_O < 26^{\circ}\text{C}$), PHFT_{APP} , também variou entre os cômodos, com 69,01% para o dormitório 1 e 68,93% para o dormitório 2. Nesse caso (Figura 49), a sala atingiu apenas 41,61% das horas dentro da faixa de temperatura. Assim, o PHFT_{UH} para essa orientação da residência foi de apenas 59,85%. Isso significa que, em média, a residência apresentou temperaturas dentro da faixa de conforto térmico em aproximadamente 59,85% do tempo ao longo do ano.

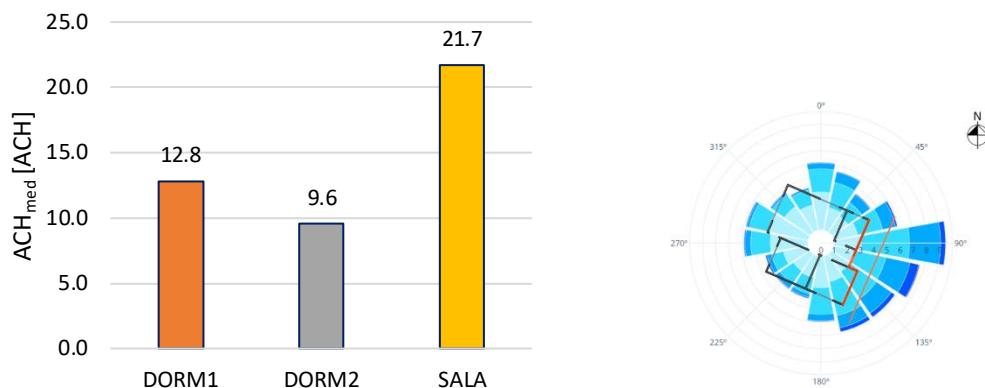
Figura 49 - Percentual de horas na faixa de temperatura - PHFT_{APP} - caso 180° - Joinville



Fonte: elaborado pela autora (2025).

Os dados de trocas de ar por hora média (ACH_{med}) apresentados na Figura 50, também evidenciam variações entre os cômodos.

Figura 50 - Trocas de ar por hora média - ACH_{med} - caso 180° - Joinville

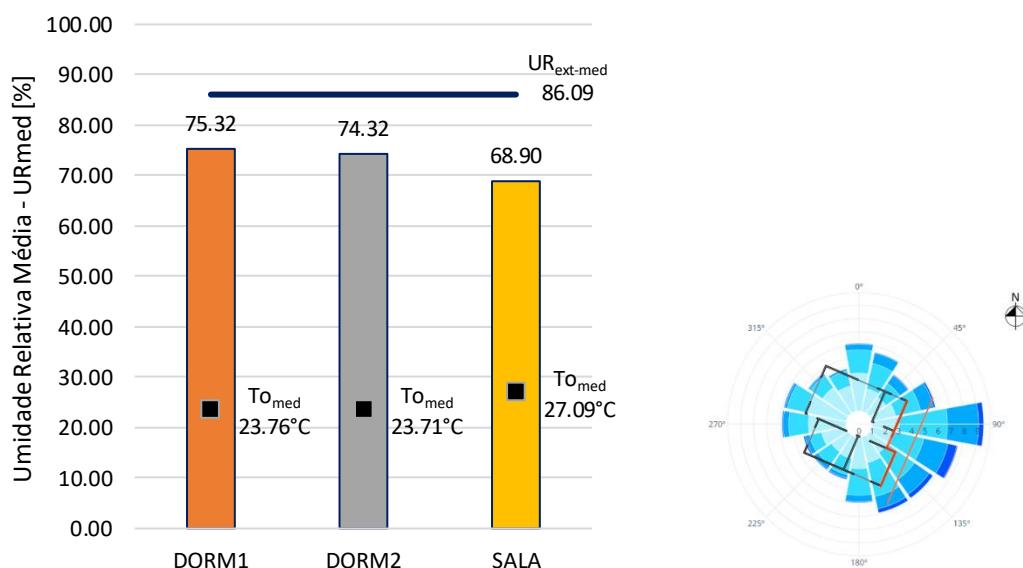


Fonte: elaborado pela autora (2025).

A sala registrou a maior taxa de ventilação média, com 21,7 renovações de ar por hora, o que pode contribuir para o resfriamento em determinados períodos, mas também favorecer a entrada de calor quando as condições externas são adversas. O dormitório 1 registrou um valor intermediário de 12,8 trocas de ar por hora, enquanto o dormitório 2 obteve a menor taxa de ventilação (9,6), porém, um valor maior em comparação aos casos anteriores.

A umidade relativa média nos ambientes da residência apresentou variações consideráveis. A Figura 51 mostra que o dormitório 1 registrou um valor médio de 75,32%, seguido pelo dormitório 2, com 74,32%, e pela sala, que apresentou a menor umidade relativa média, de 68,90%.

Figura 51 - Umidade relativa média - UR_{med} - caso 180° - Joinville



Fonte: elaborado pela autora (2025).

Esses valores indicam que a umidade interna foi inferior à externa, o que é esperado devido ao efeito da ventilação e orientação solar. A sala, apesar de apresentar a menor umidade média, pode estar mais suscetível a variações devido à ventilação mais intensa.

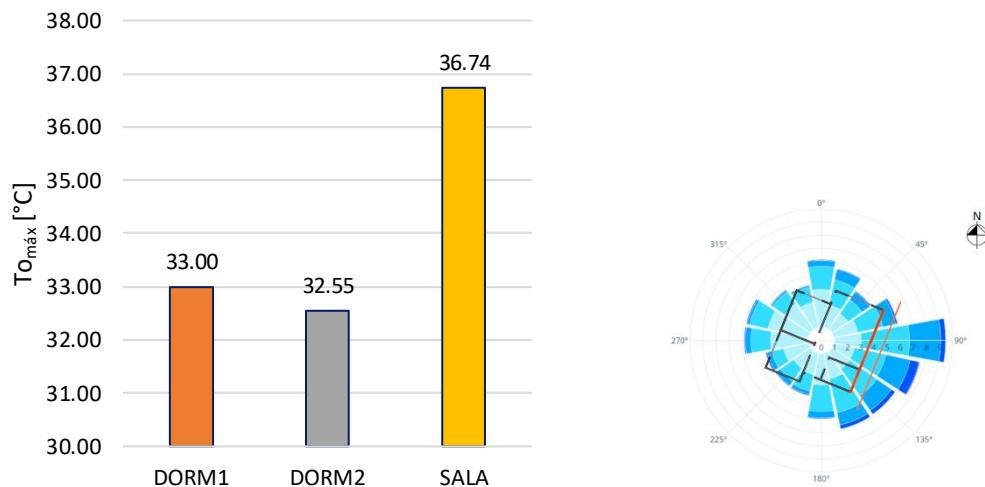
Novamente, observou-se a tendência de a sala apresentar as maiores temperaturas, ao mesmo tempo que revelou índices mais baixos de umidade interna.

4.5.1.5 Caso 270°

O caso 270° considerou a fachada principal voltada para a direção Nordeste (20°), com a fachada que compreende a janela lateral da sala e do banheiro voltada para a direção de maior incidência de ventos, de modo a coincidir com o caso 270° das simulações CFD.

Para as temperaturas operativas máximas ($T_{\text{máx}}$), Figura 52, a sala registrou a temperatura mais alta, atingindo 36,74°C, enquanto os dormitórios apresentaram valores menores, com 33,00° e 32,55°C, respectivamente.

Figura 52 - Temperatura operativa máxima - $T_{\text{máx}}$ - caso 270° - Joinville

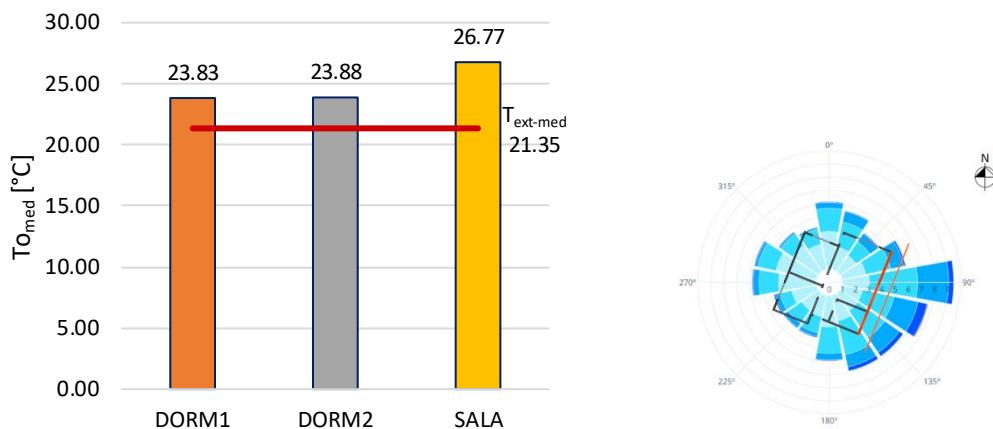


Fonte: elaborado pela autora (2025).

Isso indica maior exposição da sala ao ganho de calor, possivelmente devido à sua orientação.

A temperatura operativa média (T_{med}) também refletiu essa diferença, sendo maior na sala ($26,77^{\circ}\text{C}$), enquanto os dormitórios apresentam valores próximos entre si (Figura 53).

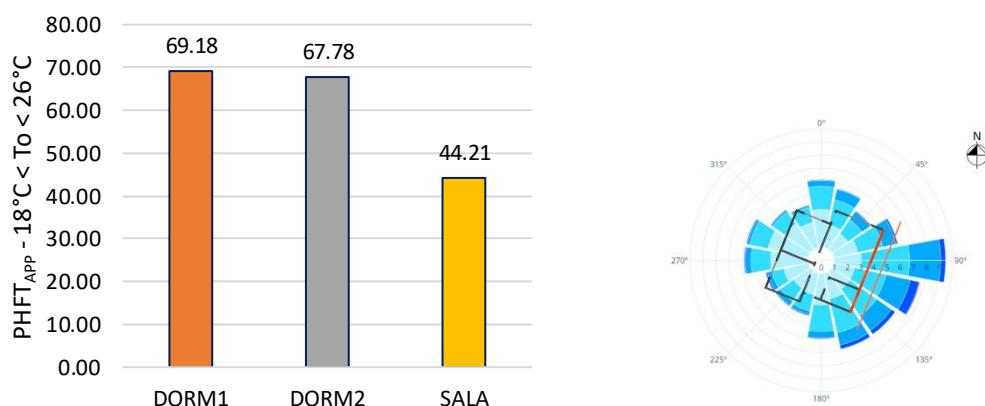
Figura 53 - Temperatura operativa média - T_{med} - caso 270° - Joinville



Fonte: elaborado pela autora (2025).

O percentual de horas dentro da faixa de conforto térmico (PHFT_{APP}), apresentado na Figura 54, também variou significativamente entre os dormitórios e a sala. O dormitório 1 apresentou o maior PHFT_{APP} , com 69,18%, seguido pelo dormitório 2 (67,78%) e, por último, a sala, com apenas 44,21%. Isso demonstra que os dormitórios permaneceram mais frequentemente dentro da faixa de conforto térmico, enquanto a sala apresentou um desempenho inferior nesse quesito.

Figura 54 - Percentual de horas na faixa de temperatura - PHFT_{APP} - caso 270° - Joinville

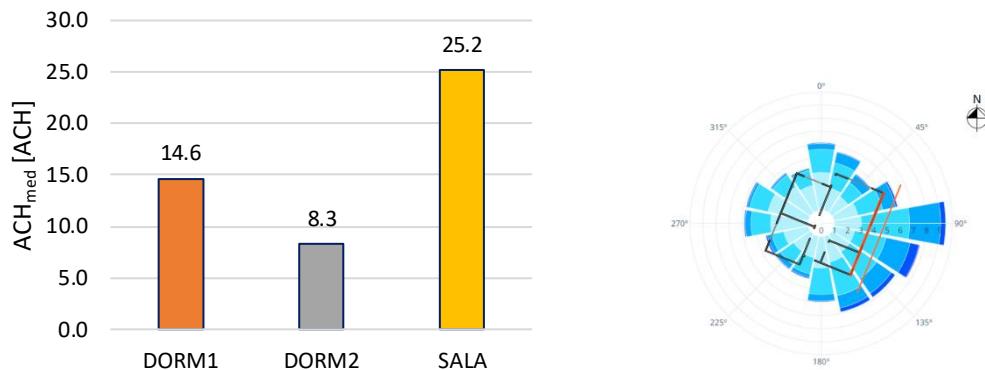


Fonte: elaborado pela autora (2025).

O PHFT_{UH} alcançado pela residência nesse caso foi de 60,39%, o que significa que, em média, a HIS permaneceu dentro da faixa de conforto térmico por cerca de 60% do tempo ao longo do ano.

A análise da taxa de renovação de ar (ACH_{med}) novamente revela diferenças importantes entre os ambientes. A sala apresentou a maior taxa de trocas de ar por hora (25,2 ACH), enquanto o dormitório 1 registrou 14,6 e o dormitório 2, 8,3 renovações de ar por hora (Figura 55).

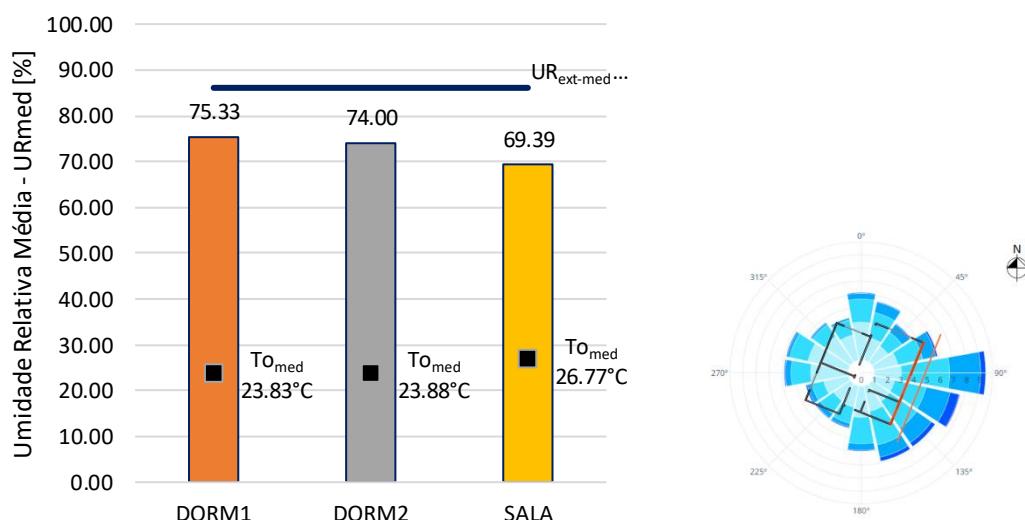
Figura 55 - Trocas de ar por hora média - ACH_{med} - caso 270° - Joinville



Fonte: elaborado pela autora (2025).

A umidade relativa média (UR_{med}), Figura 56, também variou entre os ambientes, sendo novamente maior nos dormitórios (75,33% no quarto 1 e 74,00% no quarto 2) e menor na sala (69,39%).

Figura 56 - Umidade relativa Média - UR_{med} - caso 270° - Joinville



Fonte: elaborado pela autora (2025).

Comparando com a umidade relativa média externa de 86,09%, observa-se que os ambientes internos também apresentaram nível de umidade reduzido em relação ao ambiente externo, possivelmente devido à ventilação e à incidência solar nos três ambientes de permanência prolongada.

4.5.2 Recife-PE

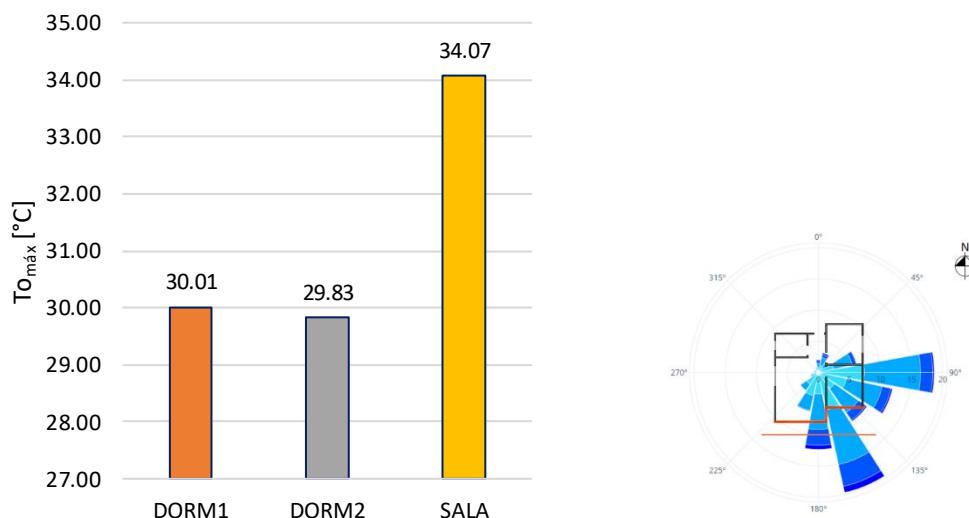
4.5.2.1 Caso base

Para a simulação termoenergética realizada em Recife, considerando o caso base, manteve-se a orientação original de projeto (fachada principal voltada para a direção Sul). Pela Figura 57, observou-se que a temperatura operativa máxima ($T_{0\text{máx}}$) foi mais elevada na sala (34,07°C), seguida pelo dormitório 1 (30,01°C) e pelo dormitório 2 (29,83°C).

Já a temperatura operativa média ($T_{0\text{med}}$), na Figura 58 também apresentou um comportamento similar, sendo maior na sala (29,23°C), intermediária no dormitório 2 (26,57°C) e menor no dormitório 1 (26,44°C), sendo que todos os ambientes superaram a temepratura externa média anual.

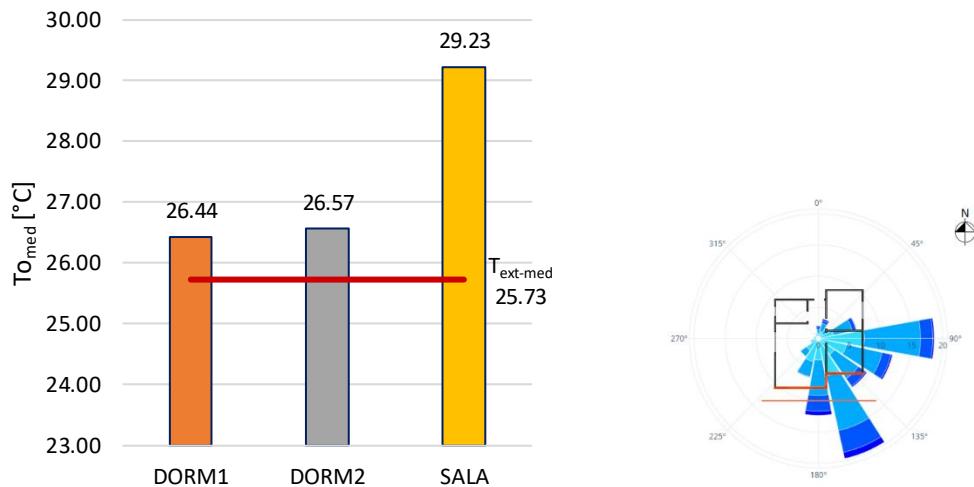
Esses dados mostram que a sala é o ambiente mais quente da residência, enquanto os dormitório tendem a ser mais confortáveis em termos de temperatura.

Figura 57 - Temperatura operativa máxima - $T_{0\text{máx}}$ - caso base - Recife



Fonte: elaborado pela autora (2025).

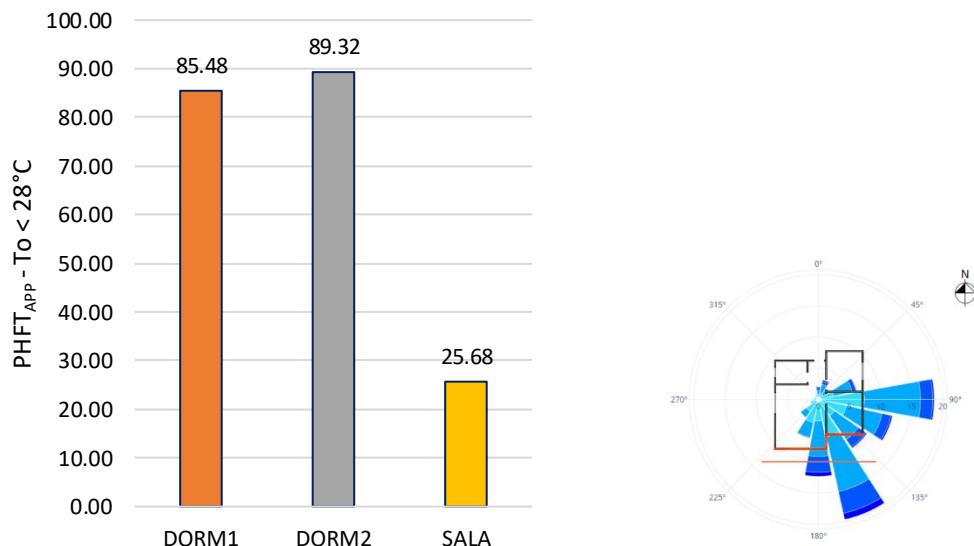
Figura 58 - Temperatura operativa média - T_{med} - caso base - Recife



Fonte: elaborado pela autora (2025).

O percentual de horas em que a temperatura ficou abaixo de 28°C (PHFT_{APP}) revela a proporção do tempo em que cada ambiente esteve dentro de uma faixa mais confortável de temperatura (Figura 59). O dormitório 2 apresentou o maior PHFT (89,32%), seguido pelo dormitório 1 (85,48%). A sala teve o menor percentual (25,68%), evidenciando que este ambiente está sujeito a maiores temperaturas por períodos prolongados. O PHFT_{UH} ficou em 66,83%.

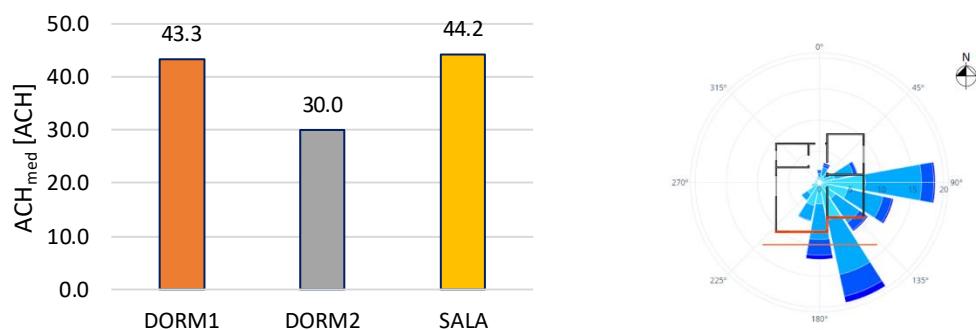
Figura 59 - Percentual de horas na faixa de temperatura - PHFT_{APP} - caso base - Recife



Fonte: elaborado pela autora (2025).

Quanto ao comportamento térmico dos ambientes relacionado às trocas de ar por hora média (ACH_{med}), observa-se na Figura 60 que a sala apresentou a maior taxa de renovação de ar (44,2 ACH), seguida pelo dormitório 1, com 43,3 ACH. Já o dormitório 2 registrou uma ventilação menor (30 ACH), o que pode justificar sua temperatura operativa superior à do dormitório 1. A sala, apesar de apresentar uma ventilação relativamente alta, ainda assim se mostrou o ambiente mais quente, possivelmente devido a sua maior exposição a ganhos térmicos externos e à orientação em relação aos ventos dominantes, uma vez que sua maior fachada está voltada para a direção Oeste.

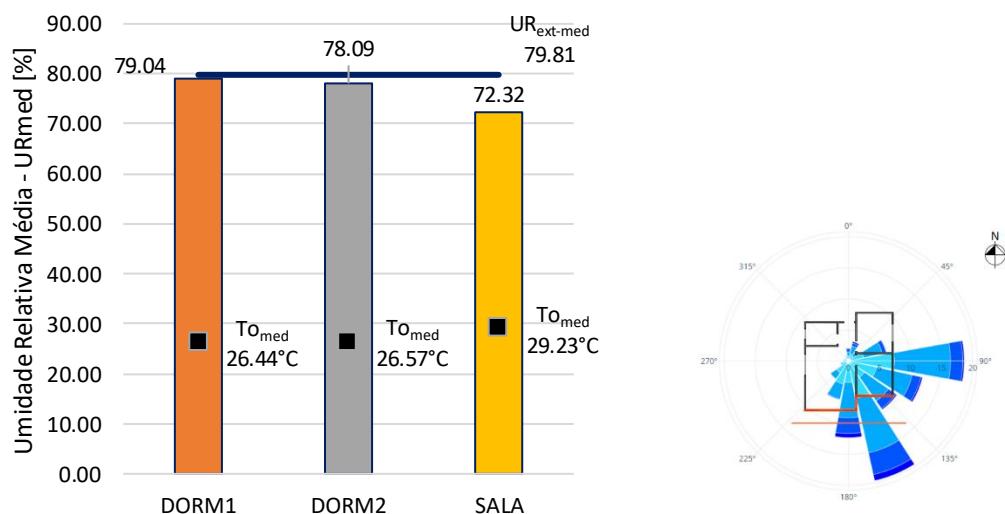
Figura 60 - Trocas de ar por hora média - ACH_{med} - caso base - Recife



Fonte: elaborado pela autora (2025).

Quanto à umidade relativa média (UR_{med}), verifica-se, pela Figura 61, que o dormitório 1 apresentou a maior umidade média (79,04%), muito próxima da umidade externa média (79,81%).

Figura 61 - Umidade relativa média - UR_{med} - caso base - Recife



Fonte: elaborado pela autora (2025).

O dormitório 2 registrou uma umidade menor (78,09%), enquanto a sala teve a umidade relativa mais baixa (72,32%), o que pode estar associado às suas temperaturas mais elevadas e ao horário de ocupação desse ambiente, resultando em um ar relativamente mais seco.

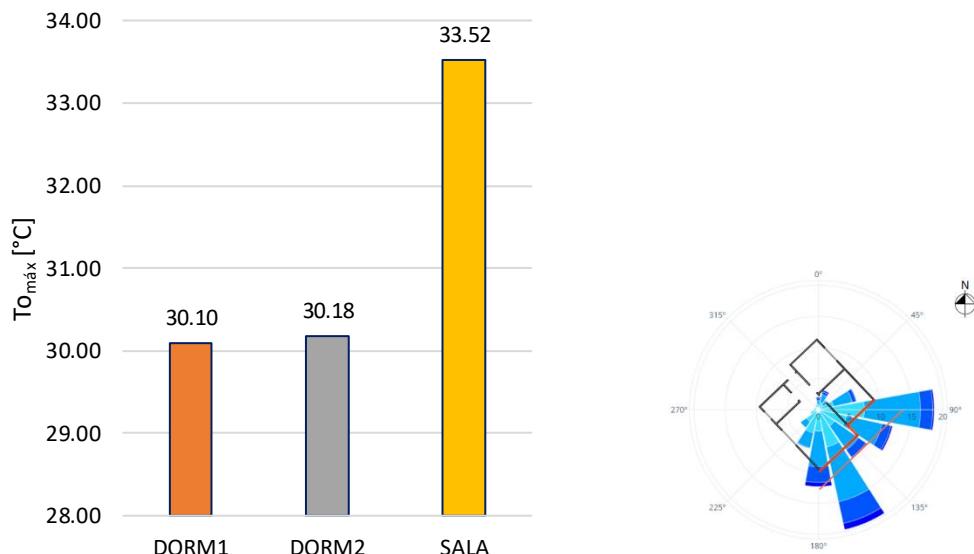
4.5.2.2 Caso 0°

O caso 0° considerou a fachada principal voltada perpendicularmente à direção Sudeste (135°), de modo a coincidir com o caso 0° das simulações CFD.

Para esse caso, os dados da Figura 62 indicam que a sala é o ambiente mais crítico, registrando a maior temperatura operativa máxima (33,52°C) e a maior temperatura média (29,06°C). Em contrapartida, os dormitórios apresentaram temperaturas máximas menores, sendo 30,10°C para o dormitório 1 e 30,18°C para o dormitório 2.

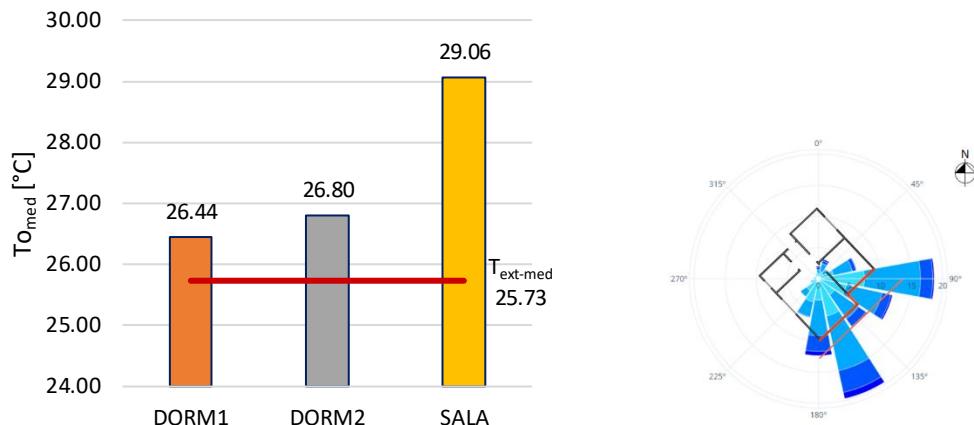
As temperaturas médias (Figura 63) nos dormitórios também foram inferiores às da sala, com 26,44°C no dormitório 1 e 26,80°C no dormitório 2. Porém, ainda permaneceram acima da temperatura média externa registrada ao longo do ano (25,73°C).

Figura 62 – Temperatura operativa máxima – $T_{\text{omáx}}$ - caso 0° - Recife



Fonte: elaborado pela autora (2025).

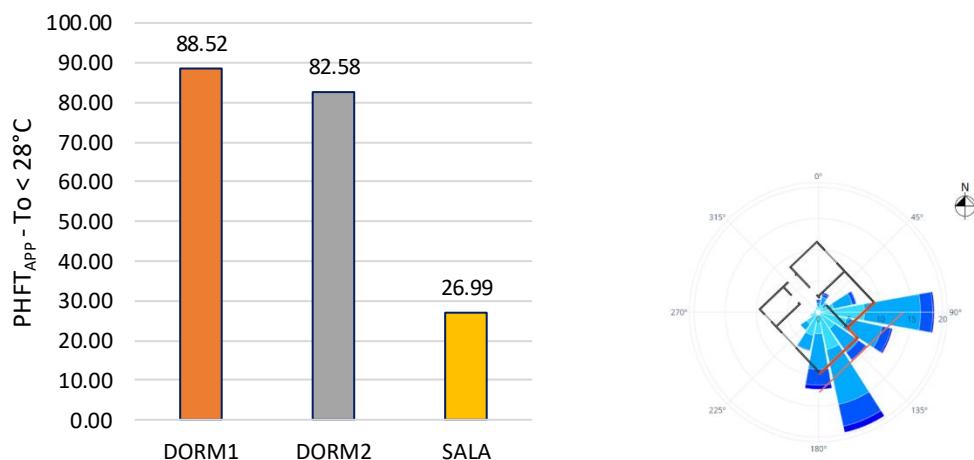
Figura 63 - Temperatura operativa média - T_{med} - caso 0° - Recife



Fonte: elaborado pela autora (2025).

Pela análise da Figura 64, observam-se os dados relativos ao percentual de horas com temperatura abaixo de 28°C (PHFT_{APP}) para os três ambientes. Nesse sentido, os dormitórios apresentaram um PHFT elevado, com 88,52% para o dormitório 1 e 82,58% para o dormitório 2, indicando que esses espaços permaneceram grande parte do tempo em condições térmicas mais aceitáveis. A sala, por outro lado, teve um PHFT de apenas 26,99%, evidenciando que permaneceu a maior parte do tempo acima do limite de 28°C. Calculando a média aritmética do PHFT para a residência como um todo, o PHFT_{UH} resultou em 66,03%, o que indica que, de maneira geral, a residência apresenta condições térmicas relativamente favoráveis, mas com grande variação entre os ambientes.

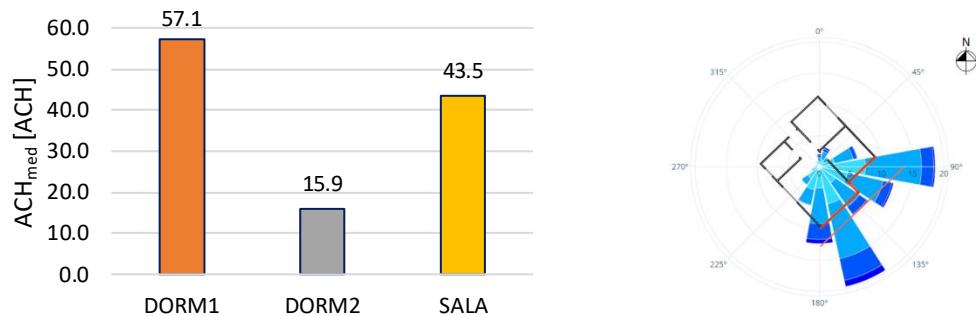
Figura 64 - Percentual de horas na faixa de temperatura - PHFT_{APP} - caso 0° - Recife



Fonte: elaborado pela autora (2025).

Os dados da Figura 65 revelam as trocas de ar por hora (ACH_{med}) nos cômodos. O dormitório 1 apresentou o maior índice de renovação de ar, com 57,1 ACH, seguido pela sala com 43,5 ACH, enquanto o dormitório 2 teve um valor muito inferior, de apenas 15,9 ACH. Esses dados indicam que o dormitório 1 possui uma ventilação mais eficiente. Apesar da renovação de ar relativamente alta na sala, percebe-se a influência da orientação solar no ganho térmico, uma vez que as fachadas desse cômodo estão voltadas para sudeste e sudoeste. O dormitório 2, por sua vez, apresenta um menor índice de trocas de ar, o que pode influenciar na retenção de calor.

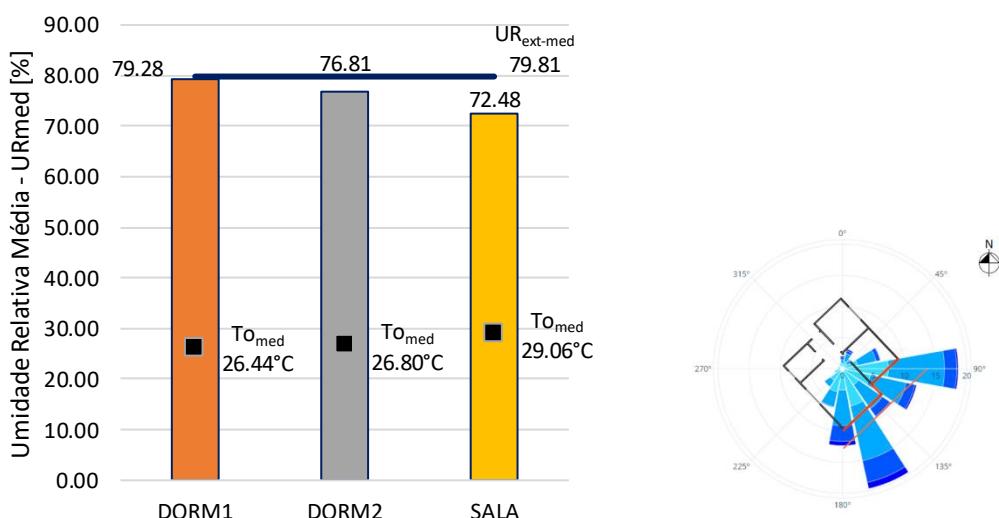
Figura 65 - Trocas de ar por hora média - ACH_{med} - caso 0° - Recife



Fonte: elaborado pela autora (2025).

A umidade relativa média (UR_{med}), analisada pela Figura 66, indica os valores de 79,28% para o dormitório 1, 76,81% para o dormitório 2 e 72,48% para a sala.

Figura 66 - Umidade relativa média - UR_{med} - caso 0° - Recife



Fonte: elaborado pela autora (2025).

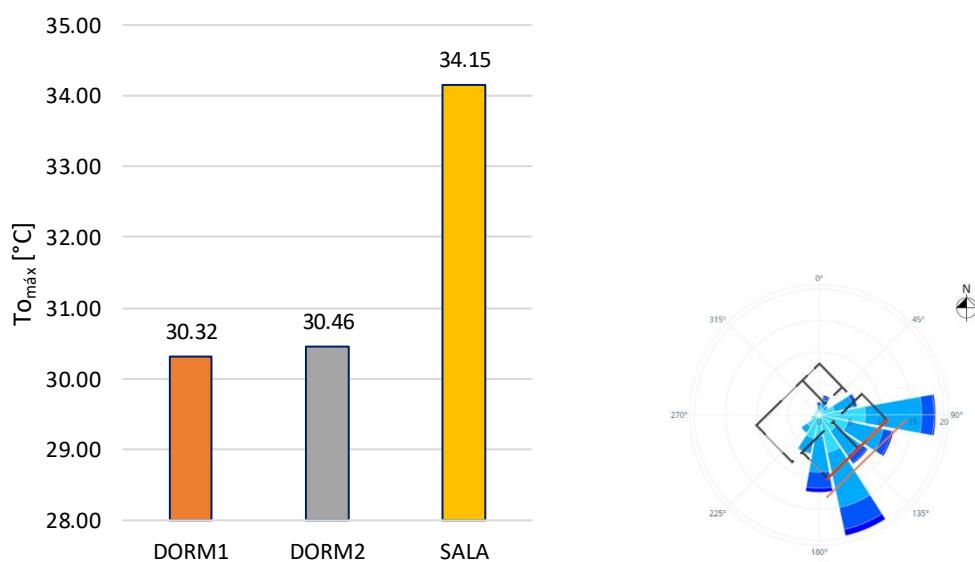
A umidade no dormitório 1 novamente ficou muito próxima da umidade externa média (79,81%), enquanto a sala teve a umidade relativa mais baixa, o que pode estar associado às suas temperaturas mais elevadas e ao horário de ocupação desse ambiente, resultando em um ar mais seco em relação aos outros ambientes e ao ambiente externo.

4.5.2.3 Caso 90°

O caso 90° considerou a fachada principal voltada para a direção Sudoeste (225°), com a fachada que compreende os dois dormitórios voltada para a direção de maior incidência de ventos, de modo a coincidir com o caso 90° das simulações CFD.

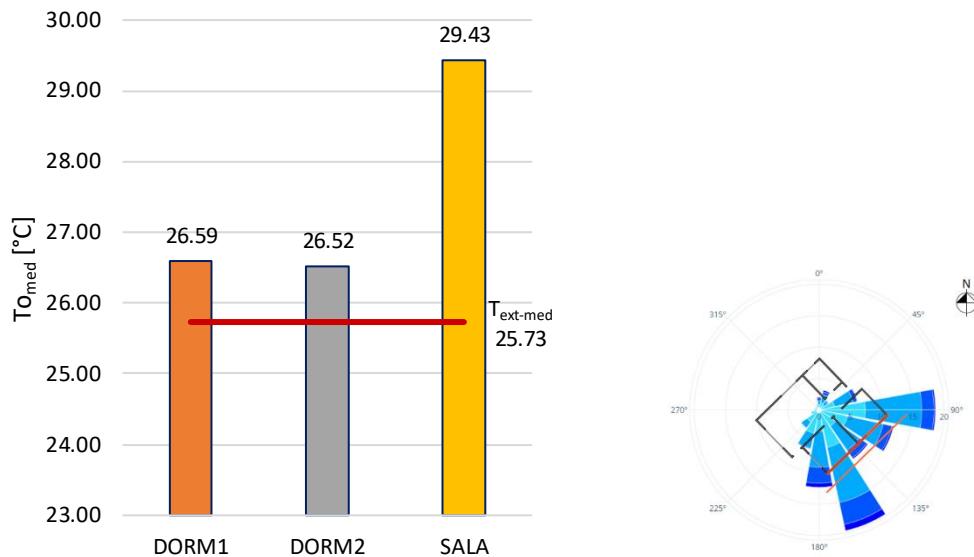
Em relação às temperaturas operativas máximas ($T_{\text{o máx}}$) na Figura 67, os resultados indicam que a sala apresentou valor mais alto (34,15°C) em comparação com os dormitórios 1 e 2 (30,32°C e 30,46°C, respectivamente). A temperatura operativa média ($T_{\text{o med}}$) também evidencia um comportamento semelhante (Figura 68), com a sala registrando 29,43°C, enquanto os dormitórios apresentaram temperaturas médias mais amenas (26,59°C e 26,52°C). Esse resultado evidencia que a sala está mais exposta a cargas térmicas elevadas, possivelmente devido à sua orientação, com maior incidência de radiação solar.

Figura 67 - Temperatura operativa máxima - $T_{\text{o máx}}$ - caso 90° - Recife



Fonte: elaborado pela autora (2025).

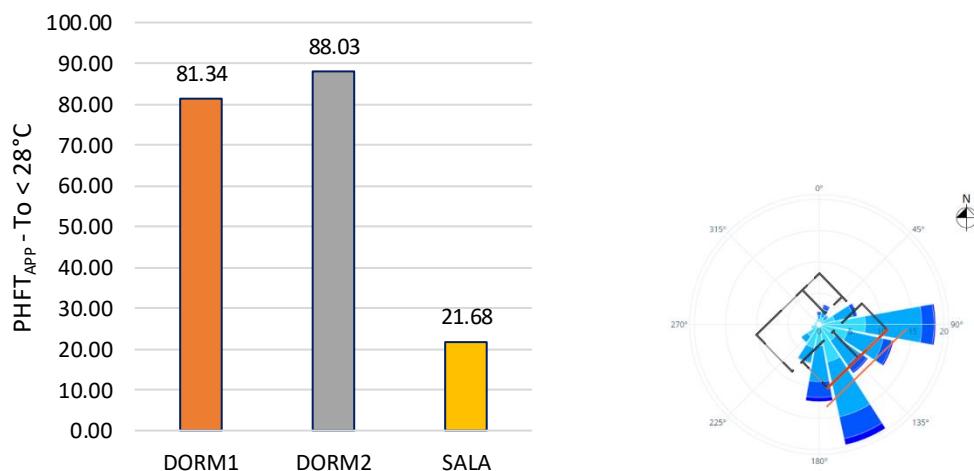
Figura 68 - Temperatura operativa média - T_{med} - caso 90° - Recife



Fonte: elaborado pela autora (2025).

O percentual de horas com temperatura abaixo de 28°C (PHFT_{APP}) apresentado na Figura 69 reforça essa observação. Nos dormitórios, os valores de 81,34% para o dormitório 1 e 88,03% para o dormitório 2 indicam que a maior parte do tempo esses ambientes permanecem em condições mais confortáveis. Em contrapartida, a sala apresenta apenas 21,68% das horas do ano com temperaturas abaixo de 28°C, demonstrando um desconforto térmico mais acentuado nesse espaço. O PHFT_{UH} da residência ficou em 63,68%.

Figura 69 - Percentual de horas na faixa de temperatura - PHFT_{APP} - caso 90° - Recife



Fonte: elaborado pela autora (2025).

Pela análise dos dados das trocas de ar por hora média (ACH_{med}) na Figura 70, observou-se uma mudança em relação aos casos anteriores. O dormitório 2 apresentou a maior taxa de ventilação, com uma média de 45,3 renovações de ar por hora, seguido pela sala, com 35,2 e pelo dormitório 1 (26,6).

Figura 70 - Trocas de ar por hora média - ACH_{med} - caso 90° - Recife

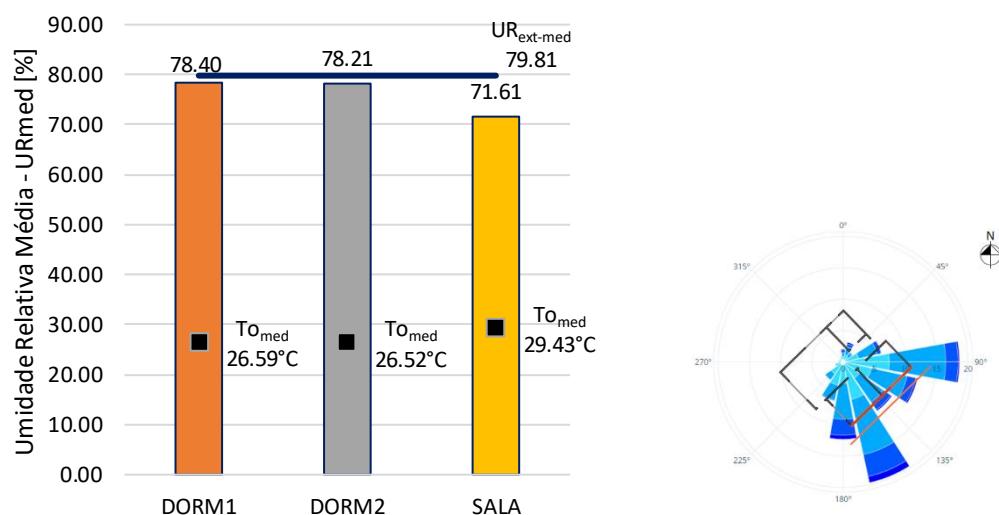


Fonte: elaborado pela autora (2025).

A maior ventilação no dormitório 2 pode justificar sua menor temperatura operativa média, indicando que a renovação do ar contribui para amenizar o desconforto térmico e é coerente com os resultados obtidos pelas simulações CFD, uma vez que a abertura do dormitório 2 está posicionada na direção de maior incidência de ventos.

Quanto à umidade relativa média (UR_{med}), os dormitórios apresentaram valores similares (Figura 71).

Figura 71 - Umidade relativa média - UR_{med} - caso 90° - Recife



Fonte: elaborado pela autora (2025).

O dormitório 1, com 78,40%, o dormitório 2 com 78,21%, ficaram muito próximos da umidade externa média (79,81%), o que indica que esses ambientes não sofrem uma variação significativa em relação ao meio externo. No entanto, a sala novamente apresenta um valor inferior (71,61%), o que pode indicar um maior aquecimento do ar interno e menor influência da umidade externa.

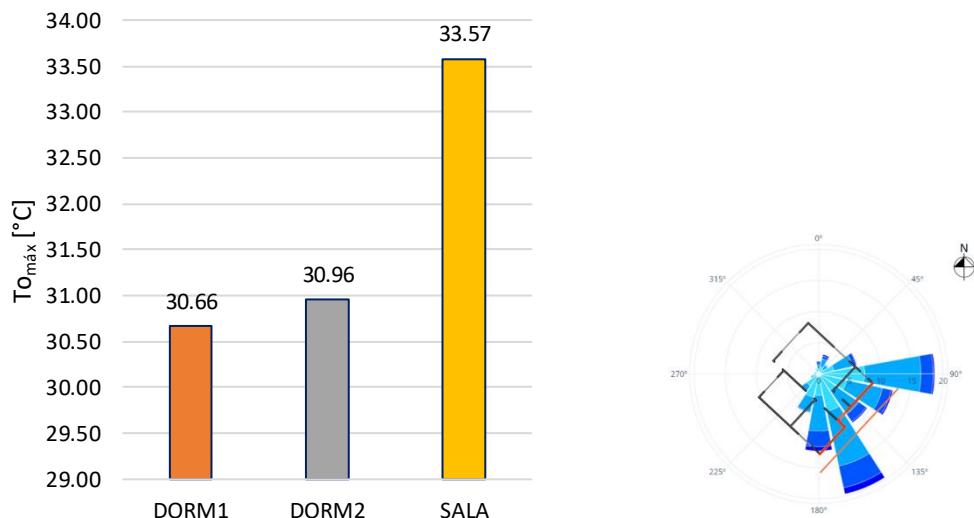
4.5.2.4 Caso 180°

O caso 180° considerou a fachada principal voltada para a direção Noroeste (315°), com a fachada que compreende o dormitório 2 e o banheiro voltada para a direção de maior incidência de ventos, de modo a coincidir com o caso 180° das simulações CFD.

A temperatura operativa máxima ($T_{\text{omáx}}$) foi mais elevada na sala (33,57°C), conforme a Figura 72. Os dormitórios apresentaram valores inferiores, com 30,66°C no dormitório 1 e 30,96°C no dormitório 2. Esses valores indicam que a sala experimenta um maior acúmulo de calor, possivelmente devido à maior exposição solar de suas fachadas em relação aos outros ambientes.

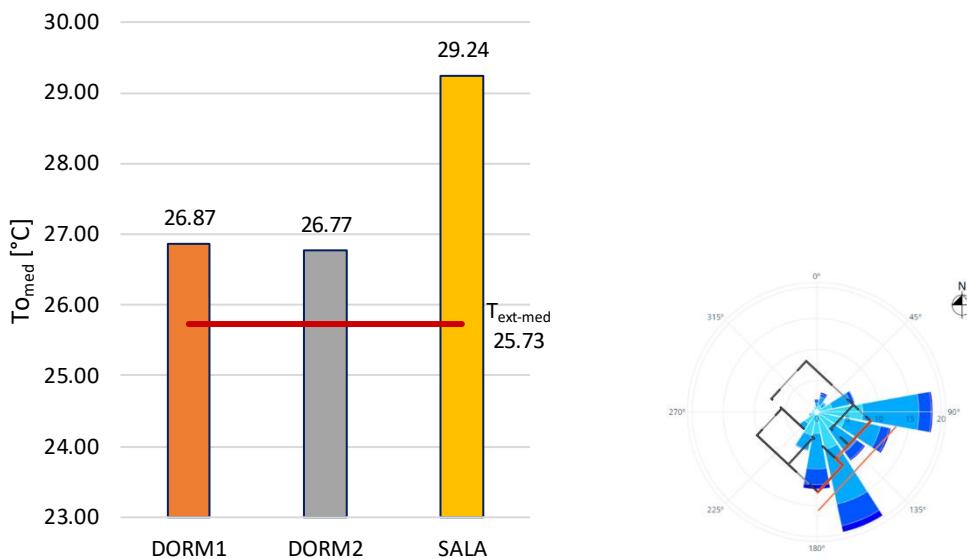
As temperaturas operativas médias (T_{omed}) apresentadas na Figura 73 também indicam essa discrepância, sendo 29,24°C na sala, 26,87°C no dormitório 1 e 26,77°C no dormitório 2. Isso significa que, em termos médios, os dormitórios mantêm condições mais amenas ao longo do ano em relação à sala.

Figura 72 - Temperatura operativa máxima - $T_{\text{omáx}}$ - caso 180° - Recife



Fonte: elaborado pela autora (2025).

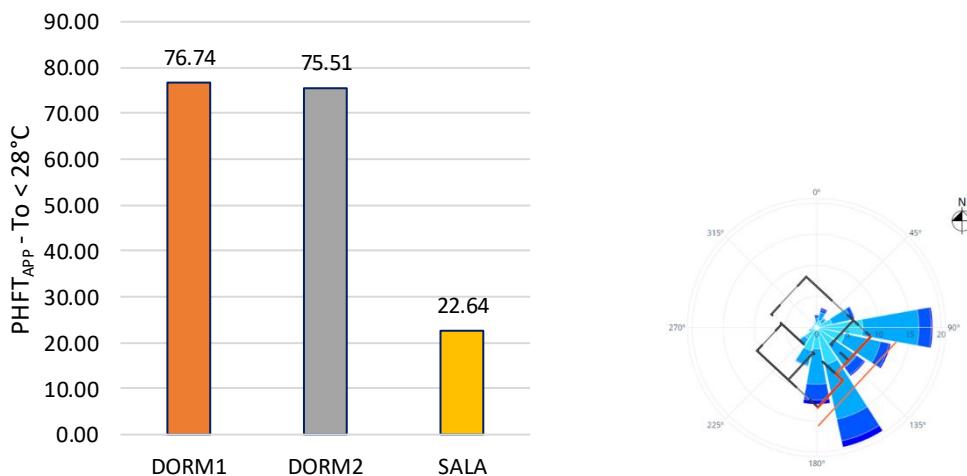
Figura 73 - Temperatura operativa média - T_{med} - caso 180° - Recife



Fonte: elaborado pela autora (2025).

O percentual de horas em que a temperatura permaneceu abaixo de 28°C (PHFT_{APP}) é mostrado na Figura 74. O dormitório 1 apresentou 76,74% das horas anuais com temperaturas abaixo de 28°C, o dormitório 2 obteve 75,51%, enquanto a sala registrou apenas 22,64%. Essa grande diferença demonstra que a sala tem um desempenho térmico muito inferior em comparação aos dormitórios. O PHFT_{UH} para toda a residência, considerando os três ambientes, é de 58,30%, sugerindo que pouco mais da metade do tempo a residência mantém temperaturas inferiores a 28°C ao longo do ano.

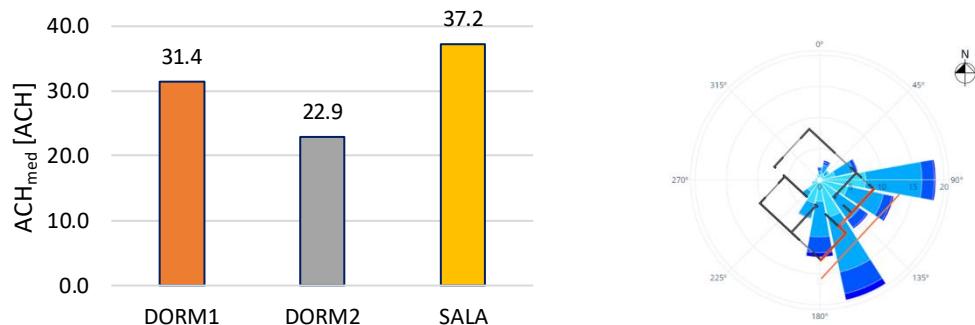
Figura 74 - Percentual de horas na faixa de temperatura - PHFT_{APP} - caso 180° - Recife



Fonte: elaborado pela autora (2025).

A análise da Figura 75 indica a taxa média de trocas de ar por hora (ACH_{med}) por ambiente. O valor mais alto foi registrado na sala (37,2 ACH), enquanto o dormitório 1 teve 31,4 ACH e o dormitório 2, 22,9 ACH. Apesar da maior taxa de ventilação da sala, seus altos valores para $T_{o\max}$ e $T_{o\text{med}}$ e baixo PHFT_{APP} sugerem que a ventilação, embora intensa, pode não ter sido eficaz para dissipar o calor.

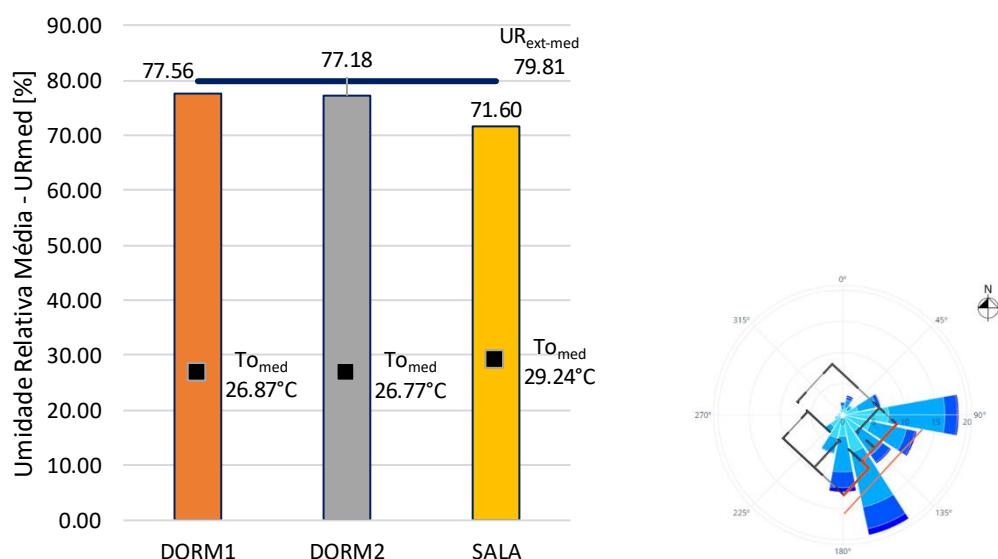
Figura 75 - Trocas de ar por hora média - ACH_{med} - caso 180° - Recife



Fonte: elaborado pela autora (2025).

Com relação à umidade relativa média (UR_{med}) analisada na Figura 76, os dormitórios apresentaram valores semelhantes (77,56% no quarto 1 e 77,18% no quarto 2), enquanto a sala teve umidade relativa média menor (71,60%).

Figura 76 - Umidade relativa média - UR_{med} - caso 180° - Recife



Fonte: elaborado pela autora (2025).

A umidade relativa externa média registrada foi de 79,81%, indicando que os dormitórios retêm mais umidade do que a sala. Menores índices de umidade podem compensar as temperaturas mais elevadas nesse cômodo.

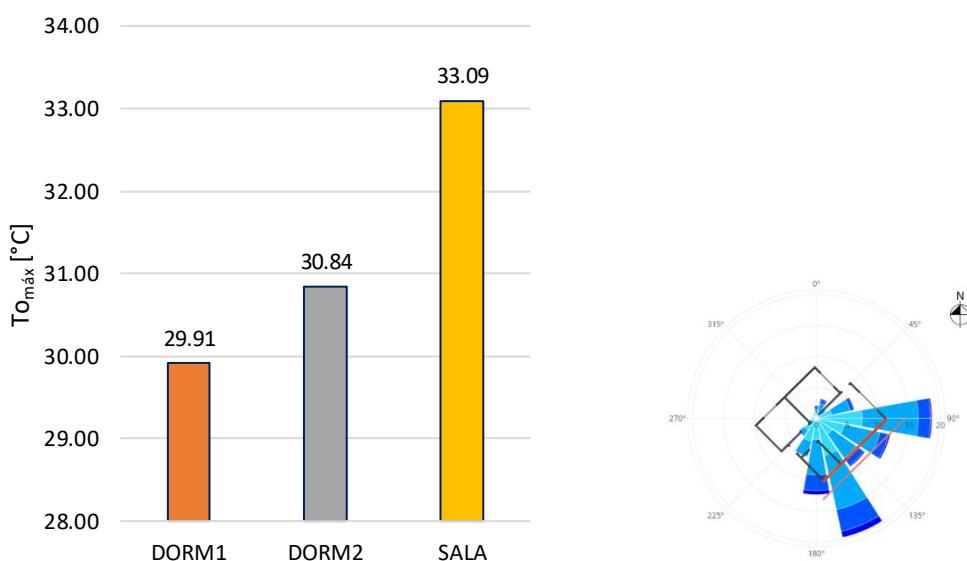
4.5.2.5 Caso 270°

O caso 270° considerou a fachada principal voltada para a direção Nordeste (45°), com a fachada que compreende a janela lateral da sala e do banheiro voltada para a direção de maior incidência de ventos, de modo a coincidir com o caso 270° das simulações CFD.

Pela Figura 77, as temperaturas operativas máximas ($T_{\text{O máx}}$) indicam que a sala atingiu a temperatura mais elevada, chegando a 33,09°C, enquanto os dormitórios 1 e 2 apresentaram valores menores, 29,91°C e 30,84°C, respectivamente. Isso sugere que a sala, sofre mais com o calor acumulado ao longo do dia.

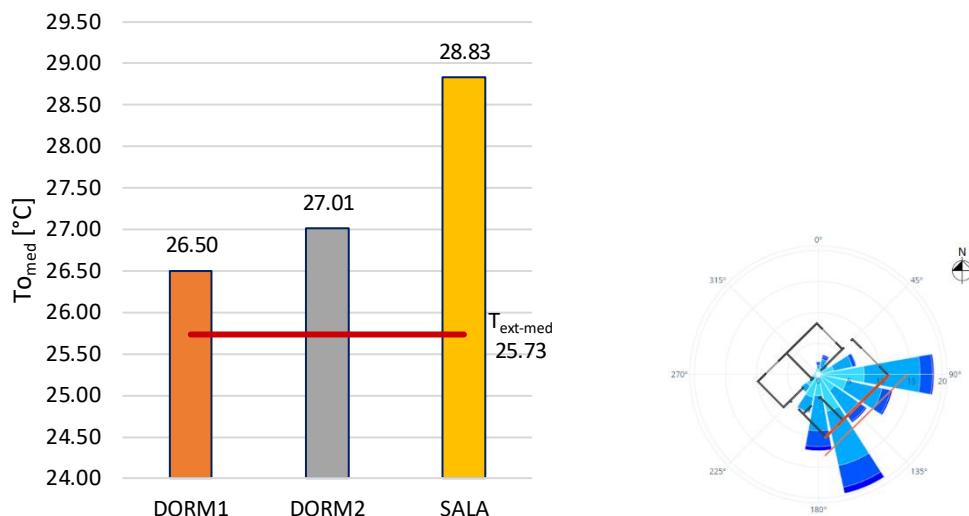
As temperaturas operativas médias ($T_{\text{O med}}$) mostradas na Figura 78 reforçam essa tendência, com a sala registrando 28,83°C, o dormitório 2 com 27,01°C e o dormitório 1 com 26,50°C. Dessa forma, o desconforto térmico na sala se destaca, enquanto os dormitórios apresentam temperaturas médias mais amenas.

Figura 77 - Temperatura operativa máxima - $T_{\text{O máx}}$ - caso 270° - Recife



Fonte: elaborado pela autora (2025).

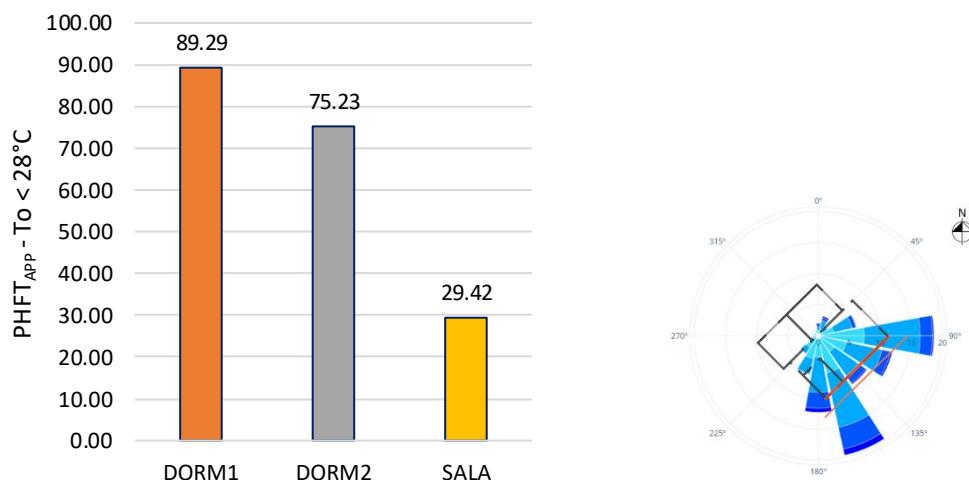
Figura 78 - Temperatura operativa média - T_{med} - caso 270° - Recife



Fonte: elaborado pela autora (2025).

O percentual de horas com temperaturas operativas abaixo de 28°C (PHFT_{APP}) é apresentado na Figura 79. O dormitório 1 apresentou o maior PHFT, 89,29%, seguido do dormitório 2 com 75,23%, e a sala com apenas 29,42%. Isso indica que a sala tem poucas horas dentro de uma faixa de temperatura mais agradável, enquanto os dormitórios apresentam um desempenho térmico significativamente melhor. O PHFT_{UH} para toda a residência é de 64,65%, sugerindo que, no geral, a residência atinge temperaturas abaixo de 28°C em aproximadamente dois terços do tempo, mas com grande variação entre os cômodos.

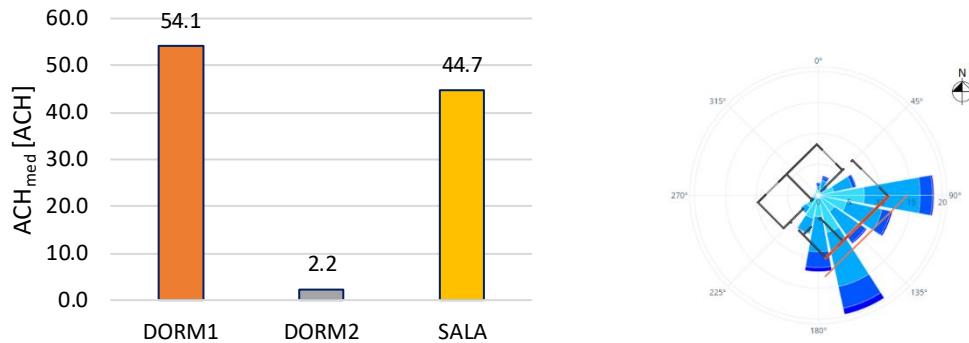
Figura 79 - Percentual de horas na faixa de temperatura - PHFT_{APP} - caso 270° - Recife



Fonte: elaborado pela autora (2025).

A ventilação natural, representada pelas trocas de ar por hora média (ACH_{med}) na Figura 80, revela que o dormitório 1 apresentou a maior taxa de renovação de ar, 54,1 ACH, enquanto o dormitório 2 registrou uma taxa média muito baixa de apenas 2,2 renovações de ar por hora, o que pode contribuir para um ambiente mais abafado e menos confortável. Já a sala obteve um valor mais elevado de 44,7 ACH, mas insuficiente para compensar os altos ganhos térmicos que resultam em temperaturas elevadas.

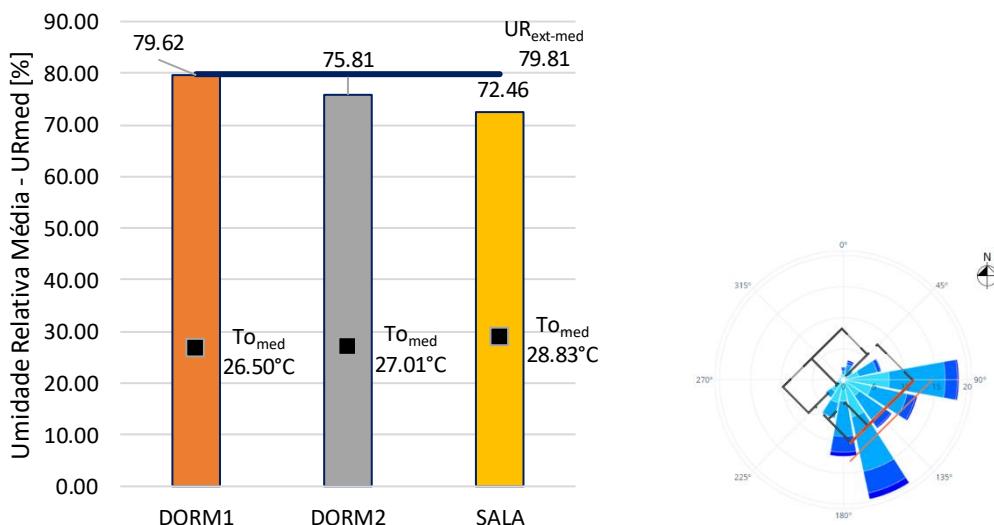
Figura 80 - Trocas de ar por hora média - ACH_{med} - caso 270° - Recife



Fonte: elaborado pela autora (2025).

Pela análise da Figura 81, a umidade relativa média (UR_{med}) nos ambientes foi de 79,62% para o dormitório 1 e 75,81% para o dormitório 2. Novamente, observa-se menor índice para a sala (72,46%), o que pode contribuir para compensar as temperaturas mais elevadas desse cômodo.

Figura 81 - Umidade relativa média - UR_{med} - caso 270° - Recife



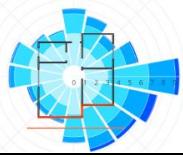
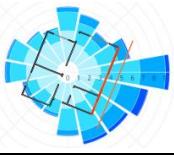
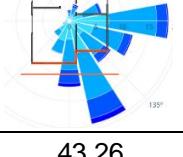
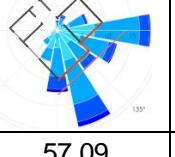
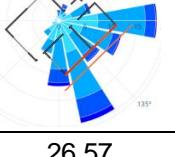
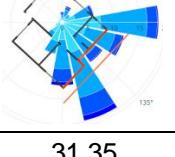
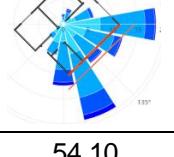
Fonte: elaborado pela autora (2025).

4.5.3 Análise comparativa dos casos

Em relação à taxa de trocas de ar por hora média de cada ambiente da HIS (Tabela 5), observou-se que para a cidade de Recife, a variação dos quatro casos de incidência de vento em relação ao caso base foi mais expressiva do que a observada em Joinville.

A exemplo, os casos 0° e 270° em Recife evidenciaram um aumento significativo para a ventilação no dormitório 1 (31,98% e 25,07%, respectivamente), enquanto o dormitório 2 obteve a ventilação reduzida em 46,96% para o caso 0° e 92,54% para o caso 270°. Para a sala, as maiores variações em relação ao caso base ocorreram nos casos 90° e 180°, com diminuição da taxa de trocas de ar por hora. Para essa cidade, o caso base ainda se mostrou mais eficiente em termos de renovações de ar, com valores mais equilibrados entre os ambientes.

Tabela 5 - Trocas de ar por hora média - ACH_{med}

	Caso base	0°	90°	180°	270°
Joinville					
Dormitório 1	14,25	14,41	14,28	12,84	14,62
Dormitório 2	8,34	8,90	8,75	9,57	8,31
Sala	21,82	25,12	20,85	21,71	25,19
ACH _{med-UH}	14,80	16,14	14,63	14,70	16,04
	Caso base	0°	90°	180°	270°
Recife					
Dormitório 1	43,26	57,09	26,57	31,35	54,10
Dormitório 2	30,03	15,93	45,33	22,93	2,24
Sala	44,24	43,46	35,25	37,24	44,72
ACH _{med-UH}	39,17	38,83	35,71	30,51	33,69

Fonte: elaborado pela autora (2025).

Em Joinville, as variações foram menores, com as diferenças mais significativas observadas para o ambiente da sala. Tanto o caso 0° quanto o caso 270° apresentaram aumentos na ordem de 15% em relação ao caso base. Ainda,

o caso 0° foi o único que apresentou aumento na taxa de renovações de ar por hora em todos os cômodos. Em contrapartida, o caso 180° apresentou diminuições tanto na sala quanto no dormitório 1.

Em relação à média dos três ambientes (ACH_{med-UH}), os cinco casos para Joinville apresentaram linearidade nos resultados, com aumento máximo em relação ao caso base de 9,07% para o caso 0°, seguido do caso 270° (8,38%). Os casos 90° e 180° apresentaram uma pequena diminuição, na ordem de 1%.

Recife, por sua vez, demonstrou maior oscilação em relação aos valores de ACH_{med-UH} . Ao contrário de Joinville, todos os casos apresentaram reduções nos valores globais para a HIS, sendo o caso 0° o mais próximo do caso base. O caso 180°, por sua vez, apresentou o pior desempenho, atingindo uma redução de 22% em relação ao caso base.

Essa oscilação refletiu o impacto da orientação em relação ao vento predominante, sugerindo que em Recife, a distribuição de aberturas não favoreceu de forma uniforme todos os cômodos nas diferentes orientações.

Em relação à temperatura, o Tabela 6 apresenta os valores de $T_{máx}$, $PHFT_{APP}$ e $PHFT_{UH}$. Para todos os casos, nas duas cidades, a temperatura máxima da residência foi observada no ambiente da sala. A variação para Joinville foi sutil, na ordem de 0,5%. Recife também apresentou pequenas variações, com o caso 270° alcançando 2,89% de diminuição da $T_{máx}$ em relação ao caso base. Isso indica a influência da orientação solar e da ventilação, visto que nesse caso, a sala apresentou melhora na taxa de renovação do ar.

O $PHFT_{APP}$ para os dormitórios em Joinville ficaram na faixa de 67,70% a 71,01, enquanto para Recife, os dormitórios apresentaram até 89,32% (dormitório 2 no caso base) das horas na faixa de temperatura de conforto ao longo do ano. De maneira geral, a sala foi o ambiente que apresentou piores índices, com Joinville variando entre 41,61% e 46,30% e Recife com valores ainda mais baixos, entre 21,68% e 29,42%. Esses resultados apontam para a influência do horário de ocupação do ambiente, tanto para $T_{máx}$ quanto para o $PHFT$. Isso se deve ao fato de que a sala é ocupada a partir das 14h até às 22h, enquanto os dormitórios são ocupados entre 22h até às 8h, ou seja, os quartos são ocupados durante as temperaturas mais baixas ao longo do dia.

Tabela 6 - Percentual de horas na faixa de temperatura - PHFT

	Caso base	0°	90°	180°	270°
Joinville					
T _{0máx}	36,97°C	37,04°C	37,06°C	37,00°C	36,74°C
PHFT _{APP} Dormitório 1	71,01%	70,66%	70,88%	69,01%	69,18%
PHFT _{APP} Dormitório 2	67,70%	67,51%	68,08%	68,93%	67,78%
PHFT _{APP} Sala	44,69%	46,30%	44,14%	41,61%	44,21%
PHFT _{UH}	61,13%	61,49%	61,03%	59,68%	60,39%
	Caso base	0°	90°	180°	270°
Recife					
T _{0máx}	34,07°C	33,52°C	34,15°C	33,57°C	33,09°C
PHFT _{APP} Dormitório 1	85,48%	88,52%	81,34%	76,74%	89,29%
PHFT _{APP} Dormitório 2	89,32%	82,58%	88,03%	75,51%	75,23%
PHFT _{APP} Sala	25,68%	26,99%	21,68%	22,64%	29,42%
PHFT _{UH}	66,83%	66,03%	63,68%	58,29%	64,65%

Fonte: elaborado pela autora (2025).

Para ambas as cidades, os melhores PHFT_{UH} foram para os casos base e 0°. No entanto, a variação do PHFT_{UH} entre os casos foi pequena, com destaque apenas para o caso 180° de Recife, que obteve uma redução do PHFT para a residência de 12,77%. Esse resultado reforçou a relação entre a redução nas taxas de ventilação e orientação solar da UH.

Relacionando os valores de PHFT_{UH} com as taxas de ventilação, observou-se que os índices mais elevados coincidiram com os casos que obtiveram as maiores trocas de ar por hora para toda a residência, para a cidade de Recife. Em Joinville, a maior taxa de ACH_{med} (caso 0°) teve PHFT muito próximo do caso base. Já em 270°, a alta do ACH_{med} não significou aumento do PHFT, indicando que o excesso de ventilação pode causar desconforto porque possibilita a entrada de ar quente.

Outra observação importante que pode ser feita, é a relação entre umidade, temperatura e ventilação. Para a sala, que foi o ambiente de todos os casos que obteve maiores temperaturas operativas, observou-se que esse cômodo apresentou os menores valores de umidade relativa (Tabela 7), ao mesmo tempo que as taxas de trocas de ar por hora foram sempre significativas, com valores mínimos de ACH_{med} acima de 20 ach (Joinville) e 30 ach (Recife).

Tabela 7 - Umidade relativa média - UR_{med}

	Caso base	0°	90°	180°	270°
Joinville					
Dormitório 1	76,17	75,77	76,23	75,32	75,33
Dormitório 2	73,80	73,96	73,96	74,32	74,00
Sala	69,44	69,66	69,25	68,90	69,39
UR_{med-UH}	73,13	73,13	73,15	72,84	72,91
	Caso base	0°	90°	180°	270°
Recife					
Dormitório 1	79,04	79,28	78,40	77,56	79,62
Dormitório 2	78,09	76,81	78,21	77,18	75,81
Sala	72,32	72,48	71,61	71,60	72,46
UR_{med-UH}	76,48	76,19	76,07	75,45	75,97

Fonte: elaborado pela autora (2025).

Analizando os valores globais para a residência em Joinville, os maiores valores de ACH_{med} (0° e 270°) contribuíram para redução da umidade interna, especialmente em comparação com o valor externo (86,09%). O caso 180° teve menor PHFT (59,85%), mas a melhor redução da UR_{med} , indicando que a umidade não foi o principal fator de desconforto térmico nesse contexto – o padrão de ventilação e sua distribuição nos cômodos pareceu mais determinante.

Em Recife, o caso base apresentou valor mais elevado de UR_{med} , apesar de ter alcançado o maior valor índice de ventilação para a UH. Os casos 0° e

90°, também com valores mais elevados para ACH_{med-UH} , tiveram ligeira redução na UR_{med} , indicando que a ventilação contribuiu para a renovação do ar úmido. No entanto, a diminuição da UR_{med} não garantiu melhora no PHFT, conforme observado no caso 180°. Isso reforça a ideia de que a ventilação auxiliou a remoção de umidade, mas não necessariamente promoveu conforto térmico.

5 CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho avaliou o desempenho da ventilação natural, em uma habitação de interesse social, como estratégia de resfriamento para climas tropicais e subtropicais. Para isso, foram realizadas simulações da área da dinâmica dos fluidos computacional (CFD), além de simulações termoenergéticas (BES), por meio da utilização dos programas *ANSYS Fluent* e *EnergyPlus*, considerando a escala real da edificação. As localidades selecionadas para esse estudo foram cidades representativas de regiões consideradas quentes e úmidas. As cidades selecionadas para o presente estudo foram Recife-PE, localizada no nordeste brasileiro e que apresenta clima tropical quente de monção (ZB 5A), e Joinville-SC, na região sul do país, com clima temperado com verão quente e sem estação seca (ZB 3A).

Após a delimitação da tipologia habitacional a ser estudada, foram definidas as variáveis para análise. Para compreender o comportamento da ventilação natural em habitações de interesse social (HIS), foram analisadas diferentes incidências do vento (0° , 90° , 180° e 270°) por meio das simulações CFD, mantendo-se constante a geometria da edificação e todas as aberturas internas e externas abertas. Também foi avaliada a interação entre ventilação natural e orientação solar, considerando-se, além dos quatro casos de vento, a orientação solar do caso base. A definição das orientações das fachadas baseou-se em dados climáticos locais, priorizando os ângulos de maior incidência de vento: 110° (Sudeste) para Joinville e 135° (Sudeste) para Recife.

Em seguida, foi realizada uma análise qualitativa das imagens geradas a partir das simulações CFD, que forneceu uma visão detalhada do comportamento e da distribuição do escoamento de vento no interior da edificação, representado por campos vetoriais sobrepostos aos mapas da magnitude da velocidade em planos de corte horizontais e verticais. Observou-se que a ventilação natural foi mais eficiente para os ângulos de incidência do vento de 0° e 90° , em razão da direção favorável do escoamento e da compatibilidade com o layout da residência. Por outro lado, para os ângulos de 180° e 270° , o desempenho da ventilação foi comprometido, principalmente devido à distribuição desfavorável das aberturas e ao percurso interno menos eficiente do ar. Dentre os ambientes analisados, a sala apresentou as melhores

distribuições de ventilação em todos os cenários, enquanto o quarto 2 e o banheiro foram os mais afetados negativamente, com ocorrência de vórtices e zonas de estagnação.

Logo após, o comportamento do escoamento externo à edificação foi analisado, revelando a formação do fenômeno aerodinâmico vórtice de ferradura, sendo um fator comum aos quatro casos de incidência de vento considerados. Nos casos de 0° e 180°, o vento atingiu a edificação, formando vórtices de ferradura e recirculações laterais. A principal diferença entre os dois foi na distribuição interna do escoamento: enquanto no caso 0° o ar se desviou mais para as laterais, no caso 180° houve maior penetração no interior da residência. Já nos casos de 90° e 270°, o comportamento do escoamento variou conforme a disposição dos ambientes, sendo o caso 270° mais favorável à ventilação cruzada. A visualização do comportamento do escoamento de ar externo à edificação se mostrou relevante, principalmente em contextos de adensamento habitacional, típicos de projetos de habitação social, em que a interação do vento com as edificações pode gerar zonas de aceleração ou áreas com ventilação insuficiente, afetando o conforto ambiental.

Na sequência, foram calculadas as taxas de ventilação adimensional (DFR) para cada caso de incidência de vento. Os resultados obtidos indicaram que as melhores taxas globais ocorreram para as direções de vento a 180° e 270°, atribuídos à orientação favorável das aberturas e à geometria interna da edificação. Já os casos de 0° e 90° apresentaram valores globais de DFR abaixo de 1, sugerindo menor eficiência na ventilação natural, possivelmente devido à configuração interna e à localização das aberturas de saída. Apesar disso, o caso 0° apresentou uma taxa próxima de 1,0 nas principais janelas que contribuíram para a entrada de ar na edificação, sendo o caso com maior número de aberturas a barlavento em diferentes cômodos. A partir desses resultados, observou-se a limitação da análise da ventilação natural apenas pela perspectiva desse indicador adimensional, quando aplicado a geometrias com maior número de compartimentações internas.

Então, foi determinada a abrangência do escoamento interno, com base na escala de cinco níveis proposta por Toledo (2006), que classifica a ventilação conforme a porcentagem da área de piso atingida pelo escoamento do ar. A interpretação da magnitude das velocidades utilizou a escala cromática de

Morais e Labaki (2017), considerando a faixa entre 0,4 m/s e 0,8 m/s, correspondente a velocidades adequadas para ventilação natural eficiente. A partir disso, concluiu-se que o caso 0° foi a direção de vento que proporcionou melhor distribuição do escoamento interno. Contrariamente, o caso 180° apresentou a pior abrangência total para a residência, com ventilação praticamente inexistente no dormitório 1. A avaliação da ventilação natural com base na abrangência do escoamento, proposta nesse trabalho, mostrou-se uma ferramenta eficaz, ao permitir a identificação dos ambientes com boa distribuição do escoamento de ar e daqueles com velocidades de vento insuficientes, considerando diferentes ângulos e alturas.

As análises quantitativas de temperatura e umidade, baseadas nas simulações termoenergéticas (BES), permitiram avaliar o desempenho térmico da edificação em condição naturalmente ventilada, considerando os critérios da NBR 15.575 (ABNT, 2021). A partir disso, foram determinadas as temperaturas operativas máxima ($T_{o\max}$) e média ($T_{o\text{med}}$) para a residência e calculado o percentual de horas dentro da faixa de conforto térmico (PHFT_{APP}) para cada ambiente de permanência prolongada. Complementarmente aos critérios normativos, foi avaliada a ventilação natural, com base no índice de trocas de ar por hora média (ACH_{med}), além da umidade relativa interna (UR_{med}). Essa abordagem ampliou a análise do conforto térmico, especialmente relevante para o contexto de ventilação natural em climas quentes e úmidos.

De modo geral, a análise dos indicadores médios de ventilação ($\text{ACH}_{\text{med-UH}}$), conforto térmico ($\text{PHFT}_{\text{med-UH}}$) e umidade relativa ($\text{UR}_{\text{med-UH}}$) evidenciou diferenças relevantes entre os comportamentos observados nas cidades de Joinville e Recife, em função da orientação da edificação frente à direção do vento predominante.

Em Recife, a taxa de ventilação apresentou variações mais expressivas entre os casos simulados. Os casos 0° e 270° aumentaram significativamente a ventilação no dormitório 1, mas reduziram drasticamente no dormitório 2, evidenciando uma distribuição desigual dos fluxos de ar. A média da residência ($\text{ACH}_{\text{med-UH}}$) foi inferior ao caso base em todos os cenários, com destaque negativo para o caso 180°, que obteve redução de 22%. Já em Joinville, os resultados foram mais lineares, com variações menores entre os ambientes e incremento global da ventilação nos casos 0° e 270°.

Quanto à temperatura operativa (T_o) e ao percentual de horas na faixa de conforto ($PHFT_{med-UH}$), os casos base e 0° foram os mais favoráveis em ambas as cidades. No entanto, Recife apresentou o pior desempenho térmico no caso 180° , com redução de 12,77% no $PHFT_{med-UH}$. A sala foi o ambiente mais crítico, concentrando as maiores temperaturas e os menores índices de conforto térmico, o que se associou ao seu horário de uso e à incidência solar vespertina.

A análise da umidade relativa indicou que os maiores valores de ACH_{med-UH} contribuíram para a redução da UR_{med} , especialmente em Recife. Ainda assim, essa redução não foi suficiente para garantir conforto térmico – como evidenciado no caso 180° , que obteve a menor UR_{med} , mas também o menor $PHFT_{med-UH}$. Tal observação reforça que a eficiência da ventilação não está relacionada apenas à sua intensidade, mas também à distribuição espacial do escoamento e à interação com a orientação solar da edificação.

É válido ressaltar que valores altos de umidade relativa podem impactar negativamente o conforto térmico e favorecer condições para desenvolvimento de mofos e bolor, especialmente em áreas internas com má circulação de ar.

Assim, ao avaliar o desempenho da ventilação natural, em uma habitação de interesse social, como estratégia de resfriamento para climas tropicais e subtropicais, esta pesquisa contribui para os estudos da área de conforto térmico e eficiência energética de edificações.

Diante dos resultados obtidos, conclui-se que a ventilação natural se mostra uma estratégia viável e eficaz de resfriamento passivo para habitações de interesse social em climas quentes e úmidos, desde que incorporada desde as fases iniciais de projeto. A eficiência dessa estratégia está diretamente relacionada à interação entre a direção predominante do vento, a geometria interna da edificação e a disposição das aberturas, elementos que influenciam significativamente na distribuição do escoamento de ar e, consequentemente, no desempenho térmico.

A análise integrada de indicadores como a taxa de renovação de ar (ACH_{med}), temperatura operativa (T_o) e umidade relativa (UR) reforça a importância de considerar não apenas a intensidade da ventilação, mas também sua qualidade e abrangência espacial.

Além de promover conforto térmico e eficiência energética, a ventilação natural contribui para a salubridade dos ambientes internos, sendo

especialmente relevante em contextos de adensamento urbano. Portanto, sua adequada consideração pode representar uma solução de baixo custo e alto impacto para a melhoria das condições ambientais em projetos habitacionais de interesse social.

5.1 LIMITAÇÕES DO TRABALHO

Algumas limitações foram encontradas ao longo do desenvolvimento dessa pesquisa, sendo elas:

- Consideração de um único modelo representativo de habitação e de apenas dois tipos de clima;
- Consideração da habitação como uma edificação isolada no terreno, sem considerar o efeito de sombreamento e desvios ou canalizações do vento, relacionados a elementos do entorno urbano;
- Utilização de arquivos climáticos com dados meteorológicos de anos anteriores;
- Consideração do padrão de uso e ocupação da residência limitado à norma, o que pode não refletir a realidade de ocupação;
- Utilização de parâmetros termofísicos dos materiais da envoltória conforme normativas e softwares, sem dados experimentais.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para o desenvolvimento de trabalhos futuros, sugere-se:

- Considerar outras tipologias habitacionais;
- Estudar o comportamento da ventilação natural no contexto de conjuntos habitacionais, a fim de analisar estratégias que favoreçam tanto a dissipação das zonas de aceleração quanto a redistribuição do escoamento de ar entre as construções;
- Replicar a metodologia para outras localidades, considerando diferentes climas;

- Utilizar ou criar arquivos climáticos com dados mais atualizados e projeções futuras;
- Associar a ventilação natural com outras estratégias passivas de resfriamento;
- Considerar outros padrões de uso e ocupação, a depender do contexto estudado;
- Realizar testes e experimentos em laboratório para obtenção de parâmetros termofísicos dos materiais a serem considerados na envoltória;
- Expandir o estudo em relação à umidade, considerando outros indicadores que se relacionam diretamente com temperatura e velocidade do ar para a avaliação do conforto térmico.

REFERÊNCIAS

ABNT. ABNT NBR 15220: Desempenho térmico de edificações - Parte 3: Zoneamento bioclimático por desempenho. Rio de Janeiro, Brasil: ABNT, 3 dez. 2024a.

ABNT. ABNT NBR 15575: Edificações habitacionais - desempenho. Rio de Janeiro, Brasil: ABNT, 2024b.

ALFRAIDI, Yahya; BOUSSABAINE, Abdel Halim. Design resilient building strategies in face of climate change. **International Journal of Architectural and Environmental Engineering**, vol. 9, nº 1, 2015.

ALVARES, Clayton Alcarde; STAPE, José Luiz; SENTELHAS, Paulo Cesar; DE MORAES GONÇALVES, José Leonardo; SPAROVEK, Gerd. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, vol. 22, nº 6, p. 711–728, 2013. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>.

APOLÔNIO, Raquel Moussalem; CALLEJAS, Ivan Julio Apolonio; ROSETA, Filipa. Aplicação de índices para avaliação da resiliência térmica de edificação em condição de sobreaquecimento. Em: Encontro Nacional De Conforto No Ambiente Construído, 17. 2023. **Anais** [...]. 2023. p. 1–10. <https://doi.org/10.46421/encac.v17i1.4121>.

ARAÚJO, Mariana Tonini de; SOUZA, Henor Artur de; GOMES, Adriano Pinto. Computer simulation of moisture transfer in walls: impacts on the thermal performance of buildings. **Architectural Engineering and Design Management**, vol. 18, nº 4, p. 453–472, 2022. <https://doi.org/10.1080/17452007.2021.1916426>.

ASHRAE - AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING ENGINEERS. ANSI/ASHRAE 55/2013: Thermal environmental conditions for human occupancy. Atlanta, 2013.

AUDILLA, K.; WIZAKA, W.; PRAWATA, A. G. Study of natural ventilation on communal space in co-living at Setiabudi. 794., 2 ago. 2021. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science** [...]. IOP Publishing Ltd, 2 ago. 2021. vol. 794, p. 012228. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/794/1/012228>.

BANIASSADI, Amir; SAILOR, David J. Synergies and trade-offs between energy efficiency and resiliency to extreme heat – a case study. **Building and Environment**, vol. 132, p. 263–272, 15 mar. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.01.037>.

BARDHAN, Ronita; DEBNATH, Ramit; MALIK, Jeetika; SARKAR, Ahana. Low-income housing layouts under socio-architectural complexities: A parametric study for sustainable slum rehabilitation. **Sustainable Cities and Society**, vol. 41, p. 126–138, 1 ago. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.04.038>.

BAVARESCO, Mateus V; CUCHIVAGUE, Hamilton Yair Ortiz; SCHINAZI, Alexandre; GHISI, Enedir. Aspectos impactantes no desempenho energético de habitações de interesse social brasileiras: revisão de literatura. **Ambiente Construído**, vol. 21, nº 1, p. 263–292, jan. 2021. DOI 10.1590/s1678-86212021000100505. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ac/a/MCZzz7WysfwRdfyN6YzjmLJ/?lang=pt>. Acessado em: 5 jun. 2023.

BELLERI, Annamaria; LOLINI, Roberto; DUTTON, Spencer M. Natural ventilation design: an analysis of predicted and measured performance. **Building and Environment**, vol. 81, p. 123–138, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.06.009>.

BERGER, Christiane; MAHDAVI, Ardeshir; AMPATZI, Eleni; CROSBY, Sarah; HELLWIG, Runa T.; KHOVALYG, Dolaana; PISELLO, Anna Laura; ROETZEL, Astrid; RYSANEK, Adam; VELLEI, Marika. Thermal Conditions in Indoor Environments: Exploring the Reasoning behind Standard-Based Recommendations. **Energies**, vol. 16, nº 4, 1 fev. 2023. <https://doi.org/10.3390/en16041587>.

BETTI, Giovanni; TARTARINI, Federico; NGUYEN, Christine; SCHIAVON, Stefano. CBE Clima Tool: A free and open-source web application for climate analysis tailored to sustainable building design. **Building Simulation**, vol. 17, nº 3, p. 493–508, 4 dez. 2023. <https://doi.org/10.1007/s12273-023-1090-5>.

BITTAR, Mariana; ARAUJO, André; ALMEIDA, Odenir; MARTINS, Themis; SOUSA, Maurício. Inferências para a ventilação cruzada em ambientes internos a partir da simulação aerodinâmica. Em: XVII Encontro nacional de conforto no ambiente construído. 30 out. 2023. **Anais** [...]. São Paulo: 30 out. 2023. p. 1–10.

BLOCKEN, Bert. LES over RANS in building simulation for outdoor and indoor applications: A foregone conclusion? **Building Simulation**, vol. 11, nº 5, p. 821–870, 1 out. 2018. <https://doi.org/10.1007/s12273-018-0459-3>.

BRASIL, Ministério das Cidades. **Portaria MCID nº 725, de 15 de junho de 2023**. Brasil: MCID, 16 jun. 2023.

BRASIL, Ministério de Minas e Energia. **Plano Nacional de Eficiência Energética**. MME: 2019.

BRASIL, Ministério do Trabalho. **Portaria nº 423, 07 de outubro de 2021. Aprova a NR 17 (Ergonomia)**. Brasil: MTE, 7 out. 2021.

CÂNDIDO, C.; DE DEAR, R. J.; LAMBERTS, R.; BITTENCOURT, L. Air movement acceptability limits and thermal comfort in Brazil's hot humid climate zone. **Building and Environment**, vol. 45, nº 1, p. 222–229, jan. 2010. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.06.005>.

CARRETO-HERNANDEZ, L. G.; MOYA, S. L.; VARELA-BOYDO, C. A.; FRANCISCO-HERNANDEZ, A. Studies of ventilation and thermal comfort in

different wind tower-room configurations considering humidification for a warm climate of Mexico. **Journal of Building Engineering**, vol. 46, 1 abr. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103675>.

CHEW, Lup Wai; CHEN, Chen; GORLÉ, Catherine. CFD-Based Analysis of the Discharge Coefficient for Buoyancy-Driven Ventilation in a Full-Scale Operational Building. 2022. **Building Simulation Conference Proceedings** [...]. International Building Performance Simulation Association, 2022. p. 3096–3102. <https://doi.org/10.26868/25222708.2021.30482>.

COSTA, Ennio Cruz da. **Ventilação**. 1º ed. São Paulo: Editora Edgar Blücher, 2005.

COSTA, Isabela Penina Cavalcanti da; LABAKI, Lucila Chebel; LAGES, Athos. Efeitos da incorporação de muros no comportamento da ventilação natural em habitações populares térreas. **Ambiente Construído**, vol. 23, nº 3, p. 39–62, jul. 2023. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212023000300675>.

CRAWLEY, Drury; LAWRIE, Linda. Repository of free climate data for building performance simulation: Brazil, Region 3 - South America. 2021. Disponível em: https://climate.onebuilding.org/WMO_Region_3_South_America/BRA_Brazil/index.html. Acessado em: 23 ago. 2024.

CUCE, Erdem; SHER, Farooq; SADIQ, Hamad; CUCE, Pinar Mert; GUCLU, Tamer; BESIR, Ahmet B. Sustainable ventilation strategies in buildings: CFD research. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, vol. 36, 1 dez. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2019.100540>.

DE DEAR, R.; BRAGER, G. S. The adaptive model of thermal comfort and energy conservation in the built environment. **International Journal of Biometeorology**, vol. 45, nº 2, p. 100–108, 2001. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/S004840100093>.

DE VECCHI, Renata. **Avaliação de conforto térmico em edificações comerciais que operam sob sistemas mistos de condicionamento ambiental em clima temperado e úmido**. 2015. 237 f. Tese de Doutorado – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2015.

DE VECCHI, Renata. **Condições de conforto térmico e aceitabilidade da velocidade do ar em salas de aula com ventiladores de teto para o clima de Florianópolis/SC**. 2011. 142 f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2011.

DERAKHSHAN, Shahram; SHAKER, Ahmad. Numerical study of the cross-ventilation of an isolated building with different opening aspect ratios and locations for various wind directions. **International Journal of Ventilation**, vol. 16, nº 1, p. 42–60, 2 jan. 2017. <https://doi.org/10.1080/14733315.2016.1252146>.

DEUBLE, Max Paul; DE DEAR, Richard John. Mixed-mode buildings: a double standard in occupant's comfort expectations. **Building and Environment**, vol. 54, p. 53–60, ago. 2012. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.01.021>.

DOE - U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. EnergyPlus Version 23.1.0 Documentation: Engineering Reference. 2023.

ELI, L. G.; KRELLING, A. F.; OLINGER, M. S.; MELO, A. P.; LAMBERTS, R. Thermal performance of residential building with mixed-mode and passive cooling strategies: The Brazilian context. **Energy and Buildings**, vol. 244, 1 ago. 2021. DOI 10.1016/j.enbuild.2021.111047. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778821003315?via%3Dihub>. Acessado em: 5 jun. 2023.

ELNAKLAH, Rana; ALNUAIMI, Abdulla; ALOTAIBI, Badr S.; TOPRISKA, Evangelia; WALKER, Ian; NATARAJAN, Sukumar. Thermal comfort standards in the Middle East: Current and future challenges. **Building and Environment**, vol. 200, 1 ago. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107899>.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA BRASILEIRA. **Balanço Energético Nacional 2023: Ano Base 2022**. Rio de Janeiro: 2023.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA BRASILEIRA. **Uso de ar condicionado no setor residencial brasileiro: perspectivas e contribuições para o avanço em eficiência energética**. Rio de Janeiro: 2018.

FARIAS, Mariana Moccellin de; DISCONZI, Fernanda Perazzolo; BORGHI, Fabrício Torres. Influência da umidade em modelos numéricos de transferência de calor para edificações: um estudo de caso. Em: XX Encontro nacional de tecnologia do ambiente construído. 2024. **Anais** [...]. Maceió, AL: 2024. p. 1–12. <https://doi.org/https://doi.org/10.46421/entac.v20i1.6201>.

FEREIDANI, Nazanin Azimi; RODRIGUES, Eugénio; GASPAR, Adélio Rodrigues. A review of the energy implications of passive building design and active measures under climate change in the Middle East. **Journal of Cleaner Production**, vol. 305, 10 jul. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127152>.

FERREIRA, Camila Carvalho; SOUZA, Henor Artur de; CARLO, Joyce Correna. Variables of influence on thermal performance of buildings under transient conditions. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, vol. 12, p. 1–25, 28 ago. 2021. <https://doi.org/10.20396/parc.v12i00.8661655>.

FIELD, Christopher B.; BARROS, Vicente; STOCKER, Thomas F.; DOKKEN, David Jon; EBI, Kristie L.; MASTRANDREA, Michael D.; MACH, Katharine J.; PLATTNER, Gian-Kasper; ALLEN, Simon K.; TIGNOR, Melinda; MIDGLEY, Pauline M. **Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA: 2012.

FJP - FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO. **Déficit habitacional no Brasil 2022**. Belo Horizonte: 2023.

FU, Xiaohui; TAI, Vin Cent; MOEY, Lip Kean; ABD RAHMAN, Nor Faiza; AHMAD, Kamarul Arifin; BAGLEE, David. Opening configurations and natural cross ventilation performance in a double-loaded multi-level apartment building: a CFD analysis. **Building and Environment**, vol. 254, 15 abr. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111404>.

GAMERO-SALINAS, Juan; MONGE-BARRIO, Aurora; KISHNANI, Nirmal; LÓPEZ-FIDALGO, Jesús; SÁNCHEZ-OSTIZ, Ana. Passive cooling design strategies as adaptation measures for lowering the indoor overheating risk in tropical climates. **Energy and Buildings**, vol. 252, 1 dez. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111417>.

GAO, Jie; WANG, Yi; WARGOCKI, Pawel. Comparative analysis of modified PMV models and SET models to predict human thermal sensation in naturally ventilated buildings. **Building and Environment**, vol. 92, p. 200–208, 1 out. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.04.030>.

GONCALVES, V.; RAKHA, T. The role of complex airflow simulation tools for overheating assessment of passive houses. 2069., 2 dez. 2021. **Journal of Physics: Conference Series** [...]. Institute of Physics, 2 dez. 2021. vol. 2069. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2069/1/012170>.

GONCALVES, Vitor Leite; COSTANZO, Vincenzo; FABBRI, Kristian; RAKHA, Tarek. Overheating assessment in Passivhaus dwellings: the influence of prediction tools. **Buildings and Cities**, vol. 3, nº 1, p. 153–167, 2022. <https://doi.org/10.5334/bc.151>.

GUTIERREZ, Grace Cristina Roel. **Avaliação do desempenho térmico de três tipologias de brise-soleil fixo**. 2004. 203 f. Dissertação de Mestrado – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2004.

HE, Yi; CHU, Yingnan; ZANG, Haiyan; ZHAO, Jinyan; SONG, Yehao. Experimental and CFD study of ventilation performance enhanced by roof window and mechanical ventilation system with different design strategies. **Building and Environment**, vol. 224, 1 out. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109566>.

HEISELBERG, Per. Natural Ventilation Design. **International Journal of Ventilation**, vol. 2, nº 4, p. 295–312, abr. 2004. <https://doi.org/10.1080/14733315.2004.11683674>.

HERNÁNDEZ, Gabriel; CETINA-QUIÑONES, A. J.; BASSAM, A.; CARRILLO, J. G. Passive strategies towards energy efficient social housing: A parametric case study and decision-making framework in the Mexican tropical climate. **Journal of Building Engineering**, vol. 82, 1 abr. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.108282>.

HOLANDA FERREIRA, Aurélio Buarque. **Novo Aurélio do século XXI: dicionário da língua portuguesa**. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1999.

ISKANDAR, Layla; BAY-SAHIN, Ezgi; MARTINEZ-MOLINA, Antonio; TOKER BEESON, Saadet. Evaluation of passive cooling through natural ventilation strategies in historic residential buildings using CFD simulations. **Energy and Buildings**, vol. 308, 1 abr. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114005>.

JI, Liang; TAN, Hongwei; KATO, Shinsuke; BU, Zhen; TAKAHASHI, Takeo. Wind tunnel investigation on influence of fluctuating wind direction on cross natural ventilation. **Building and Environment**, vol. 46, nº 12, p. 2490–2499, dez. 2011. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.06.006>.

KARAVA, P.; STATHOPOULOS, T.; ATHIENITIS, A. K. Airflow assessment in cross-ventilated buildings with operable façade elements. **Building and Environment**, vol. 46, nº 1, p. 266–279, jan. 2011. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.07.022>.

KHOVALYG, Dolaana; KAZANCI, Ongun B.; HALVORSEN, Hanne; GUNDLACH, Ida; BAHNFLETH, William P.; TOFTUM, Jørn; OLESEN, Bjarne W. Critical review of standards for indoor thermal environment and air quality. **Energy and Buildings**, vol. 213, 15 abr. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109819>.

KOSUTOVA, Katarina; VAN HOOFF, Twan; VANDERWEL, Christina; BLOCKEN, Bert; HENSEN, Jan. Cross-ventilation in a generic isolated building equipped with louvers: Wind-tunnel experiments and CFD simulations. **Building and Environment**, vol. 154, p. 263–280, 1 maio 2019. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.03.019>.

KUMAR, Nikhil; KUBOTA, Tetsu; TOMINAGA, Yoshihide; SHIRZADI, Mohammadreza; BARDHAN, Ronita. CFD simulations of wind-induced ventilation in apartment buildings with vertical voids: Effects of pilotis and wind fin on ventilation performance. **Building and Environment**, vol. 194, p. 107666, 1 maio 2021. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107666>.

KURABUCHI, T.; OHBA, M.; NONAKA, T. Domain Decomposition Technique Applied to Evaluation of Cross-Ventilation Performance of Opening Positions of a Building. Em: Third International Workshop on Natural Ventilations. 16 mar. 2009. **Anais** [...]. Tokyo, Japan: 16 mar. 2009. p. 1–10.

LAMBERTS, Roberto; CANDIDO, Christhina; DE DEAR, Richard; DE VECCHI, Renata. **Towards a brazilian standard on thermal comfort research report**. 2013.

LAMBERTS, Roberto; DUTRA, Luciano; PEREIRA, Fernando O. R. **Eficiência energética na arquitetura**. 3^a ed., 2014.

LAMSAL, Prativa; BAJRACHARYA, Sushil Bahadur; RIJAL, Hom Bahadur. A review on adaptive thermal comfort of office building for energy-saving building design. **Energies**, vol. 16, nº 3, 1 fev. 2023. <https://doi.org/10.3390/en16031524>.

LI, Peixian; PARKINSON, Thomas; SCHIAVON, Stefano; FROESE, Thomas M.; DE DEAR, Richard; RYSANEK, Adam; STAUB-FRENCH, Sheryl. Improved long-term thermal comfort indices for continuous monitoring. **Energy and Buildings**, vol. 224, 1 out. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110270>.

LIU, Zhaojun; PAN, Xi; HE, Wenshan; LI, Yilin. Simulation Study on Natural Ventilation Performance in a Low-Carbon Large-Space Public Building in Hot-Summer and Cold-Winter Region of China. **Buildings**, vol. 13, nº 9, 1 set. 2023. <https://doi.org/10.3390/buildings13092263>.

LOCHE, Iris; BRE, Facundo; GIMENEZ, Juan Marcelo; LOONEN, Roel; NEVES, Letícia Oliveira. Balcony design to improve natural ventilation and energy performance in high-rise mixed-mode office buildings. **Building and Environment**, vol. 258, p. 11636, 15 jun. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111636>.

MATOS, Ana Mafalda; DELGADO, João M.P.Q.; GUIMARÃES, Ana Sofia. Energy-efficiency passive strategies for mediterranean climate: an overview. **Energies**, vol. 15, nº 7, 1 abr. 2022. <https://doi.org/10.3390/en15072572>.

MAVROGIANNI, Anna; WILKINSON, Paul; DAVIES, Michael; BIDDULPH, Phillip; OIKONOMOU, Eleni. Building characteristics as determinants of propensity to high indoor summer temperatures in London dwellings. **Building and Environment**, vol. 55, p. 117–130, set. 2012.

MEDEIROS, Ioni Donini. **O brise-soleil na zona bioclimática 3 sob avaliação dos requisitos da qualidade para o nível de eficiência energética de edifícios comerciais, de serviços e públicos (RQT-C)**. 2012. 1–121 f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, RS, 2012. Disponível em: <http://guaiaca.ufpel.edu.br:8080/handle/prefix/5165>. Acessado em: 11 mar. 2019.

MERONEY, Robert N. CFD prediction of airflow in buildings for natural ventilation. In: 11th Americas Conference on Wind Engineering. jun. 2009. **Anais** [...]. San Juan, Puerto Rico: jun. 2009. p. 1–10.

MORAIS, Juliana Magna da Silva Costa; LABAKI, Lucila Chebel. 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**, vol. 17, nº 1, p. 223–244, mar. 2017. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212017000100133>.

NASCIMENTO, Melyna De Almeida Lamenha. **A influência de diferentes configurações do peitoril ventilado na ventilação natural de habitação de**

interesse social. 2021. 322 f. Tese de Doutorado – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, AL, 2021.

NICOL, J F; HUMPHREYS, M A. Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings. **Energy and Buildings**, vol. 34, p. 563–572, 2002.

O' DONOVAN, Adam; MURPHY, Michael D.; O'SULLIVAN, Paul D. Passive control strategies for cooling a non-residential nearly zero energy office: Simulated comfort resilience now and in the future. **Energy and Buildings**, vol. 231, 15 jan. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110607>.

PERÉN, J. I.; VAN HOOFF, T.; LEITE, B. C.C.; BLOCKEN, B. Impact of eaves on cross-ventilation of a generic isolated leeward sawtooth roof building: Windward eaves, leeward eaves and eaves inclination. **Building and Environment**, vol. 92, p. 578–590, 1 out. 2015.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.05.011>.

PORTUGAL, Ministério das Obras Públicas, Transportes e Comunicações. **Decreto-Lei nº 80/2006, 04 de abril de 2006. Aprova o Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE)**. Portugal: Diário da República n.º 67/2006, Série I-A de 2006-04-04, 4 abr. 2006.

RAMPONI, Rubina; ANGELOTTI, Adriana; BLOCKEN, Bert. Energy saving potential of night ventilation: sensitivity to pressure coefficients for different european climates. **Applied Energy**, vol. 123, p. 185–195, 15 jun. 2014.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.02.041>.

RAMPONI, Rubina; BLOCKEN, Bert. CFD simulation of cross-ventilation for a generic isolated building: impact of computational parameters. **Building and Environment**, vol. 53, p. 34–48, jul. 2012.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.01.004>.

REARDON, Chris. Your home: Australia's guide to environmentally sustainable homes. 2020. **Department of Climate Change, Energy, the Environment and Water**. Disponível em:
<https://www.yourhome.gov.au/>. Acessado em: 7 maio 2025.

REMION, Gabriel; MOUJALLED, Bassam; EL MANKIBI, Mohamed. Review of tracer gas-based methods for the characterization of natural ventilation performance: Comparative analysis of their accuracy. **Building and Environment**, vol. 160, p. 106180, 1 ago. 2019.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106180>.

ROCHA, Lívia A.; GOMEZ, Ricardo S.; DELGADO, João M.P.Q.; VIEIRA, Antônio N.O.; SANTOS, Ivonete B.; LUIZ, Márcia R.; OLIVEIRA, Vital A.B.; OLIVEIRA NETO, Guilherme L.; VASCONCELOS, Danielle B.T.; SILVA, Márcio J.V.; CABRAL, Adriano S.; LIMA, Antonio G.B. Natural ventilation in low-cost housing: an evaluation by CFD. **Buildings**, vol. 13, nº 6, 1 jun. 2023.
<https://doi.org/10.3390/buildings13061408>.

RODRIGUES, Marcus Vinicius de Paiva. **Avaliação da eficiência energética de edificações residenciais em fase de projeto: análise de desempenho térmico pelo método prescritivo e por simulação computacional aplicados a estudo de caso de projeto-tipo do Exército Brasileiro.** 2015. 1–132 f. Dissertação de mestrado – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2015.

SATTAR, Ahmed M.A.; ELHAKEEM, Mohamed; GERGES, Bishoy N.; GHARABAGHI, Bahram; GULTEPE, Ismail. Wind-induced air-flow patterns in an urban setting: observations and numerical modeling. **Pure and Applied Geophysics**, vol. 175, nº 8, p. 3051–3068, 1 ago. 2018. <https://doi.org/10.1007/s00024-018-1846-5>.

SENGUPTA, Abantika; AL ASSAAD, Douaa; STEEMAN, Marijke; BREESCH, Hilde. Thermal resilience to overheating assessment in a Belgian educational building with passive cooling strategies during heatwaves and power outages. Em: The 11th International Conference on Indoor Air Quality, Ventilation & Energy Conservation in Buildings (IAQVEC2023). 396., 16 jun. 2023. **Anais** [...]. EDP Sciences, 16 jun. 2023. vol. 396, p. 1–8. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202339601018>.

SILVEIRA, Vinicius De Castro; PINTO, Mônica Martins; WESTPHAL, Fernando Simon. Influence of environmental factors favorable to the development and proliferation of mold in residential buildings in tropical climates. **Building and Environment**, vol. 166, 1 dez. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106421>.

SORGATO, M. J.; MELO, A. P.; LAMBERTS, R. The effect of window opening ventilation control on residential building energy consumption. **Energy and Buildings**, vol. 133, p. 1–13, 1 dez. 2016. DOI 10.1016/j.enbuild.2016.09.059. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778816309574?via%3Dhub>. Acessado em: 5 jun. 2023.

SOUSA, Luana Resende de. **Análise do desempenho térmico de habitações multifamiliares de interesse social com paredes verdes.** 2020. 164 f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 2020.

SUDIRMAN, Mutmainnah; GILLMEIER, Stefanie; VAN HOOFF, Twan; BLOCKEN, Bert. Wind tunnel measurements of cross-ventilation flow in a realistic building geometry: Influence of building partitions and wind direction. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, vol. 254, p. 105907, nov. 2024. DOI 10.1016/j.jweia.2024.105907. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167610524002708>.

TAI, Vin Cent; KAI-SEUN, Joseph Wu; MATHEW, Prasath Reuben; MOEY, Lip Kean; CHENG, Xinwei; BAGLEE, David. Investigation of varying louver angles and positions on cross ventilation in a generic isolated building using CFD

simulation. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, vol. 229, p. 1–20, 1 out. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2022.105172>.

TIBÚRCIO, Isabela Cristina da Silva Passos. **Ventilação natural em edificações residenciais: parâmetros normativos para configuração das aberturas**. 2017. 207 f. Tese de Doutorado – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, AL, 2017.

TOLEDO, Alexandre Márcio. **Avaliação do desempenho da ventilação natural pela ação do vento em apartamentos: uma aplicação em Maceió/AL**. 2006. 335 f. Tese de Doutorado – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

TRIANA, Maria Andrea; LAMBERTS, Roberto; SASSI, Paola. Characterization of representative building typologies for social housing projects in Brazil and its energy performance. **Energy Policy**, vol. 87, p. 524–541, 1 dez. 2015. DOI 10.1016/j.enpol.2015.08.041. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421515300859?via%3Dhub>. Acessado em: 5 jun. 2023.

VAN HOOFF, T.; BLOCKEN, B. Coupled urban wind flow and indoor natural ventilation modelling on a high-resolution grid: a case study for the Amsterdam ArenA stadium. **Environmental Modelling and Software**, vol. 25, nº 1, p. 51–65, jan. 2010. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2009.07.008>.

VAN HOOFF, T.; BLOCKEN, B.; TOMINAGA, Y. On the accuracy of CFD simulations of cross-ventilation flows for a generic isolated building: Comparison of RANS, LES and experiments. **Building and Environment**, vol. 114, p. 148–165, 1 mar. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.12.019>.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An introduction to computational fluid dynamics**. New York, USA: Longman Scientific & Technical, 1995.

WANG, Jihong; WANG, Shugang; ZHANG, Tengfei; BATTAGLIA, Francine. Assessment of single-sided natural ventilation driven by buoyancy forces through variable window configurations. **Energy and Buildings**, vol. 139, p. 762–779, 15 mar. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.01.070>.

WEERASURIYA, A. U.; ZHANG, Xuelin; GAN, Vincent J.L.; TAN, Yi. A holistic framework to utilize natural ventilation to optimize energy performance of residential high-rise buildings. **Building and Environment**, vol. 153, p. 218–232, 15 abr. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.02.027>.

WIDIASTUTI, R.; HASAN, M. I.; BRAMIANA, C. N.; PRAMEsti, P. U. CFD Simulation on the natural ventilation and building thermal performance. 448., 3 abr. 2020. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science** [...]. Institute of Physics Publishing, 3 abr. 2020. vol. 448. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/448/1/012004>.

XAVIER, Ana Clara de Almeida; LUKIANTCHUKI, Marieli Azoia. Análise da ventilação natural em uma habitação de interesse social, com diferentes configurações de muro, através de simulações CFD. **Revista de pesquisa em arquitetura e urbanismo IAU-USP**, vol. 19, p. 1–19, 2021.

XIE, Xiaoxiong; LUO, Zhiwen; GRIMMOND, Sue; BLUNN, Lewis. Use of wind pressure coefficients to simulate natural ventilation and building energy for isolated and surrounded buildings. **Building and Environment**, vol. 230, 15 fev. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109951>.

YANG, Jun; FU, Hao; QIN, Menghao. Evaluation of different thermal models in EnergyPlus for calculating moisture effects on building energy consumption in different climate conditions. Em: 9th International Symposium on Heating, Ventilation and Air Conditioning (ISHVAC). 121., 2015. **Anais** [...]. Elsevier Ltd, 2015. vol. 121, p. 1635–1641. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.09.194>.

ZHANG, Chen; KAZANCI, Ongun Berk; LEVINSON, Ronnen; HEISELBERG, Per; OLESEN, Bjarne W.; CHIESA, Giacomo; SODAGAR, Behzad; AI, Zhengtao; SELKOWITZ, Stephen; ZINZI, Michele; MAHDAVI, Ardeshir; TEUFL, Helene; KOLOKOTRONI, Maria; SALVATI, Agnese; BOZONNET, Emmanuel; CHTIOUI, Feryal; SALAGNAC, Patrick; RAHIF, Ramin; ATTIA, Shady; LEMORT, Vincent; ELNAGAR, Essam; BREESCH, Hilde; SENGUPTA, Abantika; WANG, Liangzhu Leon; QI, Dahai; STERN, Philipp; YOON, Nari; BOGATU, Dragos Ioan; RUPP, Ricardo Forgiarini; ARGHAND, Taha; JAVED, Saqib; AKANDER, Jan; HAYATI, Abolfazl; CEHLIN, Mathias; SAYADI, Sana; FORGHANI, Sadegh; ZHANG, Hui; ARENS, Edward; ZHANG, Guoqiang. Resilient cooling strategies – a critical review and qualitative assessment. **Energy and Buildings**, vol. 251, 15 nov. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111312>.

ZHANG, Xuelin; WEERASURIYA, A. U.; TSE, K. T. 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**, vol. 229, 15 dez. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110516>.

ZHOU, Chaobin; WANG, Zhiqiang; CHEN, Qingyan; JIANG, Yi; PEI, Jingjing. Design optimization and field demonstration of natural ventilation for high-rise residential buildings. **Energy and Buildings**, vol. 82, p. 457–465, 19 ago. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.06.036>.

ZHOU, Qi; OOKA, Ryozo. Implementation of a coupled simulation framework with neural network and Modelica for fast building energy simulation considering non-uniform indoor environment. **Building and Environment**, vol. 211, p. 1–15, 1 mar. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108740>.