

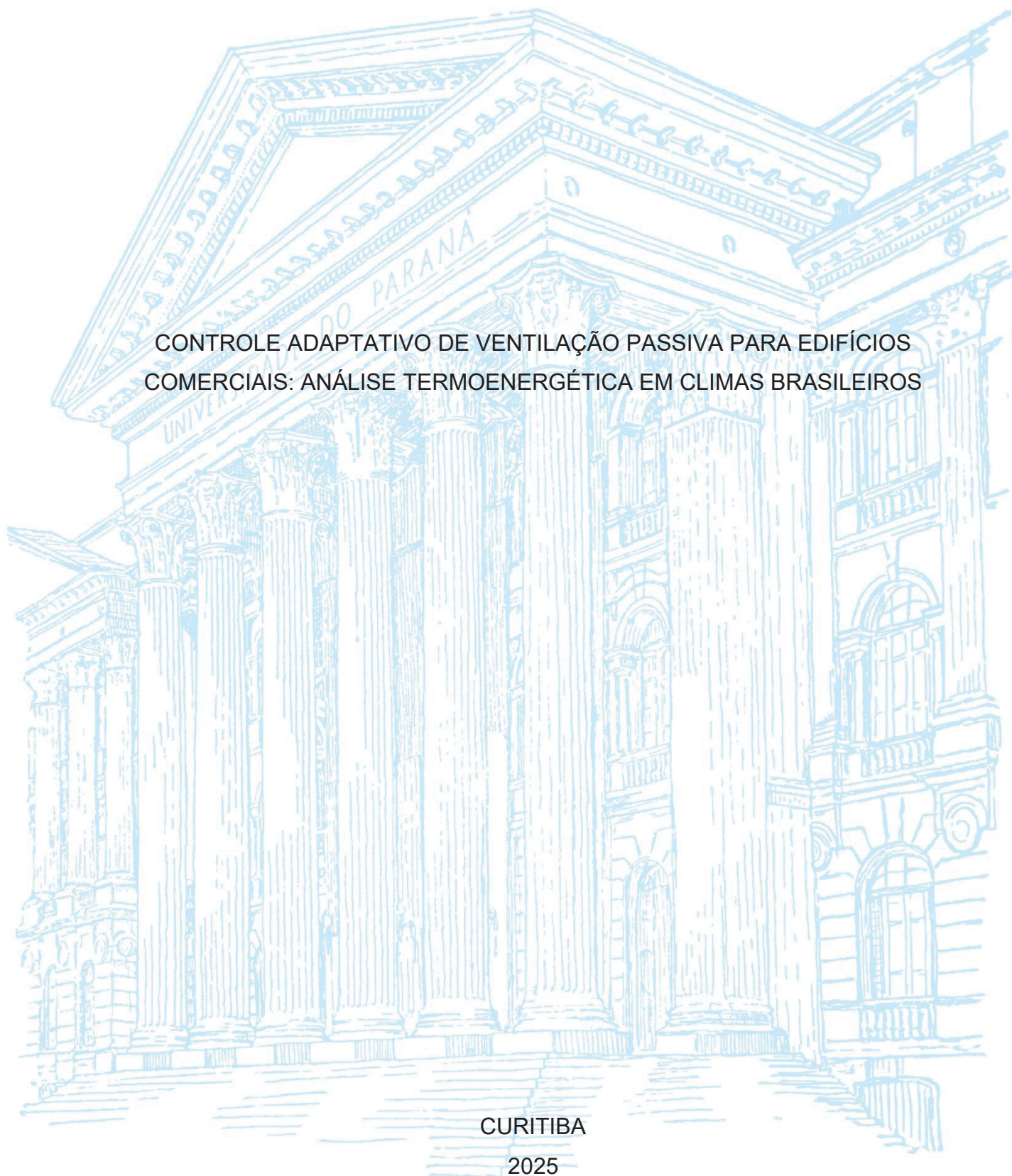
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

NÍKOLAS BORGES NASCIMENTO DE ARAÚJO

CONTROLE ADAPTATIVO DE VENTILAÇÃO PASSIVA PARA EDIFÍCIOS  
COMERCIAIS: ANÁLISE TERMOENERGÉTICA EM CLIMAS BRASILEIROS

CURITIBA

2025



NÍKOLAS BORGES NASCIMENTO DE ARAÚJO

CONTROLE ADAPTATIVO DE VENTILAÇÃO PASSIVA PARA EDIFÍCIOS  
COMERCIAIS: ANÁLISE TERMOENERGÉTICA EM CLIMAS BRASILEIROS

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Marcio José Sorgato

CURITIBA

2025

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Araújo, Níkolos Borges Nascimento de  
Controle adaptativo de ventilação passiva para edifícios comerciais:  
análise termoenergética em climas brasileiros / Níkolos Borges Nascimento  
de Araújo. – Curitiba, 2025.  
1 recurso on-line : PDF.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de  
Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Orientador: Marcio José Sorgato

1. Ventilação. 2. Energia elétrica – Conservação. 3. Edifícios comerciais.  
4. Edifícios comerciais – Aquecimento e ventilação. I. Universidade Federal  
do Paraná. II. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Sorgato,  
Marcio José. IV. Título.

Bibliotecário: Douglas Lenon da Silva CRB-9/1892



## TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA CIVIL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **NIKOLAS BORGES NASCIMENTO DE ARAÚJO**, intitulada: **Controle adaptativo de ventilação passiva para edifícios comerciais: Análise termoenergética em climas brasileiros**, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 07 de Novembro de 2025.

Assinatura Eletrônica

10/11/2025 13:58:04.0

MARCIO JOSÉ SORGATO

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

25/11/2025 21:22:17.0

JULIANA OLIVEIRA BATISTA

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS)

Assinatura Eletrônica

11/11/2025 18:23:12.0

LEANDRO CARLOS FERNANDES

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

## **AGRADECIMENTOS**

O desenvolvimento deste trabalho não foi apenas resultado do meu esforço individual, mas também de uma rede de apoio à qual sou profundamente grato.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Marcio José Sorgato, pelos ensinamentos compartilhados dentro e fora da sala de aula, que foram valiosos para minha formação acadêmica e para minha vida pessoal. Ao Prof. Dr. Leandro Carlos Fernandes, por ter sido meu primeiro contato com o PPGEC e por despertar ainda mais meu interesse em cursar o mestrado. À Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Juliana Oliveira Batista, pelas contribuições na avaliação e na correção deste trabalho.

À Nicolle e ao Gustavo, pela amizade, pelo companheirismo e por todo o apoio e acolhimento durante o período de mestrado. Ao Emanuel, pela presença no dia a dia, pela confiança e pelo incentivo constante. Este trabalho só existe porque, um dia, você acreditou que eu seria capaz. Muito obrigado.

Aos colegas e estudantes do PPGEC, que, entre conversas e encontros, tornaram essa jornada mais leve e inspiradora. A todos os meus amigos e familiares, pelo apoio, carinho e incentivo em cada etapa desta caminhada.

Por fim, agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo financiamento desta pesquisa e à Universidade Federal do Paraná pela oportunidade de realizar uma pós-graduação pública, gratuita e de qualidade.

## RESUMO

O consumo de energia para resfriamento em edifícios tem aumentado globalmente devido à frequência e à intensidade crescentes de eventos climáticos extremos, bem como à subsequente adoção de sistemas de climatização artificial, como os de ar-condicionado (AC). É esperado que esse consumo aumente ainda mais nas próximas décadas. No Brasil, o consumo final de eletricidade cresceu 5,5% em 2024. Os setores que mais contribuíram para este avanço foram os de edificações residenciais e comerciais. Estratégias de controle de ventilação passiva representam uma medida de eficiência energética ao identificar oportunidades de utilizar o ar externo para reduzir a carga térmica dos edifícios. Este trabalho tem como objetivo investigar a influência do controle automatizado de ventilação passiva no desempenho termoenergético de uma edificação comercial, considerando diferentes composições construtivas e contextos climáticos. A partir de simulações computacionais, três estratégias de ventilação foram comparadas: (i) uso exclusivo de sistema AC, (ii) ventilação de modo misto (VMM), que consiste na alternância entre a ventilação natural por aberturas das janelas com o sistema AC, e (iii) ventilação de modo misto por *fans* (VMMF), que consiste em trocas de ar nas condições naturais a taxas pré-definidas alternando com o sistema AC. O controle desenvolvido para os modos de condicionamento misto baseia-se no modelo de conforto térmico adaptativo da ASHRAE 55. Com base nos resultados obtidos, foi possível concluir que as variações nos componentes construtivos podem ampliar significativamente os ganhos de desempenho da edificação, especialmente nas estratégias de condicionamento misto. Identificaram-se ainda limites de massa térmica, além dos quais os aumentos adicionais não resultaram em ganhos de desempenho contínuos. A implementação da VMM proporcionou reduções no consumo energético em todos os climas testados quando comparada ao uso exclusivo de AC, embora com desempenhos distintos. No clima quente e úmido (As), as reduções foram limitadas, enquanto, no clima subtropical úmido (Cfa) e temperado (Cfb), essa modalidade de operação apresentou maior potencial de economia energética. No modo VMMF, o impacto das altas taxas de ventilação variou conforme o clima: desfavorável na região quente e úmida (As), condicionado à alta massa térmica interna no clima temperado (Cfb) e mais eficaz na redução de carga térmica no clima subtropical úmido (Cfa). Esses resultados oferecem subsídios a projetistas que buscam otimizar a eficiência energética por meio de estratégias de ventilação adaptadas às condições climáticas locais.

Palavras-chave: ventilação passiva; eficiência energética; simulação energética de edifícios; controle automatizado de ventilação; ventilação de modo misto.

## ABSTRACT

Energy consumption for cooling in buildings has been rising globally due to the increasing frequency and intensity of extreme climate events, as well as the subsequent adoption of artificial conditioning systems such as air conditioning (AC). This demand is expected to grow even further in the coming decades. In Brazil, final electricity consumption increased by 5.5% in 2024, with the residential and commercial building sectors contributing most significantly to this rise. Passive ventilation control strategies represent an energy-efficiency measure by identifying opportunities to use outdoor air to reduce building thermal loads. This study aims to investigate the influence of automated passive ventilation control on the thermal–energy performance of a commercial building, considering different construction assemblies and climatic contexts. Using computational simulations, three ventilation strategies were compared: (i) exclusive use of AC systems, (ii) mixed-mode ventilation (MMV), which alternates between natural ventilation through window openings and AC operation, and (iii) mixed-mode ventilation with fans (MMVF), which involves air exchange under natural conditions at predefined airflow rates alternating with AC operation. The control logic developed for the mixed-mode strategies is based on the ASHRAE 55 adaptive thermal comfort model. Based on the results, it was concluded that variations in construction components can significantly enhance building performance, particularly under mixed-mode conditioning strategies. Thresholds of thermal mass were also identified, beyond which additional increases no longer yielded continuous performance gains. The implementation of MMV led to reductions in energy consumption across all tested climates when compared with exclusive AC use, although with varying effectiveness. In the hot–humid climate (As), reductions were limited, whereas in the humid subtropical (Cfa) and temperate (Cfb) climates, this operational mode demonstrated greater potential for energy savings. Under MMVF, the impact of high ventilation rates varied by climate: unfavorable in the hot–humid region (As), dependent on high internal thermal mass in the temperate climate (Cfb), and more effective in reducing thermal loads in the humid subtropical climate (Cfa). These findings provide valuable insights for designers seeking to optimize energy efficiency through ventilation strategies tailored to local climatic conditions.

Keywords: Passive ventilation; energy efficiency; building energy simulation; automated ventilation control; mixed mode ventilation.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Mapa de coocorrência de palavras-chave .....	21
FIGURA 2 - Escala de sete pontos .....	23
FIGURA 3 - PDD em função do PMV.....	24
FIGURA 4 - Limites de aceitabilidade do modelo adaptativo .....	28
FIGURA 5 - Ventilação cruzada .....	31
FIGURA 6 - Ventilação unilateral .....	32
FIGURA 7 - Sistemas AVAC de acordo com a localização da AHU .....	36
FIGURA 8 - Funcionamento do modelo de rede do fluxo de ar .....	43
FIGURA 9 - Procedimento padrão de simulações de método detalhado .....	46
FIGURA 10 - Integração de elementos de simulação no <i>Energyplus</i> . .....	47
FIGURA 11 - Funcionamento do AFN.....	51
FIGURA 12 - Localização das cidades selecionadas.....	58
FIGURA 13 - Perfil climático de Fortaleza: temperaturas, umidade, irradiação solar e ventos .....	60
FIGURA 14 - Perfil climático de São Paulo: temperaturas, umidade, irradiação solar e ventos .....	61
FIGURA 15 - Perfil climático de Curitiba: temperaturas, umidade, irradiação solar e ventos .....	62
FIGURA 16 - Adequação da temperatura do ar externo à faixa de conforto térmico adaptativo em Fortaleza.....	66
FIGURA 17 - Adequação da temperatura do ar externo à faixa de conforto térmico adaptativo em São Paulo .....	67
FIGURA 18 - Adequação da temperatura do ar externo à faixa de conforto térmico adaptativo em Curitiba .....	68
FIGURA 19 - Planta baixa e modelo tridimensional da edificação .....	69
FIGURA 20 - Padrão de uso e ocupação.....	71
FIGURA 21 - Lógica de controle de condicionamento misto (VMM e VMMF).....	77
FIGURA 22 - Consumo por combinações de componentes sob a estratégia de ar-condicionado .....	84
FIGURA 23 - Consumo por escritório para condicionamento por AC .....	88
FIGURA 24 - Consumo por combinações de componentes sob condicionamento misto (VMM).....	91

FIGURA 25 - PHFT e uso de sistema AC sob a estratégia de condicionamento misto (VMM) .....	92
FIGURA 26 - Correlação e regressão linear entre PHFT e consumo.....	94
FIGURA 27 - Correlação e regressão linear entre taxa de renovação de ar e consumo .....	96
FIGURA 28 - Consumo por escritório para condicionamento misto (VMM) .....	98
FIGURA 29 - Comparação do consumo anual entre o modo de uso exclusivo de AC e VMM.....	99
FIGURA 30 - Consumo por combinações de componentes sob a VMMF .....	101
FIGURA 31 - Regressões lineares entre PHFT e consumo para as diferentes taxas de ventilação adotadas em Fortaleza .....	108
FIGURA 32 - Regressões lineares entre PHFT e consumo para as diferentes taxas de ventilação adotadas em São Paulo .....	109
FIGURA 33 - Regressões lineares entre PHFT e consumo para as diferentes taxas de ventilação adotadas em Curitiba .....	109
FIGURA 34 - Regressões polinomiais entre as médias de taxas de ventilação simuladas e consumo para as localidades.....	111
FIGURA 35 - Diferenças das médias de consumo para Fortaleza (Tukey 95% IC)	116
FIGURA 36 - Diferenças das médias de consumo para São Paulo (Tukey 95% IC) .....	117
FIGURA 37 - Diferenças das médias de consumo para Curitiba (Tukey 95% IC)...	118

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Classificação de ambientes térmicos conforme ISO 7730 (2005) .....	25
TABELA 2 - Condições para aumento de limites da temperatura operativa .....	29
TABELA 3 - Algoritmos adotados nas simulações .....	57
TABELA 4 - Localidades selecionadas .....	58
TABELA 5 - Equipamentos considerados nas simulações.....	70
TABELA 6 - Envoltórias adotadas .....	72
TABELA 7 - Componentes construtivos adotados para os elementos internos .....	73
TABELA 8 - Composições do ambiente interno .....	74
TABELA 9 - Propriedades dos vidros adotados .....	75
TABELA 10 - Taxas de renovações de ar simuladas para a VMMF .....	77
TABELA 11 - Coeficientes adotados na simulação da VN .....	78
TABELA 12 - Parâmetros adotados na modelagem do sistema AC .....	79
TABELA 13 - Casos de maior e de menor consumo sob estratégia de condicionamento por AC .....	83
TABELA 14 - Casos de maior e menor consumo sob estratégia de condicionamento misto (VMM).....	89
TABELA 15 - Casos de maior e menor consumo sob estratégia VMMF para Fortaleza .....	102
TABELA 16 - Casos de maior e menor consumo sob estratégia VMMF para São Paulo .....	104
TABELA 17 - Casos de maior e menor consumo sob estratégia VMMF para Curitiba .....	105
TABELA 18 - Hipóteses da análise de variância (ANOVA) .....	114
TABELA 19 - Análise de variância entre as combinações de componentes construtivos e as modalidades de condicionamento misto .....	115
TABELA 20 - Consumo para as combinações de componentes construtivos sob condicionamento por AC .....	137
TABELA 21 - Consumo para as combinações de componentes construtivos sob estratégia de VMM .....	138
TABELA 22 - Consumo para as combinações de componentes construtivos sob estratégia VMMF com taxa de ventilação de 2,5 ACH.....	139

TABELA 23 - Consumo para as combinações de componentes construtivos sob estratégia VMMF com taxa de ventilação de 5,0 ACH.....	140
TABELA 24 - Consumo para as combinações de componentes construtivos sob estratégia VMMF com taxa de ventilação de 10,0 ACH.....	141
TABELA 25 - Teste tukey para as composições de componentes construtivos sob os modos de VMM para Fortaleza .....	143
TABELA 26 - Teste tukey para as composições de componentes construtivos sob os modos de VMM para São Paulo .....	144
TABELA 27 - Teste tukey para as composições de componentes construtivos sob os modos de VMM para Curitiba.....	145

## LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

AC	Ar-Condicionado
AFN	<i>Airflow Network</i> (Rede de Fluxo de Ar)
AHU	<i>Air Handling Unit</i> (Unidade de tratamento de ar)
AVAC	Aquecimento, Ventilação e Ar-Condicionado
CAV	<i>Constant Air Volume</i> (Volume de Ar Constante)
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i> (Dinâmica de Fluidos Computacional)
CI	Componentes Internos
COP	<i>Coefficient of Performance</i> (Coeficiente de Desempenho)
C <sub>p</sub>	Coeficiente de pressão
CTE	Capacidade Térmica Efetiva
CTM	Capacidade Térmica Média
DOE	<i>Department of Energy</i> (Departamento de Energia dos Estados Unidos)
DPE	Densidade de Potência de Equipamentos
DPI	Densidade de Potência de Iluminação
EMS	<i>Energy Management System</i> (Sistema de Gestão de Energia)
GEE	Gases do Efeito Estufa
IAQ	<i>Indoor Air Quality</i> (Qualidade do Ar Interno)
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
PHFT	Percentual de horas ocupadas com temperatura operativa dentro da faixa de conforto
PMV	<i>Predicted Mean Vote</i> (Voto Médio Previsto)
PPD	<i>Predicted Percentage of Dissatisfied</i> (Porcentagem de Pessoas Insatisfeitas)
PPM	Partes por Milhão
PTHP	<i>Packaged Terminal Heat Pump</i> (Terminal de Bomba de Calor)
RTQ-C	Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos
VAV	<i>Variable Air Volume</i> (Volume de Ar Variável)
VH	Ventilação Híbrida
VM	Ventilação Mecânica
VMM	Ventilação de Modo Misto
VMMF	Ventilação de Modo Misto por <i>Fans</i>

VN Ventilação Natural

WWR *Window-to-Wall Ratio* (Proporção janela-parede)

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>15</b>
1.1 OBJETIVOS .....	19
1.1.1 Objetivo geral .....	19
1.1.2 Objetivos específicos.....	19
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>20</b>
2.1 DELIMITAÇÃO DO CAMPO DE PESQUISA .....	20
2.2 CONFORTO TÉRMICO .....	22
2.2.1 Estático.....	22
2.2.2 Adaptativo .....	26
2.3 CONDIÇÕES DE VENTILAÇÃO .....	29
2.3.1 Ventilação natural.....	29
2.3.2 Ventilação mecânica .....	34
2.3.3 Ventilação de modo misto .....	38
2.4 ANÁLISE DO DESEMPENHO DE VENTILAÇÃO .....	41
2.5 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL .....	44
2.6 ENERGYPLUS .....	46
2.6.1 Modelos de infiltração.....	47
2.6.1.1 Airflow Network (AFN) .....	51
2.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	56
<b>3 MÉTODO</b> .....	<b>57</b>
3.1 DESCRIÇÃO CLIMÁTICA E POTENCIAL DE VENTILAÇÃO DAS LOCALIDADES .....	58
3.2 CARACTERÍSTICAS DA EDIFICAÇÃO .....	69
3.2.1 Cargas internas .....	70
3.2.2 Componentes construtivos .....	71
3.3 ESTRATÉGIAS DE CONDICIONAMENTO.....	75
3.4 ANÁLISE DE RESULTADOS .....	79
<b>4 RESULTADOS</b> .....	<b>83</b>
4.1 ESTRATÉGIA DE VENTILAÇÃO EXCLUSIVAMENTE MECÂNICA.....	83
4.2 ESTRATÉGIA DE VENTILAÇÃO DE MODO MISTO POR VENTILAÇÃO NATURAL (VMM).....	89
4.3 ESTRATÉGIA DE VENTILAÇÃO DE MODO MISTO POR <i>FANS</i> (VMMF).....	100

4.4 AVALIAÇÃO DO IMPACTO DAS TAXAS DE VENTILAÇÃO NO CONSUMO ENERGÉTICO.....	107
4.4.1 Análise de correlação e regressão .....	107
4.4.2 Análise de variância .....	113
<b>5 CONCLUSÕES .....</b>	<b>120</b>
<b>6 LIMITAÇÕES .....</b>	<b>123</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>124</b>
<b>APÊNDICE A – INDICADORES DE DESEMPENHO PARA TODOS OS CASOS SIMULADOS.....</b>	<b>137</b>
<b>APÊNDICE B – RESULTADOS DO TESTE TUKEY QUANTO AOS COMPONENTES CONSTRUTIVOS.....</b>	<b>143</b>

## 1 INTRODUÇÃO

De acordo com a Agência Internacional de Energia, o consumo energético destinado ao resfriamento de ambientes em edifícios aumentou mais de três vezes desde 1990, contribuindo significativamente para as emissões de gases de efeito estufa (GEE) e para a formação de ilhas de calor urbanas (IEA, 2018). Este crescimento está associado à maior frequência e intensidade de eventos climáticos extremos, como ondas de calor, o que aumenta a demanda por sistemas de resfriamento. Em 2024, por exemplo, a temperatura média global atingiu o maior valor já registrado, superando o recorde de 2023 (Hausfather, 2024; NCEI, 2025).

Nas próximas três décadas, o uso de aparelhos AC aumentará significativamente, tornando-se um dos principais fatores que impulsionarão a demanda global por eletricidade. Se medidas de eficiência energética não forem aplicadas, projeções indicam que o consumo de energia para resfriamento dobrará até 2050 (IEA, 2018, 2023). Esse aumento global esperado é impulsionado por países emergentes, nos quais processos rápidos de urbanização e crescimento do poder aquisitivo da população levam à implementação de sistemas AC em larga escala (Davis e Gertler, 2015; González-Torres *et al.*, 2022).

No Brasil, o consumo final de eletricidade cresceu 5,5% em 2024. Os setores que mais contribuíram para este avanço foram os de edificações residenciais (8%), seguidos por edificações comerciais (+7,4%) (EPE, 2025). Em 2023, os edifícios no Brasil corresponderam a 47% do consumo total de eletricidade do país, o que representa um aumento de 6% em relação ao ano anterior. O segmento de serviços, que inclui edificações comerciais e públicas, apresentou crescimento médio anual de 3% entre 2005 e 2023. Dentro desse segmento, destaca-se a categoria de edifícios de escritórios, responsável por 10% do consumo elétrico total do setor e que registrou aumento de 19% entre 2020 e 2023.

O crescimento do consumo neste segmento é impulsionado principalmente pelo aumento da demanda por resfriamento, decorrente da elevação das temperaturas médias, e pela retomada dos atendimentos presenciais após a pandemia de COVID-19. Dada sua expressiva participação no consumo nacional de eletricidade, o setor de edificações apresenta o maior potencial para a adoção de medidas de eficiência energética, mitigando impactos ambientais (EPE, 2024a, 2024b).

Diante deste cenário, é evidente a necessidade de implementar medidas de eficiência energética nos sistemas de aquecimento, ventilação e ar-condicionado (AVAC) de edifícios. A ventilação natural (VN), ao promover a entrada de ar externo nos ambientes, configura-se como uma estratégia passiva com potencial de melhorar a produtividade dos ocupantes, de reduzir o contágio de doenças transmitidas pelo ar, de proporcionar conforto térmico, de manter níveis adequados de qualidade do ar interno e de contribuir para a redução do consumo de energia por sistemas de climatização (Agarwal *et al.*, 2021; Ben-David; Waring, 2016; López-Cabeza *et al.*, 2023; Nair *et al.*, 2022; Nawaz; Javed; Raja, 2019).

Técnicas e modalidades de controle da VN podem ser implementadas para otimizar a redução das cargas térmicas em edificações (O'Donovan *et al.*, 2018). Essa redução pode ocorrer ao introduzir o ar externo sempre que as condições forem favoráveis ao desempenho, reduzindo a necessidade de sistemas de ventilação ativos.

No entanto, a eficácia da VN depende de fatores variáveis e incertos. A operação manual de janelas e aberturas, por exemplo, é influenciada por aspectos sociais e fisiológicos dos usuários e pode ocorrer em condições desfavoráveis, resultando em desconforto térmico e desperdício de energia (Fiorentini *et al.*, 2019; Psomas *et al.*, 2017). Além disso, o fluxo de ar no edifício é impulsionado por forças motriz naturais, que permitem a circulação do ar externo e as trocas térmicas com os componentes internos. No entanto, essas forças são instáveis: a velocidade e a direção do vento mudam constantemente, o que pode comprometer a taxa de ventilação e reduzir a efetividade da VN (Artmann *et al.*, 2007; Cho; Lee; Heo, 2023).

Nesse contexto, ventiladores e circuladores de ar surgem como uma estratégia com potencial para sanar essa problemática. Embora consumam energia, os ventiladores podem ser utilizados para introduzir ou extrair o ar no ambiente a taxas pré-definidas, garantindo impacto no ambiente térmico sem recorrer a sistemas ativos para alterar as propriedades do ar introduzido. Além disso, por meio do movimento do ar, esse sistema possibilita a expansão da zona de conforto térmico aceitável (André *et al.*, 2022; Kent *et al.*, 2023). No Brasil, a posse deste aparelho é superior a um por domicílio, o que configura uma alternativa de menor custo para a climatização de ambientes em comparação com sistemas AC (EPE, 2023).

Além disso, dado que a operação manual de janelas frequentemente ocorre em condições subótimas, o que ocasiona desconforto térmico e aumento do consumo

energético (Chen *et al.*, 2019), os sistemas automáticos de controle da ventilação surgem como uma estratégia promissora para potencializar o desempenho da VN. Esses sistemas monitoram variáveis relevantes ao ambiente interno, como temperaturas interna e externa, umidade relativa, velocidade e direção do vento, concentração de CO<sub>2</sub> e padrões de ocupação. A partir dessas informações, são capazes de regular dinamicamente as aberturas do edifício, ativando ou restringindo a ventilação (Breesch; Merema, 2021).

Dessa forma, a VN é sempre utilizada quando as condições favorecem o desempenho, enquanto, em situações desfavoráveis, é possível a transição para a ventilação mecânica. Tal abordagem caracteriza a ventilação de modo misto (VMM), que integra estratégias naturais e mecânicas para conciliar conforto térmico e eficiência energética. A eficácia desse sistema depende da definição adequada dos limites de operação da VN, que devem ser ajustados conforme as condições climáticas locais (Yu *et al.*, 2024).

O território brasileiro apresenta uma ampla diversidade de condições climáticas. A maioria das regiões é caracterizada por invernos amenos e verões quentes, com abundância de ar em alta velocidade, permitindo a aplicação da VN como uma estratégia passiva (Krelling *et al.*, 2023; Sorgato; Melo; Lamberts, 2016). Contudo, em determinadas áreas, o clima é mais extremo e marcado por temperaturas elevadas ao longo de todo o ano, o que torna mais complexa a implementação de estratégias de ventilação passiva (Chen; Tong; Malkawi, 2017).

Além disso, a eficácia das estratégias baseadas na ventilação depende não apenas da disponibilidade de ar externo com gradiente de temperatura adequado, mas também da interação térmica eficiente entre o ar e a massa térmica da edificação (Kolokotroni *et al.*, 2015). Estratégias de design, como a definição da massa térmica, podem ser moduladas para conferir ao edifício comportamentos térmicos específicos diante das condições climáticas locais. Isso ocorre porque as propriedades térmicas dos componentes construtivos influenciam o comportamento térmico no ambiente interno, o que pode potencializar o desempenho da estratégia de ventilação. Destaca-se, como exemplo, que o aumento da massa térmica pode contribuir para reduzir os picos de temperatura interna e favorecer um ambiente mais estável em determinadas condições (Kolokotroni; Webb; Hayes, 1998; Kuczyński *et al.*, 2021).

O acoplamento do controle otimizado de ventilação à determinação da massa térmica adequada, assim como outras estratégias passivas de design, pode ser

avaliado nas fases iniciais do projeto do edifício por meio de simulações computacionais, a fim de entender seu desempenho antes da construção e atingir o potencial máximo da estratégia. Essa abordagem caracteriza-se como uma solução prática e confiável para otimizar aspectos de design, melhorar a eficiência energética e promover conforto ao usuário ao longo do ciclo de vida do edifício (Mendes *et al.*, 2024)

Entretanto, determinar a lógica ótima para sistemas de ventilação, especialmente em cenários de modo misto, é um desafio, uma vez que requer a coordenação simultânea das entradas e saídas do sistema, além da capacidade de responder a parâmetros ambientais dinâmicos (Fiorentini *et al.*, 2019; Peng *et al.*, 2022). Por essa razão, algoritmos e técnicas avançadas de controle automatizado são desenvolvidos para operar esses sistemas de forma mais eficiente. Apesar dos progressos, a literatura não apresenta um consenso estabelecido para o controle de edifícios com VMM (Aguilera *et al.*, 2021; Fiorentini *et al.*, 2019; Luo *et al.*, 2015).

Diante desse contexto, o problema que motiva esta pesquisa é: qual é o potencial do controle dinâmico e automatizado da ventilação passiva para influenciar o desempenho termoenergético de edificações comerciais sob diferentes condições climáticas brasileiras?

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é investigar a influência do controle automatizado de ventilação no desempenho termoenergético de uma edificação comercial.

### 1.1.2 Objetivos específicos

Vinculados ao objetivo geral, são propostos os objetivos específicos:

- Avaliar o potencial de condicionamento natural nas localidades selecionadas;
- Comparar o desempenho da edificação frente a diferentes controles de ventilação, componentes construtivos e climas;
- Analisar a sensibilidade do desempenho da edificação às variações nas taxas de ventilação.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

Este capítulo apresenta a fundamentação teórica deste estudo. A revisão da literatura abrange a delimitação do campo de pesquisa, os métodos de avaliação do desempenho termoenergético e de conforto térmico no ambiente construído. Além disso, aborda as condições e estratégias de ventilação encontradas na literatura, detalhando seus controles, parâmetros e a análise de desempenho. Por fim, é apresentada a análise teórica referente às simulações computacionais.

### 2.1 DELIMITAÇÃO DO CAMPO DE PESQUISA

Nesta subseção, buscou-se definir os aspectos a serem abordados neste estudo e relacioná-los aos recortes e relações encontrados na literatura. Para isso, foi realizada uma pesquisa bibliométrica na base de dados da Elsevier. A busca contemplou títulos, resumos e palavras-chave dos artigos. Foram utilizados os termos "*building performance simulation*", "*building energy simulation*", "*building thermal simulation*", "*energy simulation*" ou "*thermal simulation*", usados em combinação com o termo "*ventilation*". A pesquisa abrangeu os anos de 2003 a 2024 e incorporou tanto artigos de pesquisa quanto de revisão.

Infere-se que a combinação dos termos escolhidos resultou em uma compilação de artigos que abrangem pesquisas sobre ventilação em cenários de simulação. Para obter uma perspectiva abrangente do compilado, os artigos foram organizados e categorizados de acordo com seus temas principais, utilizando um gerenciador de referências em conjunto com um software de planilhas. Foram excluídos da análise os estudos provenientes de conferências e congressos, bem como os publicados em revistas extintas.

Ademais, realizou-se uma análise bibliométrica, utilizando as palavras-chave dos artigos resultantes, para a criação de um mapa de coocorrência, a fim de identificar os principais tópicos de pesquisa da literatura atual e as interconexões entre eles. A aplicação do software *VOSviewer* permitiu a criação do mapa de nuvens abrangendo todo o montante, conforme a Figura 1.

No mapa de nuvens, cada termo é representado por um círculo, e o tamanho do círculo é proporcional ao número de publicações em que o termo aparece. Cada cor representa um grupo de termos, e o comprimento das linhas curvas indica a



## 2.2 CONFORTO TÉRMICO

O estudo do conforto térmico tem relevância para a saúde, a produtividade e o bem-estar das pessoas em ambientes construídos (McCartney; Humphreys, 2002; Su *et al.*, 2024) e é impulsionado pelas estratégias de mitigação de gases de efeito estufa implementadas em várias regiões do mundo, uma vez que podem reduzir a demanda energética dos edifícios. Isso tem gerado investimentos em pesquisas (De Dear *et al.*, 2013).

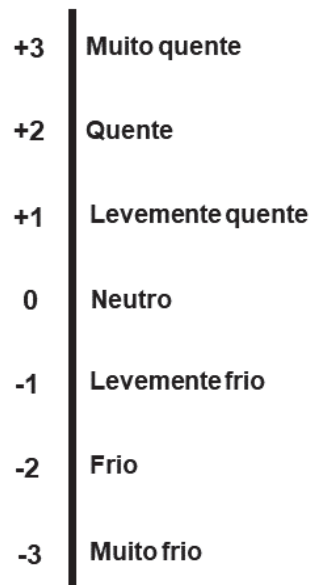
Pesquisadores buscam desenvolver e aprimorar métodos de avaliação e controle do conforto térmico em edificações, explorando modelos que podem ser classificados em duas abordagens: estáticas ou adaptativas. Essas abordagens têm pressupostos distintos para definir as prescrições da zona de conforto, além de diretrizes diferentes para projetos de edificações e a manutenção do conforto nos ambientes (Kwok, 1998; Kwong; Adam; Sahari, 2014; Su *et al.*, 2024)

### 2.2.1 Estático

O modelo estático considera o indivíduo como receptor passivo do ambiente térmico e se baseia exclusivamente em equações de balanço de calor. As pesquisas devem ser realizadas em ambientes em que as variáveis ambientais e pessoais possam ser controladas. O modelo desenvolvido por Fanger (1970) baseou-se em estudos realizados em câmaras climatizadas na Dinamarca e consiste no cálculo de dois índices: o voto médio previsto (PMV) e o percentual previsto de insatisfação (PPD).

O PMV prevê o valor médio dos votos de sensação térmica de um grupo de pessoas, antecipando se os indivíduos experimentarão sensação de frio, de calor ou de neutralidade no ambiente. Os votos são registrados por meio da escala de 7 pontos, conforme ilustrada na Figura 2, com valores variando de -3 a 3. Esses valores foram obtidos por meio de análises estatísticas aplicadas aos resultados de diferentes condições climáticas testadas em câmaras. O método combina quatro variáveis físicas (temperatura do ar, velocidade do ar, temperatura radiante média e umidade relativa) e duas variáveis pessoais (isolamento térmico da vestimenta e nível de atividade metabólica) no cálculo do índice. A Equação 01 representa o cálculo simplificado do balanço térmico por este método.

FIGURA 2 – Escala de sete pontos



FONTE: Adaptado de ASHRAE Standard 55 (2023)

$$PMV = (0,303 \cdot e^{-0,036M} + 0,028) \cdot \{(M - W) - 3,05 \cdot 10^{-3} \cdot [5733 - 6,99 (M - W) - Pa] - 0,42 \cdot [(M - W) - 58,15] - 1,7 \cdot 10^{-5} \cdot M \cdot (5867 - Pa) - 0,0014 \cdot M \cdot (34 - Ta) - 3,96 \cdot 10^{-8} \cdot Fcl \cdot [(Tcl + 273)^4 - (Tr + 273)^4] - Fcl \cdot Hc \cdot (Tcl - Ta)\}$$

EQUAÇÃO 01

No qual:

M = taxa de geração de calor metabólico (W/m<sup>2</sup>);

W = trabalho mecânico (W/m<sup>2</sup>);

Lcl = resistência térmica de vestimentas (m<sup>2</sup>.°C/W);

Fcl = razão entre a área superficial do corpo vestido e a área do corpo exposta;

Ta = temperatura do ar (°C);

Tr = temperatura radiante média (°C);

Var = velocidade relativa do ar (m/s);

Pa = pressão parcial de vapor de água (Pa);

Hc = coeficiente de transferência de calor por convecção (W/m<sup>2</sup>.°C);

Tcl = temperatura superficial das roupas (°C).

O PPD estabelece a quantidade estimada de pessoas insatisfeitas em um ambiente e pode ser calculado analiticamente, utilizando a Equação 2, ou com o auxílio da Figura 3.

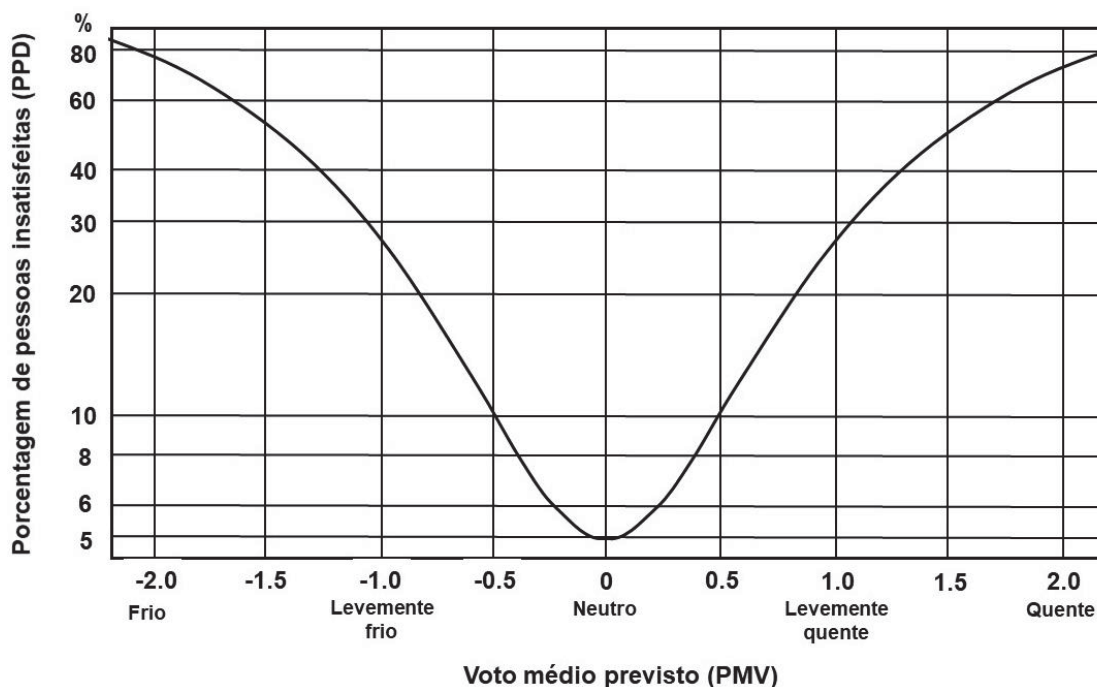
$$PPD = 100 - 95 \cdot e^{-[0,03353 \cdot PMV^4 + 0,2179 \cdot PMV^2]} \quad \text{EQUAÇÃO 2}$$

No qual:

PPD = porcentagem de pessoas insatisfeitas (%);

PMV = voto médio previsto.

FIGURA 3 – PDD em função do PMV



FONTE: Adaptado de ASHRAE Standard 55 (2023)

O modelo de conforto térmico desenvolvido por Fanger (1970) foi incorporado em diversas normas e diretrizes de projeto de edifícios, como a ASHRAE Standard 55 (2023) e ISO 7730 (2005), e é internacionalmente aplicado. Segundo Fanger (1970), a faixa de variação aceitável do PMV situa-se entre -1,0 e +1,0. Contudo, a ASHRAE Standard 55 (2023) estabelece uma faixa mais restrita, limitada entre -0,5 e +0,5. A ISO 7730 (2005) classifica a variação dos índices em três categorias distintas de conforto, apresentadas na Tabela 1, permitindo maior flexibilidade em alguns

parâmetros, como temperatura do ar, velocidade do ar e umidade (Holopainen *et al.*, 2014).

TABELA 1 – Classificação de ambientes térmicos conforme ISO 7730 (2005)

<b>Categoria</b>	<b>PPV (%)</b>	<b>PMV</b>
A	<6	-0,2 < PMV < +0,2
B	<10	-0,5 < PMV < +0,5
C	<15	-0,7 < PMV < +0,7

FONTE: ISO 7730 (2005).

Entretanto, observam-se na literatura críticas ao modelo. Pesquisadores questionam a suposição da universalidade do método, argumentando que este negligencia fatores culturais, climáticos, sociais e contextuais, bem como processos de adaptação térmica (De Dear e Brager, 2001; Grassi *et al.*, 2022). Além disso, aponta-se a inadequação do modelo para edifícios em regiões tropicais, sejam naturalmente ventilados ou com sistema AC, devido à superestimação da sensação térmica real dos ocupantes. Os residentes destas regiões demonstram maior tolerância a temperaturas mais elevadas (Busch, 1992; De Dear; Leow; Foo, 1991).

Han *et al.* (2007) conduziram uma pesquisa de campo em edifícios residenciais de três cidades na China, caracterizadas por clima quente e úmido. O objetivo foi medir e caracterizar as percepções térmicas dos ocupantes, comparar o percentual de insatisfeitos observado e previsto e identificar diferenças entre este estudo e outros realizados em diferentes zonas climáticas. As amostragens de campo ocorreram nos verões de 2003 e 2004, com 110 respostas a questionários e medições de variáveis de conforto ambiental em três cômodos de cada uma das 26 residências. A temperatura operativa neutra, obtida a partir do PMV calculado pelo modelo de Fanger (1970), foi inferior à temperatura média solicitada pelos ocupantes, conforme indicado pelos questionários. Os autores atribuem essa diferença à adaptação térmica humana.

No estudo de Cheung *et al.* (2019), diferentes tipos de edifícios (residenciais, comerciais e educacionais), estratégias de ventilação (natural, AC e híbrida) e climas (tropical, árido, temperado e continental) foram analisados para avaliar o desempenho do modelo PMV-PDD. O estudo focou em verificar a precisão do PMV em prever o voto médio observado e em comparar a relação PMV-PPD com o percentual de inaceitabilidade observado. Viu-se que a precisão do PMV foi de apenas 34% e

igualmente baixa em todas as modalidades de ventilação. O índice PPD não conseguiu prever a taxa de insatisfação observada. A precisão do PMV-PPD variou significativamente entre as estratégias de ventilação, os tipos de edifícios e os grupos climáticos. Concluiu-se que o modelo apresentou baixa precisão e tendência a superestimar a sensação térmica tanto em temperaturas quentes quanto em frias.

Dessa forma, a literatura indica que a utilização de modelos determinísticos de balanço térmico é capaz de prever a sensação térmica apenas em condições restritas (Humphreys; Nicol, 2002). A inadequação desse método pode acarretar impactos significativos no contexto de edificações, contribuindo para o aumento do consumo de energia (Holopainen *et al.*, 2014).

### 2.2.2 Adaptativo

O conforto térmico adaptativo aborda a interação dinâmica entre os ocupantes e o ambiente, considerando não apenas as condições ambientais, mas também as respostas individuais e comportamentais diante das sensações térmicas. Esse modelo foi desenvolvido com base em estudos de campo em edifícios naturalmente ventilados, estabelecendo regressões lineares que relacionam as temperaturas operativas internas às temperaturas externas (Brager; De Dear, 1998; De Dear; Brager, 1998).

Nesse contexto, a vinculação da faixa de conforto à temperatura externa permite a ocorrência de conforto em temperaturas internas mais elevadas em climas mais quentes. Isso aborda uma falha identificada no modelo de Fanger (1970), que tendia a superestimar a sensação térmica dos usuários nessas condições (Rupp; Vásquez; Lamberts, 2015). Além disso, possibilita que projetistas estimem a temperatura interna de conforto e desenvolvam algoritmos de controle visando à manutenção da temperatura interna ideal (Nicol; Humphreys, 2002). O método foi incorporado à norma ANSI/ASHRAE 55, em 2004, como alternativa para a avaliação de edifícios com ventilação natural. Além disso, o modelo foi adotado por outras regulamentações, como a EN 15251 e a Dutch ATG guideline (Rupp; Vásquez; Lamberts, 2015).

A Equação 3 é utilizada por modelos adaptativos e estabelece a relação entre a temperatura operativa interna ideal ( $T_c$ ) e a temperatura externa ( $T_o$ ). Os diferentes modelos nessa abordagem se distinguem pela maneira como obtêm o valor da

temperatura do ar externo ( $T_o$ ) e pela variação dos coeficientes, ajustados aos dados coletados em estudos de campo (Carlucci *et al.*, 2018).

$$T_c = aT_o + b \quad \text{EQUAÇÃO 3}$$

No qual:

$T_c$  = temperatura operativa interna ideal;

$a$  = coeficiente angular;

$T_o$  = temperatura externa;

$b$  = coeficiente linear.

A Equação 4 e a Equação 5 definem a faixa de aceitabilidade térmica adaptativa para ambientes naturalmente condicionados controlados pelos ocupantes, adotada pela ASHRAE Standard 55 (2023), em que  $T_o$  é a temperatura média do ar externo. A definição dos coeficientes e de  $T_o$  da equação foi baseada no estudo de De Dear e Brager (1998), com modificações, visando encontrar equilíbrio entre evidências científicas, experiências práticas, pragmatismo e suposições (Attia; Carlucci, 2015).

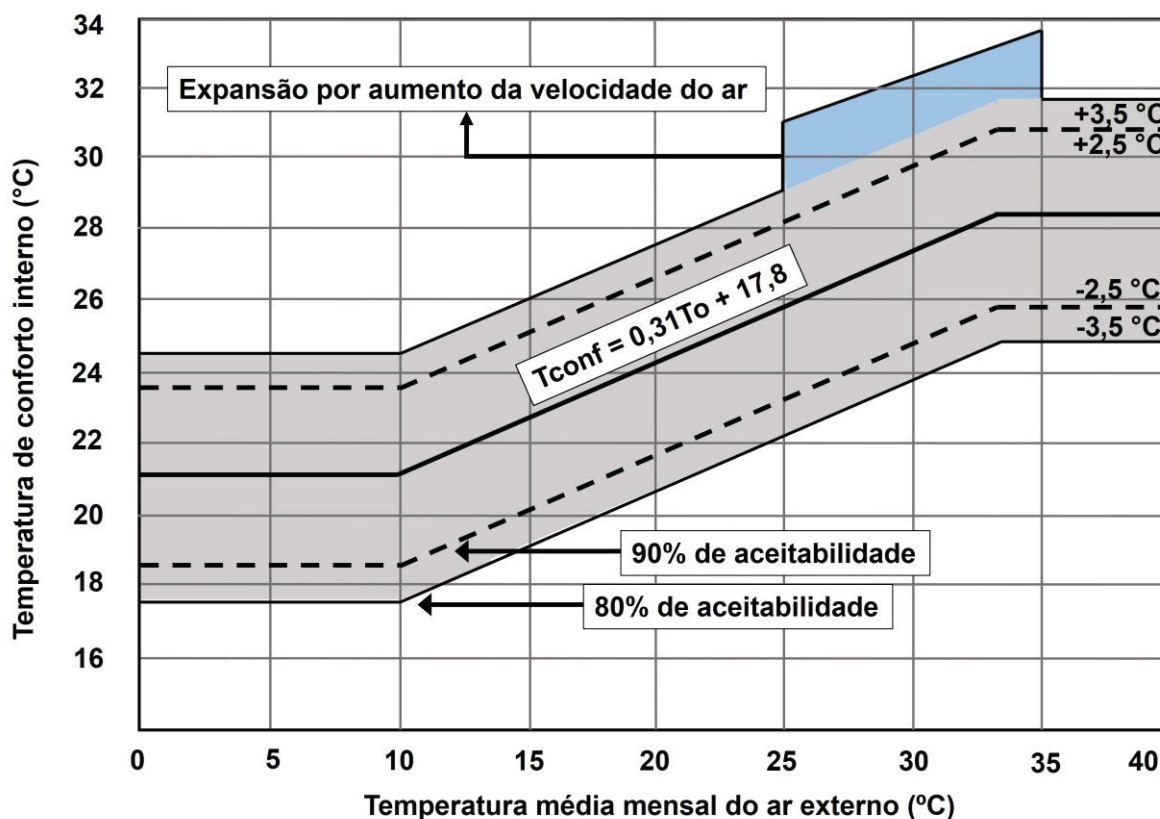
Limites para 80% de aceitabilidade:  $T_{co} = 0,31T_o + 17,8 \pm 3,5$  EQUAÇÃO 4

Limites para 90% de aceitabilidade:  $T_{co} = 0,31T_o + 17,8 \pm 2,5$  EQUAÇÃO 5

O modelo adaptativo de conforto da ASHRAE é aplicável apenas a espaços que não possuem sistemas de resfriamento ou aquecimento mecânicos, nos quais as taxas metabólicas variam entre 1,0 e 1,5 met e os ocupantes têm liberdade para ajustar suas vestimentas entre 0,5 e 1,0 clo. Ademais, a norma estabelece que a média mensal da temperatura do ar externo deve estar entre 10 e 33,5 °C. Dentro dessa faixa, os intervalos de temperatura considerados confortáveis variam de 17°C a 31°C para uma taxa de aceitabilidade de 80% e de 18,5°C a 30,5°C para uma taxa de aceitabilidade de 90% dos usuários, conforme mostrado na Figura 4.

A temperatura média predominante é determinada pela média aritmética das temperaturas médias externas diárias registradas. Para calcular essa temperatura, é necessário considerar um período mínimo de sete dias consecutivos e, no máximo, trinta dias anteriores ao dia em questão.

FIGURA 4 – Limites de aceitabilidade do modelo adaptativo



FONTE: Adaptado de Attia e Carlucci (2015), De Dear e Brager (2002)

De acordo com a disponibilidade de ventilação, os limites da temperatura operativa podem ser ampliados. Com o avanço das pesquisas, observou-se que, em regiões quentes e úmidas, as pessoas têm tolerância a temperaturas mais elevadas quando a velocidade do ar é maior. Isso ocorre porque o fluxo de ar facilita a dissipação de calor do corpo (Arens *et al.*, 2009; Yang; Zhang, 2009; Zhou *et al.*, 2023).

Essa consideração foi incorporada à norma ASHRAE 55 na atualização de 2010, permitindo a elevação dos limites superiores de temperatura em resposta ao aumento da velocidade do ar, conforme a Tabela 2. A temperatura média externa deve ser igual ou superior a 25 °C.

TABELA 2 – Condições para aumento de limites da temperatura operativa

Velocidade do ar (m/s)	Aumento do limite máximo de temperatura de conforto (°C)	Temperatura média predominante externa (°C)
0,6	1,2	≥ 25
0,9	1,8	≥ 25
1,2	2,2	≥ 25

FONTE: Adaptado de ASHRAE Standard 55 (2023)

O modelo adaptativo é frequentemente empregado em estudos de desempenho térmico de edifícios, especialmente quando se busca otimizar a utilização da ventilação natural, pois se revela mais adequado. Embora não seja ideal para ambientes completamente condicionados, o método tem sido testado em diversos estudos de campo e tem se mostrado válido para edifícios de modo misto, em comparação com outros modelos (Barbadilla-Martín *et al.*, 2017; Luo *et al.*, 2015).

## 2.3 CONDIÇÕES DE VENTILAÇÃO

Este tópico aborda as principais estratégias de ventilação, detalhando como elas influenciam o desempenho térmico e a eficiência energética dos edifícios.

### 2.3.1 Ventilação natural

A VN é o processo de troca de ar entre o ambiente externo e o ambiente interno, que ocorre por meio das aberturas na envoltória da edificação, sem a utilização de equipamentos mecânicos. Este sistema viabiliza a construção de edifícios de baixo consumo energético, contribuindo para a redução das emissões de CO<sub>2</sub> (Graça; Linden, 2016), promove a saúde ao garantir a qualidade do ar interno por meio da troca de ar (Yamamoto, 2023) e proporciona conforto térmico aos indivíduos, aproveitando as condições meteorológicas externas (Lei *et al.*, 2017).

As forças motrizes naturais exploradas por esse sistema são geradas pela flutuação térmica (*thermal buoyancy ventilation*) e pela pressão dos ventos (*wind-driven ventilation*). A ventilação por flutuação térmica ocorre quando há diferença de densidade entre o ar interno e o externo, causada pelas diferenças de temperatura entre eles. Esta diferença gera variações de pressão que conduzem o ar para dentro

e para fora do edifício por meio de aberturas em diferentes alturas. Quanto maiores a distância vertical entre as aberturas e a diferença de temperatura entre o ambiente interno e o externo, mais forte é o efeito da fluatibilidade térmica. O termo efeito chaminé (*stack ventilation*) também é utilizado para descrever sistemas de VN que aproveitam a diferença de densidade do ar (Kleiven, 2003; Omrani *et al.*, 2017; Wood; Salib, 2012).

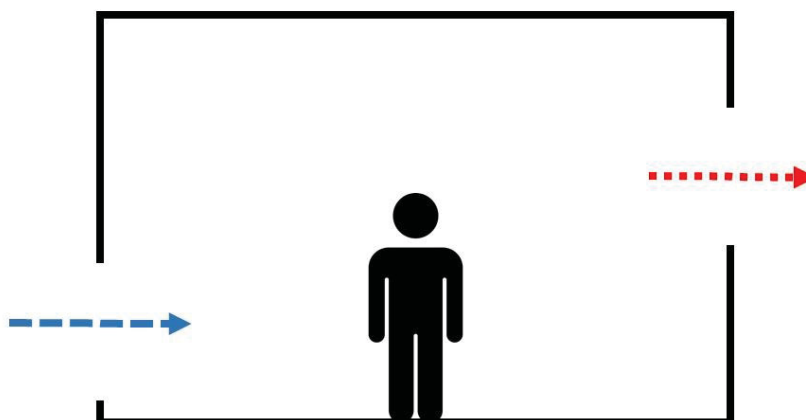
A ventilação impulsionada pelo vento (*wind-driven ventilation*) ocorre quando o vento é bloqueado pelas superfícies de um edifício, criando diferentes pressões em sua envoltória. O vento cria pressões mais altas no lado do edifício exposto ao fluxo, enquanto no lado oposto, a pressão é menor. Essa diferença impulsiona o ar para o ambiente interno por meio das aberturas e, conseqüentemente, impacta-o termicamente, podendo reduzir a temperatura do ar interno (Kleiven, 2003; Szokolay, 1986).

Apesar de terem origens distintas, essas forças podem se combinar para garantir a eficácia do sistema VN. Para isso, é necessário compreender as diferenças entre as duas modalidades. O efeito chaminé é mais fraco do que a ventilação gerada pela pressão do vento, por exemplo, uma diferença de temperatura de 8 °C em uma chaminé de 3 metros gera uma pressão de fluxo de 1 Pa, enquanto uma velocidade do vento de 2 m/s pode superar esse valor. Entretanto, o efeito chaminé é mais confiável devido à sua capacidade de autoajuste: as cargas internas impulsionam o fluxo de ar de forma proporcional. Quanto maior o impacto das cargas internas no ar, maior o efeito da fluatibilidade térmica. Em contrapartida, o vento, apesar de ser uma força mais forte, sofre com flutuações na intensidade e na direção em diferentes escalas, anuais, diárias ou de minutos. Devido a essas variações, é recomendável projetar um sistema de VN que possa combinar as duas forças, considerando os momentos em que não há vento e apenas há influência do efeito chaminé (Graça; Linden, 2016).

Elementos arquitetônicos e aberturas nas fachadas dos edifícios podem ser utilizados para aproveitar os diferentes modos de ventilação do ambiente interno. Os estudos revisados por Aflaki *et al.* (2015) destacaram que o *layout*, a orientação do edifício, o tamanho e a localização das aberturas, o tamanho e a forma das varandas nas fachadas externas e os elementos vernaculares foram as variáveis arquitetônicas mais relevantes para esse aproveitamento.

O uso desses elementos permite a implementação de estratégias relacionadas aos padrões de fluxo de ar. A Figura 5 ilustra a ventilação cruzada (*cross ventilation*), que ocorre quando o ar penetra e é expelido por diferentes aberturas localizadas em fachadas distintas do edifício, geralmente impulsionada pela força do vento gerada pela diferença de pressão entre as aberturas das paredes opostas (Zhong *et al.*, 2022).

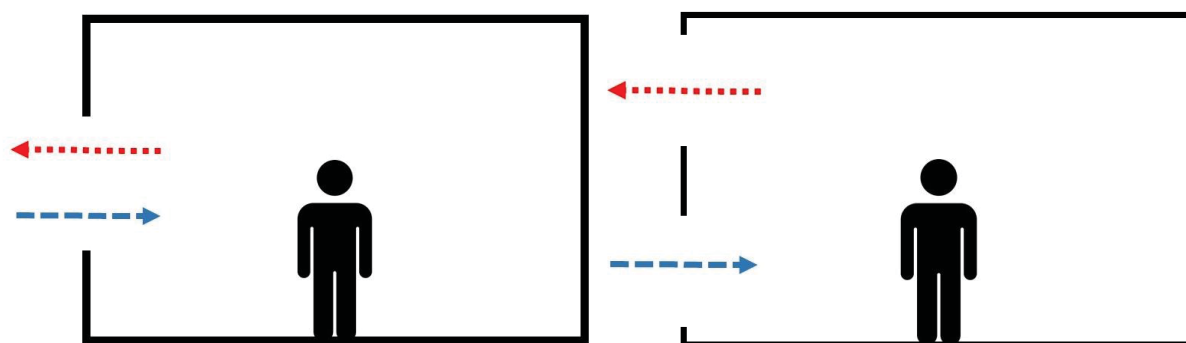
FIGURA 5 – Ventilação cruzada



FONTE: O Autor (2025)

A ventilação unilateral (*single-side ventilation*) ocorre quando o ar flui por aberturas na mesma superfície do edifício, independentemente do número e da posição dessas aberturas, conforme ilustrado na Figura 6. A ventilação unilateral não é necessariamente impulsionada pela força do vento (*wind-drive ventilation*), ela também pode ser gerada por flutuabilidade térmica (*thermal buoyancy ventilation*) ou pela combinação destas, especialmente quando as aberturas estão posicionadas em alturas diferentes (Allocca; Chen; Glicksman, 2003; Zhong *et al.*, 2022).

FIGURA 6 – Ventilação unilateral



FONTE: O Autor (2025)

Em sistemas VN unilaterais, para aproveitar a propriedade de flutuação térmica, recomenda-se, em edifícios retangulares, a disposição de uma grande abertura na parte inferior do ambiente e de janelas altas, visando maximizar o fluxo de ar. A disposição de aberturas na parte inferior permite a entrada de ar mais frio, que é então aquecido pelos ocupantes e equipamentos internos, subindo e saindo por janelas altas.

Quando se trata de aproveitar a força do vento em um sistema VN unilateral, é mais eficaz utilizar duas ou mais aberturas, mantendo a mesma área total. Em edifícios de pequeno e médio porte, essas aberturas funcionam melhor quando estão espaçadas mais distantes umas das outras, em vez de próximas entre si. Em um sistema VN impulsionado pelo vento, com duas aberturas na mesma fachada, o ar entra pela abertura de maior pressão e sai pela de menor pressão. O fluxo de ar de ventilação atravessa o ambiente em trajetória aproximadamente paralela à fachada, criando um padrão de fluxo semelhante à ventilação cruzada (Graça; Linden, 2016).

Para regiões tropicais, a ventilação cruzada é mais eficaz do que a ventilação gerada por fluabilidade térmica, pois geralmente não há grandes diferenças entre a temperatura de ambientes externos e internos (Aflaki *et al.*, 2015; Allard; Ghiaus, 2005; Givoni, 1994).

Um sistema passivo de VN emprega estas modalidades e estratégias para gerar diferentes distribuições de ar em resposta às condições climáticas externas. O objetivo é utilizar estratégias que aproveitem, gratuitamente, o resfriamento ou aquecimento do ar externo para reduzir a carga sobre os sistemas ativos. No entanto, mesmo com a aplicação de técnicas de design e de controle de ventilação, a VN pode

ser insuficiente para garantir o conforto térmico. Sua eficácia depende de fatores ambientais, podendo resultar em taxas de ventilação insuficientes para aproveitar o processo de convecção e controlar a temperatura do ar interno. Além disso, o controle, as cargas internas geradas na operação do edifício, sua massa térmica e sua geometria são outros fatores que impactam o sistema VN.

O controle da VN deve ser baseado nas condições do ar externo, avaliando se estas são melhores do que as internas em termos de temperatura, umidade e níveis de contaminantes, e se possuem forças motriz que permitem o fluxo de ar no ambiente, que depende da velocidade e da direção do vento (Gomis; Fiorentini; Daly, 2021). O Brasil apresenta ampla variação climática em seu território, variando de 0A (extremamente quente) a 3A (quente), de acordo com a classificação da ASHRAE 169 (2020). A maioria das regiões é caracterizada por invernos amenos e verões quentes, com abundância de ar de alta velocidade, o que permite a aplicação da ventilação natural como estratégia passiva de controle térmico (Krelling *et al.*, 2023; Sorgato; Melo; Lamberts, 2016).

Entretanto, para alcançar conforto no ambiente interno, os usuários realizam operações de controle, como a abertura de janelas e o acionamento de equipamentos, o que pode impactar o uso da VN. Essas escolhas de operações não consideram parâmetros técnicos e são influenciadas por fatores sociais e fisiológicos, disponibilidade de recursos, qualidade da habitação e disponibilidade de instalações para controlar o microclima, como janelas, sistemas de ventilação e de aquecimento (Dubrul, 1988; Schweiker *et al.*, 2020). Nesse contexto, conceder aos usuários o controle sobre a abertura e o fechamento de janelas pode resultar em riscos de desconforto térmico e desperdício de energia, devido à operação em condições inadequadas para o aproveitamento de VN (Ackerly; Brager, 2012; Fiorentini *et al.*, 2019; Psomas *et al.*, 2017, 2016).

O estudo de Chen, Tong e Malkawi (2017) avaliou o potencial de VN por meio de simulações, determinando o número de horas ao longo do ano em que as condições meteorológicas são adequadas para a operação do sistema, com base em parâmetros como temperatura, umidade e velocidade do vento. Para conduzir as simulações, foi selecionado como modelo um edifício comercial, e o limite superior de temperatura em que a VN opera foi determinado usando o método de conforto adaptativo para cada localidade. Os resultados do estudo mostraram variações na quantidade de horas disponíveis para VN em diferentes locais do Brasil. Em regiões

com clima ameno, como São Paulo, que experimenta verões moderadamente quentes e invernos suaves, o potencial VN atingiu 5.164 horas ao longo do ano. Em contraste, o Rio de Janeiro, de clima predominantemente quente e úmido, apresentou um potencial de 1518 horas. Salvador, por sua vez, foi classificada entre as localidades com menos de 100 horas de potencial de VN, assemelhando-se a regiões como Kuala Lumpur, na Malásia.

Por estes motivos, confiar exclusivamente nesse sistema torna-se inviável, sobretudo em regiões quentes, áridas e úmidas (Gomis; Fiorentini; Daly, 2021; Park *et al.*, 2022; Salcido; Raheem; Issa, 2016).

### 2.3.2 Ventilação mecânica

A ventilação mecânica (VM) é um sistema que utiliza ventiladores para renovar o ar em espaços internos. Comparados aos sistemas de ventilação natural, os sistemas mecânicos oferecem um maior nível de controle das propriedades do ar e de sua distribuição, contribuindo para a manutenção de um ambiente interno confortável, mesmo em condições extremas de calor ou frio. Os sistemas de aquecimento, ventilação e ar-condicionado (AVAC) podem satisfazer o conforto térmico dos ocupantes, ajustando e modificando as condições do ar externo para as condições desejadas nos edifícios ocupados. Conforme as condições externas, o ar exterior é captado pelo sistema, aquecido ou resfriado, e distribuído aos espaços internos (Pennycook, 2009).

Os sistemas de VM de exaustão são projetados para extrair uma quantidade específica de ar, induzindo uma condição de pressão negativa do ambiente. Sob essa condição, o ar exterior infiltra-se por meio de fissuras e aberturas na estrutura do edifício. Este tipo de sistema é amplamente utilizado em locais onde o ar pode se tornar contaminado devido a atividades ou equipamentos específicos, como banheiros e cozinhas, com a função de remover odores e poluentes. Os sistemas de VM de insuflamento introduzem ar no ambiente interno, possibilitando sua filtragem, aquecimento ou resfriamento. Estes sistemas criam uma condição de pressão positiva no interior do edifício, o que pode resultar em um maior vazamento de ar por fissuras e aberturas na estrutura do interior para o exterior.

Esse fenômeno de troca de ar indesejada depende da propriedade de estanqueidade ao ar (*airtightness*) do edifício. A estanqueidade ao ar refere-se à

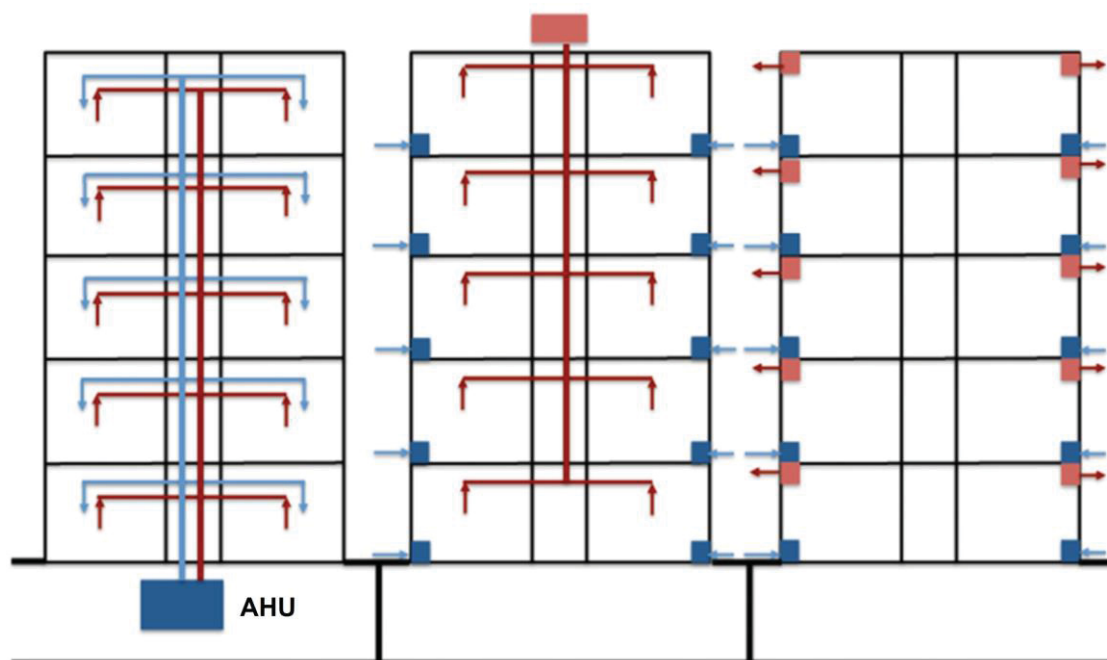
quantidade de caminhos de vazamento por onde o ar pode passar através de sua envoltória. Níveis inadequados de estanqueidade ao ar podem prejudicar o desempenho da ventilação mecânica, tornando-a incapaz de controlar a pressurização do ambiente devido a infiltrações e exfiltrações. Isso pode resultar em desconforto térmico e desperdício de energia (Etheridge, 2010; Prignon; Van Moeseke, 2017).

Feijó-Muñoz *et al.* (2019) conduziram um estudo experimental realizando testes de *Blower Door* em edifícios residenciais na Europa, em regiões de clima mediterrâneo, com o objetivo de determinar a influência da infiltração de ar na carga térmica da edificação. Foi observado que, nessas condições, o impacto foi maior na demanda de energia para aquecimento, variando de 2,43 a 16,44 kWh/m<sup>2</sup>.ano, já na demanda de energia para resfriamento, a variação foi entre 0,54 e 3,06 kWh/m<sup>2</sup>.ano.

Os sistemas mecânicos de insuflamento e exaustão, que realizam simultaneamente ambas as funções, permitem um controle mais preciso das pressurizações do ambiente, pois possibilitam a determinação das taxas de infiltração e de extração de ar. Quando as taxas de fluxo de ar insuflado e exaurido são iguais, o sistema é denominado balanceado. Esse equilíbrio mantém a pressão do ar constante no ambiente, prevenindo impactos negativos decorrentes de infiltrações e vazamentos indesejados.

A VM incorpora unidades de tratamento de ar (AHU), responsáveis por realizar processos termodinâmicos que alteram as propriedades do ar captado pelo sistema. Esta unidade pode estar localizada em um ambiente central do edifício, que distribui o fluido condicionante para as zonas térmicas, ou dentro de cada zona. A Figura 7 ilustra sistemas de VM centralizados, semicentralizados e descentralizados.

FIGURA 7 – Sistemas AVAC de acordo com a localização da AHU



FONTE: Adaptado de Kim e Baldini (2016)

A AHU pode incluir filtros para remover contaminantes e poluentes e, por meio dessa capacidade, estudos são conduzidos com foco no controle da qualidade do ar interno (IAQ) e na otimização da eficiência energética dos sistemas AVAC. Em edifícios residenciais e comerciais, o CO<sub>2</sub> é o parâmetro mais utilizado em pesquisas relacionadas à qualidade do ar interno (Pereira; Ramos, 2021).

Além da filtragem, a AHU incorpora elementos de controle de temperatura, como bobinas de aquecimento e resfriamento, aquecedores a gás ou elétricos, bombas de calor, unidades de ar condicionado e unidades de resfriamento evaporativo, bem como dispositivos de umidificação e desumificação. Por meio dessas funcionalidades, os sistemas de VM são aptos a um alto controle da qualidade e das condições térmicas do ambiente interno, mas seu uso implica um aumento do consumo de energia, o que não pode ser ignorado (Tognon *et al.*, 2023).

Os sistemas mecânicos podem ser classificados conforme a forma e o fluido de distribuição de energia térmica no edifício, como sistemas de ar total (*all-air*), de ar-água (*air-water*), de água total (*all-water*) e com bombas de calor de água (*water-source heat pumps*). Os sistemas de ventilação *all-air* podem ser projetados para atender a uma única zona ou a várias zonas, com distribuição do ar em volume

constante (CAV) ou com variação das taxas de ventilação (VAV), conforme a demanda térmica do ambiente.

Em um sistema de ventilação de volume de ar constante, a taxa de fluxo de ar fornecido permanece constante, enquanto a temperatura do ar insuflado é ajustada para atender às cargas térmicas do espaço condicionado. Apesar de serem amplamente utilizados em edifícios educacionais, de escritórios, shopping centers e estações de metrô, esses sistemas podem não ser eficientes energeticamente devido à ventilação excessiva (*overventilation*). Isso ocorre porque a taxa de ventilação de projeto é mantida fixa, mesmo quando a demanda por ventilação é menor, o que leva a um uso desnecessário de energia para aquecimento ou resfriamento do ar (Niu; Zhang, 2023).

As variações nas cargas térmicas do ambiente demandam diferentes fluxos de ar do sistema de ventilação. O sistema *all-air* com volume de ar variável pode ser uma solução adequada para alcançar conforto, qualidade e eficiência. Nesse sistema, a temperatura do ar fornecida em cada zona é controlada ajustando a taxa de fluxo de ar conforme a demanda (Kandelousi, 2018).

Hesarakı, Myhren e Holmberg (2015) investigaram, experimentalmente e analiticamente, a influência de diferentes níveis de ventilação sobre a qualidade do ar interno e a economia de energia em um edifício residencial na Suécia. O edifício estava equipado com um sistema de ventilação por exaustão, operando com diferentes taxas de fluxo de ar: 0,10 L/s·m<sup>2</sup>, 0,20 L/s·m<sup>2</sup>, 0,35 L/s·m<sup>2</sup> e 0,70 L/s·m<sup>2</sup>. Os resultados indicaram que a taxa de ventilação de 0,10 L/s·m<sup>2</sup> foi a única que resultou em insuficiência para manter o nível de CO<sub>2</sub> abaixo de 1000 ppm, limite exigido pelas normas regulatórias suecas. As demais taxas foram eficazes em manter a concentração de CO<sub>2</sub> abaixo desse limite. Além disso, todas as taxas de ventilação mantiveram a umidade relativa e a temperatura dentro dos limites aceitáveis definidos no estudo.

Mostafavi Sani e Shokouhmand (2024) desenvolveram uma estratégia integrada de design de ventilação para um edifício comercial no Irã, com o objetivo de otimizar a eficiência energética e minimizar o risco de infecções por vírus. O estudo incorporou uma AHU que integra estratégias de filtração, aumento da eficiência das bombas de calor, de circulação e de recuperação de energia. Os resultados do estudo demonstraram um aumento significativo de 14% na eficiência energética e uma

redução de 46% no risco de infecção em comparação com os designs de ventilação tradicionais de edifícios.

### 2.3.3 Ventilação de modo misto

A utilização de recursos naturais pode não ser suficiente para o controle térmico do ambiente interno, pois depende das condições climáticas externas, assim como dos ruídos e da poluição. Assim, os sistemas híbridos ou de modo misto de ventilação surgem como uma solução, pois podem alternar entre o modo de ventilação natural e o modo de ventilação mecânica de forma manual ou automática, usando diferentes estratégias em diferentes períodos do ano (Heiselberg, 2002, 2006). Sistemas híbridos buscam aproveitar o resfriamento ou aquecimento gratuito resultante da mistura do ar exterior com o interior sempre que possível, ao mesmo tempo em que utilizam um sistema mecânico para garantir o conforto térmico durante períodos em que as condições exteriores não são adequadas para a ventilação (Gomis; Fiorentini; Daly, 2021).

O design da ventilação híbrida pode envolver diversas estratégias, geralmente classificadas em modos, como contingência (*contingency*), simultâneo (*concurrent*), alternância (*changeover*) e zonas (*zoned*). O modo de contingência é uma estratégia que se concentra no uso de ventilação natural e aplica a ventilação mecânica apenas a algumas partes do edifício. Simultâneo é o modo em que as duas modalidades operam concomitantemente no mesmo ambiente, no qual o sistema pode utilizar a VN como apoio ao sistema de VM. Alternância é um modo que opera as duas modalidades de forma consecutiva no mesmo ambiente. Por exemplo, a VN é implementada em estações favoráveis e a ventilação mecânica opera durante estações de climas extremos. A modalidade VH de zonas aplica VM em algumas zonas do edifício, enquanto outras utilizam VN, com funcionamento simultâneo, porém em diferentes zonas.

A operação otimizada de VH implica identificar os períodos mais propícios à aplicação da VN, por meio da análise das condições ambientais e das respostas térmicas do ambiente interno. O propósito consiste em coordenar ambas as estratégias de modo a assegurar o conforto sem desperdício de energia, evitando a abertura inadequada de janelas e a definição equivocada de *setpoints* (Gomis; Fiorentini; Daly, 2021; Kim; de Dear, 2021).

Determinar a lógica ótima para edifícios VH é um desafio, uma vez que requer a análise simultânea de fatores que impactam o conforto em ambas as modalidades, a coordenação eficiente dos *inputs* e *outputs* dos sistemas, a sincronização entre o ar natural proveniente do ambiente externo e o ar interno condicionado, além da consideração das respostas do edifício às variáveis externas, tais como temperatura, umidade, velocidade e direção do fluxo de ar (Peng *et al.*, 2022; Fiorentini *et al.*, 2019).

As diretrizes apresentadas em normativas de conforto oferecem uma oportunidade de controle otimizado dos sistemas de ventilação, visando atender às demandas térmicas do ambiente e promover a eficiência energética. No entanto, os edifícios de modo misto geralmente não são abordados especificamente nessas normas, sendo frequentemente considerados parte de edifícios totalmente condicionados mecanicamente. Isso resulta em estratégias de controle limitadas que podem não se adequar à realidade. Consequentemente, a literatura apresenta diferentes abordagens de controle personalizadas para edifícios de modo misto, mas ainda não há consenso sobre qual método é o mais adequado (Aguilera *et al.*, 2021; Fiorentini *et al.*, 2019; Luo *et al.*, 2015).

Apesar de não haver consenso, em estudos de desempenho de conforto térmico por VH, o controle pelo modelo adaptativo é o mais utilizado na literatura (Gomis; Fiorentini; Daly, 2021). Além disso, Barbadilla-martín *et al.* (2017) concluíram que o conforto adaptativo é aplicável a edifícios com ventilação híbrida, com base em um estudo empírico que envolveu questionários e registros de temperatura em edifícios na Espanha.

Yu *et al.* (2024) propuseram um método para determinar a melhor faixa de operação de ventilação natural e uma estratégia de controle de ventilação híbrida para um edifício comercial em cinco zonas climáticas da China. Os limites de operação da ventilação natural foram definidos utilizando o modelo de conforto térmico adaptativo e expandidos com *thresholds* identificados em outros estudos. O desempenho térmico e energético das combinações dos limites de ventilação natural foi analisado por meio de simulações, resultando em operação otimizada. Além disso, o controle desenvolvido para operação híbrida consiste na substituição do modelo adaptativo de conforto pelo modelo PMV ao passar para a operação do ar-condicionado. Foi determinado um intervalo de 1,5 horas após o fechamento das janelas para alterar o controle para o PMV, devido à variação dinâmica da temperatura interna durante o período de transição. Os resultados mostraram que o intervalo de ventilação natural

otimizado proposto reduziu o número de horas de desconforto em 248,33 horas, ao mesmo tempo em que aumentou as economias de energia em 13,29% em comparação com os intervalos de ventilação natural comumente utilizados. Além disso, o período de transição de 1,5 horas entre o adaptativo e o PMV resultou em uma redução no número de horas de desconforto e em um aumento de 35,46% nas economias de energia em comparação ao cenário sem período de transição.

Fiorentini *et al.* (2019) desenvolveram, implementaram e investigaram um controle de ventilação híbrida em um estudo de caso de um edifício residencial por meio de simulações e experimentos. O algoritmo de controle calcula a porcentagem ideal de abertura das janelas com base nos critérios do modelo adaptativo de conforto. Quando o modo de ventilação natural era ativado, a operação era otimizada com base em dados de velocidade e direção do vento, além das temperaturas internas e externas. Uma rede simplificada de fluxo de ar do edifício era resolvida em tempo real para prever a temperatura resultante da mistura de ar e determinar a porcentagem de abertura das janelas que mais se aproximasse da temperatura-alvo. Caso a ventilação natural não garantisse o conforto, o aquecimento ou o resfriamento mecânico era selecionado, e o setpoint do AC era calculado dinamicamente para encontrar a temperatura interna que atingisse o nível de PMV desejado. A estratégia proposta foi comparada ao controle já estabelecido no edifício, demonstrando superioridade na garantia e no controle do conforto.

O controle de ventilação de modo misto desenvolvido no estudo de Cho, Lee e Heo (2023) consiste em três componentes dinâmicos integrados de forma hierárquica. Primeiramente, os *setpoints* de resfriamento e aquecimento do sistema mecânico são ajustados conforme a temperatura externa, permitindo ampliar o uso da ventilação natural. Em seguida, a temperatura interna do ambiente determina o modo de operação do sistema, podendo ser aquecimento, resfriamento, amortecimento térmico ou ventilação natural. Quando o modo de ventilação natural é ativado, o algoritmo de controle calcula a proporção de abertura das janelas com base na diferença entre as temperaturas interna e externa. A estratégia foi simulada com base em um edifício comercial na Coreia do Sul, demonstrando capacidade de reduzir as cargas térmicas do ar-condicionado enquanto prevenia o resfriamento interno excessivo.

No desenvolvimento de um protocolo de operação automatizado para um sistema de ventilação híbrida instalado experimentalmente, Menassa, Taylor e Nelson

(2013) testaram uma estratégia de ventilação assistida por ventiladores. Apesar de reportarem economia de energia, eles consideram como incerteza do trabalho a velocidade ideal a ser adotada para os ventiladores e destacam que futuras pesquisas devem investigar o efeito da velocidade do vento no controle do VH e no nível de conforto dos ocupantes. Investigar a variável de fluxo de ar ajudará a otimizar a operação do sistema VH.

Ao analisar o desempenho da ventilação híbrida, combinando VN com VM por exaustão em um edifício industrial, Meng *et al.* (2020) testaram diferentes velocidades de exaustão em dois cenários de carga interna. Neste estudo, identificou-se uma velocidade crítica de exaustão mecânica. Quando a velocidade de exaustão estava abaixo da crítica, a ventilação híbrida mostrou-se capaz de reduzir a temperatura interior. Por outro lado, quando essa velocidade ultrapassava a crítica, observou-se um aumento na temperatura do ambiente térmico interno.

## 2.4 ANÁLISE DO DESEMPENHO DE VENTILAÇÃO

Prever o desempenho da ventilação em edifícios é um desafio devido à complexidade das propriedades físicas envolvidas. Para tanto, é necessário utilizar métodos apropriados para avaliar seu desempenho ao longo do processo de design. Existem diferentes métodos para prever e avaliar a ventilação, cada um com vantagens e limitações específicas. A escolha do método mais adequado deve ser feita considerando os recursos de projeto, os requisitos e as etapas de design (Omrani *et al.*, 2017).

O desempenho da ventilação pode ser avaliado por meio de métodos analíticos e empíricos, experimentais ou simulações computacionais. Os métodos analíticos e empíricos são desenvolvidos a partir de equações de fluxo e são muito semelhantes em termos de capacidades. O método analítico é derivado de equações fundamentais da dinâmica de fluidos e da transferência de calor, enquanto o método empírico é desenvolvido a partir de medições experimentais e observações. A principal dificuldade dos métodos analíticos e empíricos é a quantidade de suposições, simplificações e aproximações necessárias para produzir uma equação, o que pode comprometer a precisão dos resultados (Chen, 2009; Omrani *et al.*, 2017).

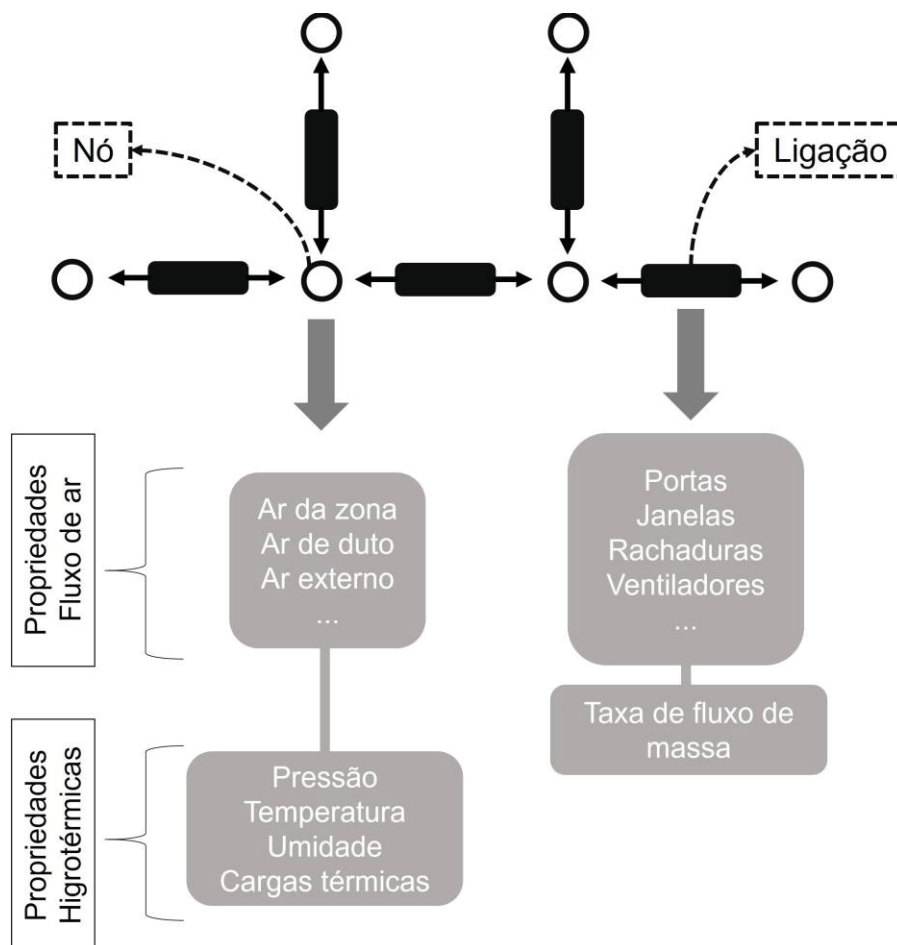
Nos métodos experimentais, diversas técnicas de medição podem ser utilizadas para mensurar características da ventilação, como velocidade do ar,

temperatura, pressão e umidade. Essas medições podem ser realizadas tanto em modelos em escala reduzida quanto em modelos em escala real no próprio edifício ou em um laboratório. Experimentos de túnel de vento são amplamente utilizados para estudos de ventilação em pequena escala e para medições de pressão do vento em estruturas de edifícios altos, devido ao seu alto grau de controle das condições experimentais e à capacidade de replicar os testes realizados. Esses experimentos permitem ajustes precisos das variáveis envolvidas. No entanto, ao realizar testes em modelos reduzidos, a mudança de escala pode afetar significativamente o comportamento do fluxo de ar e a transferência de calor. Se esses parâmetros não forem adequadamente ajustados, os resultados podem não representar com precisão o desempenho real da ventilação no edifício em escala real (Chen, 2009; Omrani *et al.*, 2017).

A abordagem por simulação permite que arquitetos e engenheiros executem programas de simulação em computadores pessoais e testem novas estratégias antes de prosseguir para a construção e instalação (Gan *et al.*, 2022; Ohba; Lun, 2010). A avaliação da ventilação nesse ambiente pode ser realizada por meio de diferentes estratégias. O uso do fluxo de ar programado, por exemplo, consiste em uma metodologia simples, na qual a taxa de volume de ar é definida de forma arbitrária (Arendt; Krzaczek; Tejchman, 2017). Outras formas de avaliação incluem a utilização de modelos de redes de fluxo de ar (*airflow network models*) ou a simulação por dinâmica dos fluidos computacional (CFD), bem como a combinação destes com programas de simulação térmica e energética.

Nos modelos de rede, o fluxo de ar é tratado como uma rede de elementos de fluxo unidimensional, que se combinam e se dividem em nós de junção. A pressão é calculada nos nós da rede, enquanto a taxa de volume do fluxo de ar é determinada entre eles. O modelo é baseado no princípio de conservação de energia para um fluxo de fluido, a lei de Bernoulli. Esse modelo ajuda a entender e analisar o comportamento do fluxo de ar em um edifício, considerando as interações nos pontos de junção e de separação dos fluxos (Kato, 2018). A Figura 8 exhibe o funcionamento básico do modelo de redes, que engloba nós e ligações.

FIGURA 8 – Funcionamento do modelo de rede do fluxo de ar



FONTE: Adaptado de Choi *et al.* (2023)

Entretanto, em ambientes reais, os fluxos de ar são tridimensionais e mais complexos do que a representação em modelos de rede. O CFD é uma ferramenta que lida com a complexidade dos fluxos tridimensionais, utilizando a equação de continuidade e as equações de Navier-Stokes. Essas equações são não lineares e suas soluções geralmente são obtidas por métodos numéricos, considerando um conjunto apropriado de condições de contorno (Kato, 2018).

A avaliação da ventilação pode ser aprimorada ao combinar modelos térmicos com modelos de rede de fluxo de ar em um ambiente de simulação energética de edifícios. Essa abordagem permite obter resultados de previsão da ventilação, combinados com informações sobre os fluxos de energia do edifício, abrangendo a ocupação, a iluminação e as operações dos aparelhos de aquecimento e resfriamento. Já a integração do CFD com outros modelos visa melhorar a precisão e a resolução dos dados de ventilação, proporcionando uma análise mais detalhada dos padrões

locais de fluxo de ar no interior do espaço (Arendt; Krzaczek; Tejchman, 2017; Omrani *et al.*, 2017).

Apesar de resultados mais precisos, o acoplamento de várias ferramentas pode não ser uma opção viável. Os modelos de rede e CFD, por exemplo, diferem em propósito e escala; o primeiro foca na construção da rede de fluxo de ar em todo o edifício (modelo multi-zona), enquanto o segundo, devido à alta demanda computacional, se concentra no padrão de fluxo de ar de uma zona específica (modelo zonal). Em estudos de edifícios de grande porte, o acoplamento de ferramentas BES, AFN e CFD pode ser inviável devido à alta capacidade computacional necessária para sua execução simultânea (Arendt; Krzaczek; Tejchman, 2017; Choi *et al.*, 2023).

Kato (2018) afirma que o nível e o tipo de modelagem devem ser adaptados à necessidade da avaliação da ventilação, destacando que a análise CFD fornece informações detalhadas e, por vezes, desnecessárias; por isso, deve ser utilizada apenas quando são requeridas informações minuciosas sobre o fluxo de ar. O modelo AFN proporciona equilíbrio mais atrativo entre precisão e demanda computacional em simulações de edifícios ventilados naturalmente (Arendt; Krzaczek; Tejchman, 2017) e é mais viável do que simulações por CFD para a avaliação do desempenho transitório ou anual de um edifício inteiro (Zhai; Johnson; Krarti, 2011).

## 2.5 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Visto que a avaliação do desempenho térmico de edifícios envolve diversos parâmetros, múltiplas iterações e análises simultâneas, as simulações computacionais de edifícios destacam-se como uma abordagem prática, confiável e relativamente rápida para otimizar aspectos de design, melhorar a eficiência energética e promover o conforto do usuário ao longo do ciclo de vida do edifício (Mendes *et al.*, 2024).

Pan *et al.* (2023) afirmam que a simulação computacional terá um papel fundamental no desenvolvimento futuro da indústria arquitetônica, uma vez que o uso desta ferramenta pode resultar em melhorias no desempenho dos edifícios.

As simulações têm recebido crescente atenção devido à sua aplicação em pesquisas de otimização da eficiência energética, incentivadas pelas normativas e metas de redução das emissões de CO<sub>2</sub> estabelecidas por diversos países. O estudo pode ser conduzido em diversas escalas, abrangendo desde sistemas específicos e

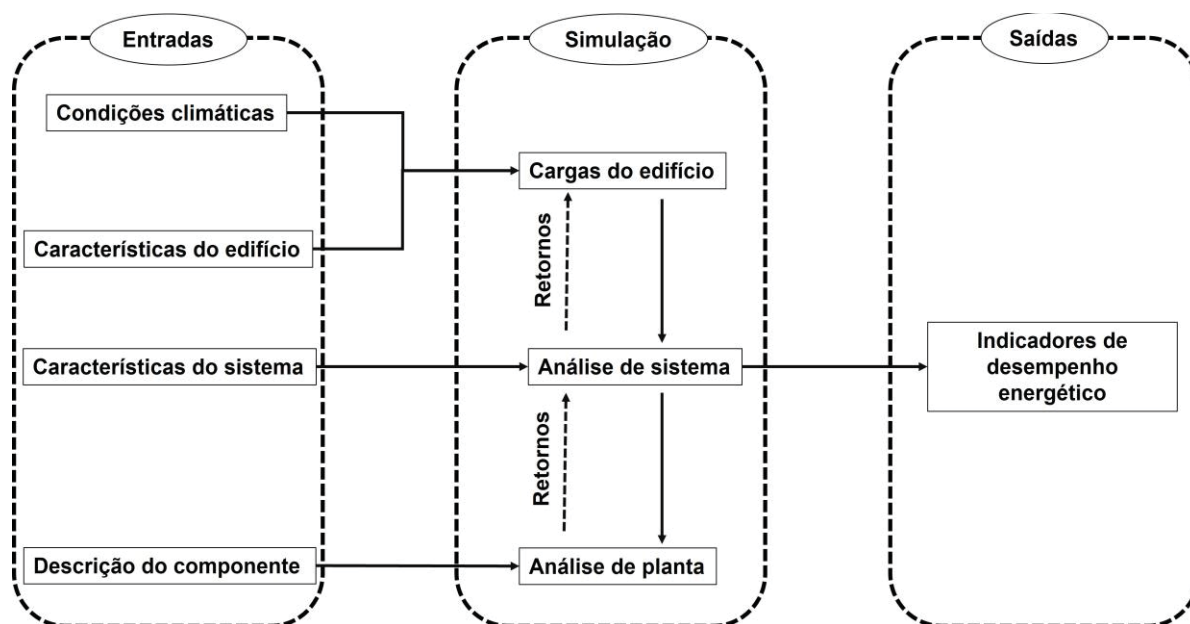
ambientes internos até edifícios inteiros e áreas urbanas. Frente a essa diversidade, a seleção da ferramenta apropriada é necessária para a obtenção de resultados precisos e aplicáveis (Pan *et al.*, 2023; Shahcheraghian; Madani; Ilinca, 2024).

*Softwares* de simulação energética, como *EnergyPlus*, *DOE-2* e *TRNSYS*, adotam o método físico detalhado, que tem como objetivo o comportamento físico entre os diversos componentes do edifício, como a envoltória e os sistemas AVAC. O método é ideal para sistemas complexos e projetos que requerem modelagem detalhada, especialmente os de otimização do uso de energia e de manutenção do conforto térmico dos ocupantes. Com o progresso da tecnologia computacional, os modelos físicos evoluíram e, atualmente, proporcionam ferramentas de visualização da geometria do edifício por meio de interfaces gráficas (Pan *et al.*, 2023; Shahcheraghian; Madani; Ilinca, 2024).

A simulação energética consiste na utilização de equações de balanço para prever o consumo total de energia, as temperaturas dos ambientes internos, os níveis de umidade, a eficiência das fontes de energia, o dimensionamento de sistemas AVAC, os requisitos de iluminação, as emissões de CO<sub>2</sub>, entre outros parâmetros (Mendes *et al.*, 2024). A utilização desta ferramenta é recomendada durante a fase de projeto, uma vez que permite realizar análises preditivas precisas, avaliando o impacto de estratégias de *retrofits* no desempenho energético (Shahcheraghian; Madani; Ilinca, 2024).

Para representar os processos térmicos e energéticos de um edifício, o modelo virtual deve incluir a geometria da edificação, suas propriedades termofísicas, interações com o clima local, dados de uso e ocupação, além de outros parâmetros relevantes que o influenciam termicamente e energeticamente. Essas variáveis são calculadas por meio de modelos matemáticos distintos e sua interação é analisada em intervalos de tempo específicos. A Figura 9 ilustra os fluxos de dados padrão das simulações energéticas.

FIGURA 9 – Procedimento padrão de simulações de método detalhado



FONTE: Adaptado de Li e Wen (2014).

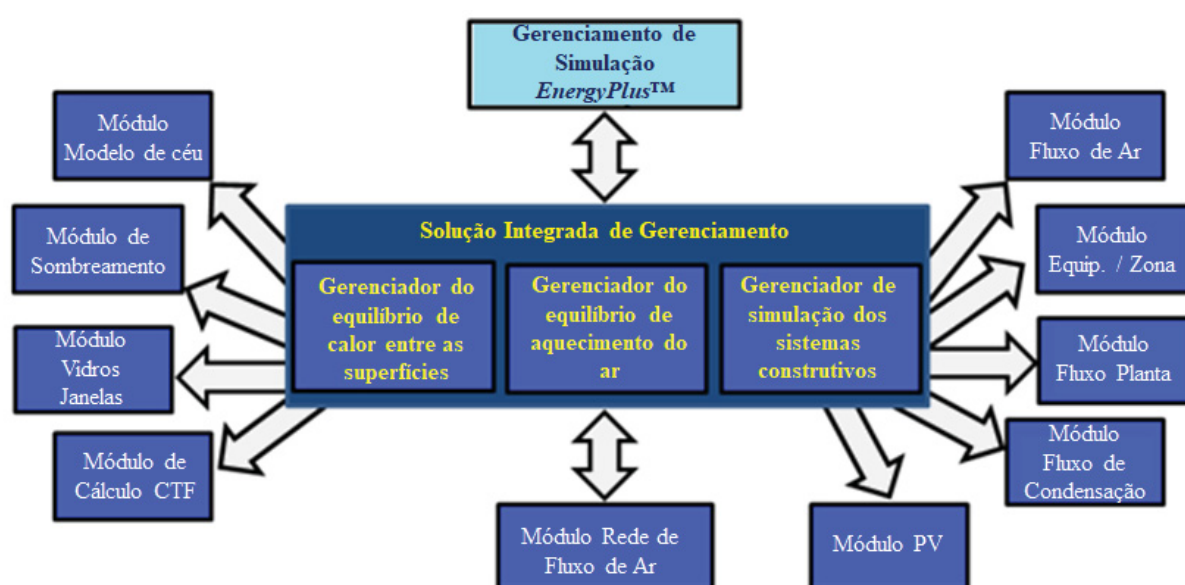
## 2.6 ENERGYPLUS

O *EnergyPlus* é um software de simulação de análise energética e de cargas térmicas de código aberto, amplamente aplicado em estudos de desempenho térmico e de controle de ventilação (Cho; Lee; Heo, 2023; Gomis; Fiorentini; Daly, 2021; Hu *et al.*, 2023; Mendes *et al.*, 2024). Com base na descrição da composição física da edificação e de seus sistemas, o programa calcula seu consumo de energia e as cargas de aquecimento e resfriamento necessárias para controle térmico de seus ambientes (Crawley *et al.*, 2008). Essas habilidades, associadas a estratégias operacionais e alternativas de design, possibilitam a avaliação do desempenho térmico e energético em diferentes escalas temporais, sob diferentes cenários (DOE, 2025b, 2025c; Trčka; Hensen, 2010).

O software possui uma variedade de funcionalidades, incluindo soluções simultâneas e integradas, cálculos baseados no balanço térmico, intervalos de tempo (timesteps) flexíveis, cálculos de transferência de calor e de massa, modelos avançados de fenestração, avaliações de iluminação e sombreamento, modelagem AVAC e estratégias de controle pré-definidas. Além disso, integra todos os aspectos da simulação: cargas, sistemas e plantas (DOE, 2025b, 2025c).

A Figura 10 ilustra a integração dos elementos do *EnergyPlus*, na qual os modelos matemáticos, como os de fenestração e de cargas internas, interagem, trocando informações e variáveis em intervalos de tempo determinados. Esses elementos convergem para o modelo de balanço térmico do ar, responsável por calcular parâmetros de interesse do simulador, como a carga térmica de aquecimento e de resfriamento, o fluxo de calor nos componentes da construção, o consumo de energia dos sistemas AVAC e as temperaturas superficiais (SOUSA; SILVA, 2021).

FIGURA 10 - Integração de elementos de simulação no *EnergyPlus*.



FONTE: Adaptado de DOE (2025b) e de Sousa e Silva (2021).

Nos tópicos a seguir, são descritos os módulos comumente utilizados para a modelagem da ventilação no *EnergyPlus*.

### 2.6.1 Modelos de infiltração

A infiltração em um edifício ocorre quando o ar externo penetra no interior por meio de fissuras, rachaduras, vãos de portas e janelas, aberturas de sistemas de ventilação e outros pontos por onde o ar pode passar. O fenômeno de infiltração depende da velocidade do vento, da temperatura e da localização. A troca de ar não controlada entre o ambiente externo e o ambiente interno, sob diferentes condições, pode acarretar desconforto aos usuários e maior consumo de energia.

Em ambiente computacional, a constante variação da velocidade e da direção do vento torna a modelagem desse processo em ambiente de simulação um desafio. Entretanto, para a produção de estimativas precisas e confiáveis, é necessária a escolha adequada do modelo de infiltração, especialmente em projetos com estratégias de *retrofit* (Porsani *et al.*, 2023).

O *EnergyPlus* apresenta três modelos de infiltração: Regressão (*DesignFlowRate*), coeficiente de fluxo (*FlowCoefficient*) e área de vazamento efetiva (*EffectiveLeakageArea*). Esses modelos foram desenvolvidos a partir de estudos em edifícios residenciais de pequeno porte e consideram diferentes parâmetros de entrada no processo de cálculo, de acordo com as características da edificação, como o tipo, o tamanho e as condições do entorno.

O modelo de regressão é definido pela Equação 6. O usuário define uma taxa de fluxo que pode ser modificada por diferenças de temperatura e de velocidade do vento. Os coeficientes do modelo são divididos em três casos: padrão, BLAST e DOE-2.

$$\text{Infiltração} = (I_{\text{design}}) \cdot (F_{\text{sch}}) \cdot [A + B |(T_{\text{zona}} - T_{\text{odb}})| + C (WS) + D (WS^2)]$$

EQUAÇÃO 6

No qual:

$I_{\text{design}}$  = taxa de infiltração de projeto (ACH)

$F_{\text{sch}}$  = valor de infiltração programada pelo usuário

A = coeficiente adimensional

B = coeficiente de temperatura ( $1/^\circ\text{C}$ )

$T_{\text{zona}}$  = temperatura operativa da zona ( $^\circ\text{C}$ )

$T_{\text{odb}}$  = temperatura média do ar externo ( $^\circ\text{C}$ )

C = coeficiente de velocidade do ar (s/m)

WS = velocidade do ar (m/s)

D = coeficiente de velocidade de ar ( $\text{s}^2/\text{m}^2$ )

Os modelos BLAST e DOE-2 são ajustados às condições climáticas típicas das estações de verão e de inverno, enquanto o modelo padrão não considera as condições ambientais. Os coeficientes (A, B, C e D) no modelo padrão são 0, o que resulta em um fluxo volumétrico de infiltração constante sob todas as condições, sem

considerar os efeitos do vento e da diferença de temperatura. O modelo DOE-2 considera apenas os efeitos da velocidade do vento e seus coeficientes são  $A=0$ ,  $B=0$ ,  $C=0,224$  e  $D=0$ . Já os coeficientes do BLAST são  $A=0,606$ ,  $B=0,03636$ ,  $C=0,1177$  e  $D=0$ , que levam em conta tanto os efeitos do vento quanto a diferença de temperatura na equação.

O modelo de infiltração por área de vazamento efetiva calcula a taxa de infiltração a partir da área estimada de vazamento de ar. A formulação do modelo usada no *EnergyPlus* é retirada do modelo básico do ASHRAE *Handbook of Fundamentals* (2025) e é apresentada conforme a Equação 7. O modelo considera a infiltração decorrente da diferença de temperatura e da velocidade do vento, que variam conforme a distribuição de vazamentos no teto, no piso e nas paredes.

$$\text{Infiltração} = (Fsch) \cdot \frac{AL}{1000} \cdot \sqrt{Cs\Delta T + Cw(WS)^2}$$

EQUAÇÃO 7

No qual:

$Fsch$  = valor de infiltração programada pelo usuário;

$AL$  = área efetiva de vazamento de ar que corresponde a uma diferença de pressão de 4 Pa ( $\text{cm}^2$ );

$Cs$  = coeficiente de infiltração induzida por diferença de temperatura ( $\text{L/s})^2/(\text{cm}^4 \cdot \text{K})$ ;

$\Delta T$  = diferença absoluta de temperatura entre o ar da zona e o ar externo;

$Cw$  = coeficiente de infiltração induzida pela velocidade do vento ( $\text{L/s})^2/[\text{cm}^4 \cdot (\text{m/s})^2]$ ;

$WS$  = velocidade do ar (m/s).

Em relação à infiltração por Coeficiente de Fluxo, a formulação do modelo também é retirada da ASHRAE *Handbook of Fundamentals* (2025) e é referida como o modelo aprimorado ou "AIM-2". A Equação 8 descreve sua formulação. O modelo coeficiente de fluxo, assim como o modelo de área de vazamento efetiva, também considera os vazamentos na estrutura do edifício, porém acrescenta áreas de espaços e locais utilizados pelos sistemas de ventilação.

$$\text{Infiltração} = (Fsch) \cdot \sqrt{(cCs\Delta T^n)^2 + (cCw(s \cdot WS)^{2n})^2}$$

## EQUAÇÃO 8

No qual:

$F_{sch}$  = valor de infiltração programada pelo usuário;

$c$  = coeficiente de fluxo ( $m^3/s \cdot Pa^n$ );

$C_s$  = coeficiente de infiltração induzida por diferença de temperatura ( $Pa/K$ )<sup>n</sup>;

$\Delta T$  = diferença absoluta de temperatura entre o ar da zona e o ar externo;

$n$  = expoente de pressão;

$C_w$  = coeficiente de infiltração induzida pela velocidade do vento ( $Pa \cdot s^2/m^2$ )<sup>n</sup>;

$WS$  = velocidade do ar (m/s).

O principal desafio ao utilizar esses modelos é garantir a obtenção de valores adequados para os diferentes coeficientes empregados. Idealmente, seria necessário conduzir uma análise detalhada da infiltração, seja experimentalmente, seja por meio de medições, para determinar um conjunto personalizado de coeficientes. Porém, na fase de projeto, esses coeficientes precisam ser determinados com precisão para garantir valores representativos nas simulações (Prignon; Van Moeseke, 2017).

Os coeficientes de estanqueidade ao ar ( $I_{design}$ , AL,  $c$ ) são frequentemente obtidos por meio do teste *blower door* e representam valores constantes que indicam a permeabilidade ao ar e variam conforme a construção da estrutura do edifício. Contudo, de maneira preditiva, esses coeficientes podem ser determinados por meio de literatura que aborde localizações, geometrias, técnicas ou materiais similares, ou utilizando de simulações CFD, análises de regressão em ferramentas estatísticas, redes neurais artificiais, ou usando fórmulas matemáticas simples ou planilhas de cálculo que multiplicam coeficientes baseados no tipo de construção, tipo de telhado e área da envoltória do edifício (Prignon; Van Moeseke, 2017).

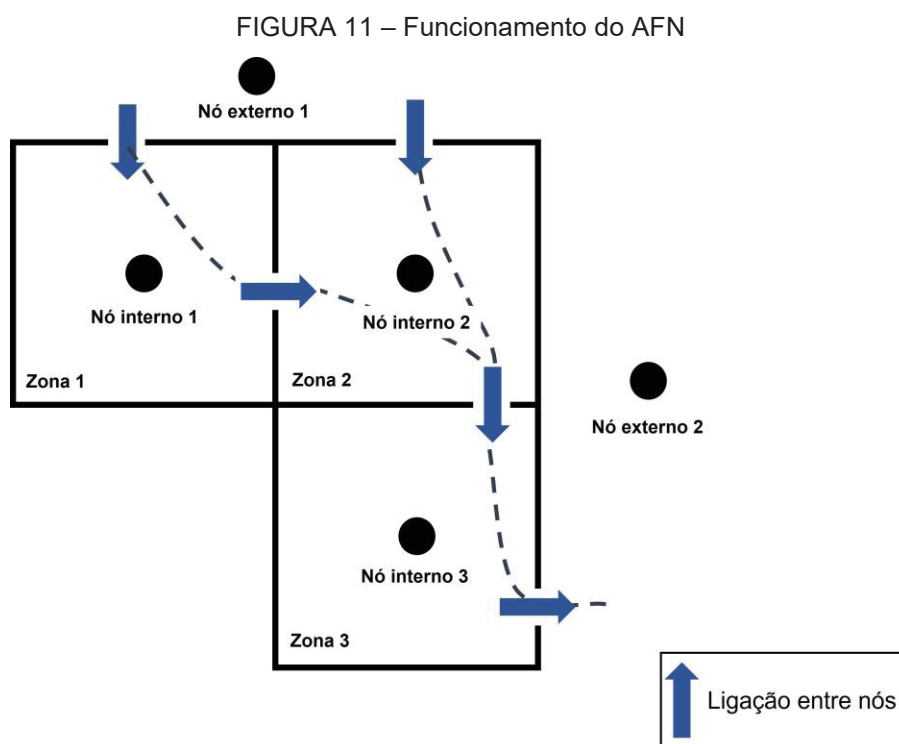
Os coeficientes de fatores ambientais podem ser obtidos diretamente na ferramenta de simulação ou constar em normas, como a ASHRAE *Handbook of Fundamentals* (2025). A classificação desses coeficientes é feita de acordo com o número de pavimentos, a presença ou ausência de subsolo e os espaços utilizados pelos sistemas de ventilação.

Os modelos de infiltração limitam-se ao estudo do fluxo de ar pela envoltória da edificação; entretanto, um estudo mais avançado pode ser realizado com o módulo *Airflow Network*.

### 2.6.1.1 Airflow Network (AFN)

O módulo AFN é desenvolvido para descrever o fluxo de ar de forma integrada e interdependente entre as zonas térmicas, a envoltória do edifício e os sistemas AVAC. Este modelo inclui a infiltração por meio da envoltória (janelas e rachaduras), o fluxo de ar entre zonas por meio dos componentes de fluxo (portas) e a relação do ar interno com os sistemas AVAC (Choi *et al.*, 2023).

O módulo é constituído por nós e por componentes que os conectam. O objetivo é modelar a circulação de ar dentro e através do edifício como uma rede de pontos interligados e de caminhos pelos quais o ar pode fluir. A Figura 11 apresenta o funcionamento do modelo de redes. Os nós representam pontos no espaço que são calculados com base nas propriedades do ar, como pressão e temperatura. Podem ser internos, correspondendo a pontos dentro das zonas do edifício, ou externos, correspondendo a pontos fora do edifício. Os elementos de ligação são os caminhos pelos quais o ar se move entre os nós, incluindo aberturas, janelas, portas, dutos, fissuras e ventiladores.



FONTE: Adaptado de DOE (2025b)

As pressões do vento nos nós externos do modelo de rede são conhecidas a priori e calculadas com base na velocidade do vento incidente, derivada do arquivo

climático da simulação e extrapolada de acordo com a altitude e o perfil do terreno. Com essas pressões externas estabelecidas, ao aplicar a interconexão entre nós do modelo, as pressões nos nós internos podem ser calculadas por meio da equação de balanço de massa. Dessa forma, ao conhecer as pressões em cada abertura da edificação, torna-se possível determinar o fluxo de ar por meio dela (Sorgato, 2009).

Modelos de rede de múltiplas zonas, como AFN, exigem grande quantidade de dados de entrada e, em muitos casos, são variáveis difíceis de obter. A principal dificuldade reside na estimativa precisa das características das vazões de ar por meio de aberturas e frestas, bem como na determinação do coeficiente de pressão do vento na edificação. A predição da ventilação, seja impulsionada pelo vento ou pela flutuabilidade térmica, é altamente sensível à geometria das aberturas que restringem o fluxo. Quando a área e o coeficiente de descarga dessas aberturas são bem conhecidos, a taxa de fluxo de ar pode ser modelada com precisão por meio deste modelo (Hult; Iaccarino; Fischer, 2012).

O coeficiente de descarga ( $C_d$ ) é um parâmetro utilizado para caracterizar o comportamento de fluidos que passam por uma abertura ou restrição e é definido como a razão entre o fluxo real de um fluido por essa abertura e o fluxo teórico ideal que ocorreria se não houvesse impedimentos, perdas de energia ou efeitos secundários. A Equação 9 exibe o cálculo da vazão por uma abertura e a relação matemática com o parâmetro  $C_d$ .

$$Q = C_d A \sqrt{\frac{2 \Delta P}{\rho}} \quad \text{EQUAÇÃO 9}$$

Sendo:

$Q$  = vazão através da abertura ( $\text{m}^3/\text{s}$ );

$C_d$  = coeficiente de descarga (-);

$A$  = área de abertura ( $\text{m}^2$ );

$\Delta P$  = diferença de pressão através da abertura (Pa);

$\rho$  = densidade do ar ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

O  $C_d$  pode ser determinado experimentalmente por ensaios de fluxo de ar (Fernandes *et al.*, 2020; Król *et al.*, 2023), computacionalmente por meio de simulações CFD, ou estimado por equações ou dados da literatura para aberturas

padronizadas. O número é adimensional e o valor de 0,6 é frequentemente utilizado na modelagem de aberturas retangulares (Arendt; Krzaczek; Tejchman, 2017; Hult; Iaccarino; Fischer, 2012).

A estimativa da ventilação no processo de modelagem também é impactada pelo fluxo de ar por meio das frestas, que pode ser calculado pela Equação 10. O coeficiente de fluxo ( $C_q$ ) tem um valor de 0,6 para uma ampla faixa de números de Reynolds, sendo assim, esse valor é geralmente assumido na ausência de dados mais precisos. O expoente depende das características do fluxo de ar e pode variar de 0,5 a 1,0. Um valor de 0,5 é característico de um fluxo turbulento, enquanto 1,0 corresponde a um fluxo laminar (Sorgato, 2009).

$$Q = C_q(\Delta P)^n \quad \text{EQUAÇÃO 10}$$

No qual:

$Q$  = vazão através da fresta ( $\text{m}^3/\text{s}$ );

$C_q$  = coeficiente de fluxo de massa de ar ( $\text{Kg}/\text{s.Pa}$ );

$\Delta P$  = diferença de pressão através da fresta (Pa);

$n$  = expoente do fluxo de ar.

Além disso, o módulo AFN, assim como outros modelos de rede, depende dos cálculos das pressões do ar ao redor do edifício ( $C_p$ ), o que influencia diretamente o fluxo de ar em seu interior. A Equação 11 descreve o cálculo do coeficiente de pressão para um ponto específico da edificação, que pode ser uma abertura ou a altura total da construção. Comumente, o valor de  $C_p$  utilizado como entrada em simulações computacionais é calculado como o valor médio ao longo de toda a fachada voltada para o fluxo de ar, ou seja, a média da superfície (Xie *et al.*, 2023).

$$C_p(z) = \frac{P_w(z)}{0,5 \rho U^2(z)} \quad \text{EQUAÇÃO 11}$$

Sendo:

$C_p(z)$  = coeficiente de pressão para cota  $z$ ;

$P_w(z)$  = pressão do vento medida na face do edifício na cota  $z$  (Pa);

$\rho$  = densidade do ar externo ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );

$U$  = velocidade do vento (m/s).

A obtenção de dados confiáveis de  $C_p$  para simulação é complexa devido aos vastos parâmetros que os influenciam, como a geometria do edifício, os elementos de sombreamento externo, o posicionamento de varandas, os edifícios adjacentes, entre outros. Além disso, variáveis ambientais, como a velocidade, a direção e a intensidade do vento, também o influenciam (Cóstola; Blocken; Hensen, 2009).

Os coeficientes de pressão do vento descrevem matematicamente como esses fatores influenciam a distribuição das pressões de ar ao redor do edifício. Esses dados, juntamente com os demais coeficientes necessários para a modelagem AFN, podem ser obtidos de fontes primárias ou secundárias. Fontes primárias incluem experimentos em escala real, testes em túnel de vento e simulações CFD específicas para o edifício em estudo. Esses métodos fornecem resultados mais realistas, mas podem ser caros e inacessíveis. As fontes secundárias, como bancos de dados e modelos analíticos, são mais acessíveis e amplamente utilizadas, porém apresentam maiores níveis de incerteza (Arendt; Krzaczek; Tejchman, 2017; Cóstola; Blocken; Hensen, 2009).

Liddament (1986, 1996) apresenta diferentes valores dos coeficientes de fluxo de ar por frestas e aberturas, incluindo valores do expoente  $n$ , além de coeficientes de pressão baseados em ensaios de túnel do vento e em dados compilados de diferentes publicações. Este guia tornou-se uma referência importante na área de ventilação, apresentando tabelas para edifícios de pequeno e grande porte (Cóstola; Blocken; Hensen, 2009). Ademais, existem outros métodos descritos para estudos com modelos de rede de múltiplas zonas, em que é possível encontrar valores de coeficientes tabelados utilizados no processo de modelagem, com base em critérios específicos, sendo uma opção para auxiliar simuladores (Orme; Leksmono, 2002).

Swami e Chandra (1988) propuseram equações específicas para edifícios de pequeno e grande porte, derivadas de uma análise de regressão que ajustou coeficientes de pressão do vento com base em estudos publicados anteriormente. A equação desenvolvida para edifícios de pequeno porte é um modelo analítico amplamente implementado em softwares de simulação energética, como o *EnergyPlus*. Esta equação é indicada principalmente para edificações retangulares cuja altura seja três vezes menor do que o menor lado da base. Além disso, o método demonstra maior eficácia para edifícios com proporção de profundidade para largura

igual a 1, especialmente na faixa de ângulos de incidência do vento entre 90° e 165° (Bre; Gimenez; Fachinotti, 2018).

Apesar de aumentar o nível de incerteza das simulações, os coeficientes selecionados a partir de fontes secundárias são amplamente utilizados em estudos que envolvem a avaliação da ventilação e de estratégias de redução do consumo de energia. As modelagens com estes dados permitem comparar diferentes cenários, mesmo que a precisão não seja absoluta, fornecendo uma base para a tomada de decisões, especialmente na fase de design.

Ramponi *et al.* (2014) investigaram os efeitos de fontes primárias e secundárias de Cps sobre o potencial de economia de energia da ventilação noturna de um edifício de escritórios em vários climas europeus. Um edifício de escritórios de seis andares foi adotado como estudo de caso e modelado no *EnergyPlus*. Os valores de Cp calculados no EnergyPlus, usando a fórmula de Swami e Chandra (1988), foram comparados com outros obtidos com o software CpGenerator e com CPCALC+, além de testes em túnel de vento. A análise revelou que diferentes fontes de Cp produzem variações nos dados de Cp e diferenças de até 15% nas taxas de ventilação noturna calculadas. O autor aponta diferenças nas análises em certas direções do vento, porém há concordância geral. Em termos de economia de energia, esse parâmetro foi mais impactante em climas frios, pois se observam maiores diferenças entre a temperatura externa e a temperatura interna. O estudo conclui que, para o edifício em questão, a escolha da fonte de Cp é menos crucial do que a de outros parâmetros de simulação, como o coeficiente de transferência de calor convectivo interno.

Vasaturo *et al.* (2024) compararam, para diferentes direções de vento, distribuições e valores médios dos Cp obtidos por meio de simulações CFD, banco de dados e experimentos em túnel de vento. Os Cps obtidos foram utilizados em simulações energéticas, e a diferença na demanda de energia para aquecimento e resfriamento foi quantificada para as zonas climáticas tropicais, secas/desérticas, temperadas e continentais. O edifício adotado caracteriza-se como isolado, ventilado naturalmente e de leves componentes construtivos. A base de dados utilizada para os coeficientes de pressão foi a de Liddament (1996), e os experimentos foram realizados em um modelo reduzido do edifício real (escala 1:40). Nas conclusões, os autores indicam que algumas simulações CFD superestimam os Cps nas fachadas laterais e de sota-vento, mas os valores concordam bem com os dados dos testes em túnel de vento. Eles também apontam que o impacto da fonte dos Cps é mais significativo em

locais de clima frio, onde a demanda anual de aquecimento predomina, devido à contribuição dos fluxos de ar decorrentes da fluatibilidade térmica entre as zonas internas e externas. Para a tipologia de edifício considerada, usar dados de  $C_p$  provenientes de bancos de dados (fonte secundária) é aceitável para prever a demanda de resfriamento em simulações quando há ventilação natural e uso de AFN.

Portanto, o AFN demonstra ser uma ferramenta eficaz para avaliar o fluxo de ar em edifícios e gerenciá-lo, de modo a compreender e avaliar o impacto de diferentes estratégias de ventilação.

## 2.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste referencial, foram discutidos estudos que abordam o controle da ventilação em diferentes modalidades, considerando parâmetros como a ocupação, a temperatura e a concentração de poluentes. Observou-se que, além do desafio inerente à formulação das lógicas de controle, o parâmetro taxa de ventilação influencia significativamente o comportamento térmico e energético do ambiente, com faixas críticas que alteram esse desempenho. Destacou-se, ainda, que a modelagem da ventilação em simulações energéticas de edifícios deve ser orientada pelos objetivos da análise e construída com base em modelos representativos, conforme as diretrizes da literatura, considerando as limitações computacionais. Esses aspectos fundamentam as escolhas metodológicas adotadas neste estudo.

### 3 MÉTODO

Este estudo insere-se no campo de pesquisa de simulação computacional aplicada ao desempenho térmico e energético de edificações. Para atingir o objetivo de pesquisa, o método empregado foi estruturado em quatro etapas. A primeira consiste na descrição climática e no estudo do potencial de ventilação das localidades selecionadas, considerando o modelo adaptativo de conforto térmico. Na segunda etapa, são descritas as características da edificação, incluindo a tipologia, o padrão de uso e as variações aplicadas nos componentes construtivos. As estratégias de condicionamento e os parâmetros utilizados no processo de modelagem são contemplados na terceira etapa. Por fim, a quarta etapa apresenta a análise de resultados, detalhando os índices utilizados para a avaliação de desempenho e os *outputs* solicitados para os cálculos.

O programa adotado para as simulações computacionais e a avaliação das condições modeladas foi o *EnergyPlus* versão 22.1.0 (DOE, 2025d), software amplamente reconhecido e utilizado para realizar análises termoenergéticas de edifícios. As configurações gerais e os algoritmos empregados nas simulações são apresentados na Tabela 3. O software calcula o consumo de energia e as cargas de aquecimento e resfriamento necessárias para o controle térmico de ambientes, possibilitando a avaliação do desempenho do edifício na fase inicial do projeto (Crawley *et al.*, 2008).

TABELA 3 - Algoritmos adotados nas simulações

Algoritmos	
Distribuição solar	<i>FullInteriorAndExteriorWithReflections</i>
Convecção das superfícies internas	<i>TARP</i>
Convecção das superfícies externas	<i>TARP</i>
Transferência de calor	<i>ConductionTransferFuction</i>
Timestep	12/h (a cada 5 minutos)

FONTE: O autor (2024).

### 3.1 DESCRIÇÃO CLIMÁTICA E POTENCIAL DE VENTILAÇÃO DAS LOCALIDADES

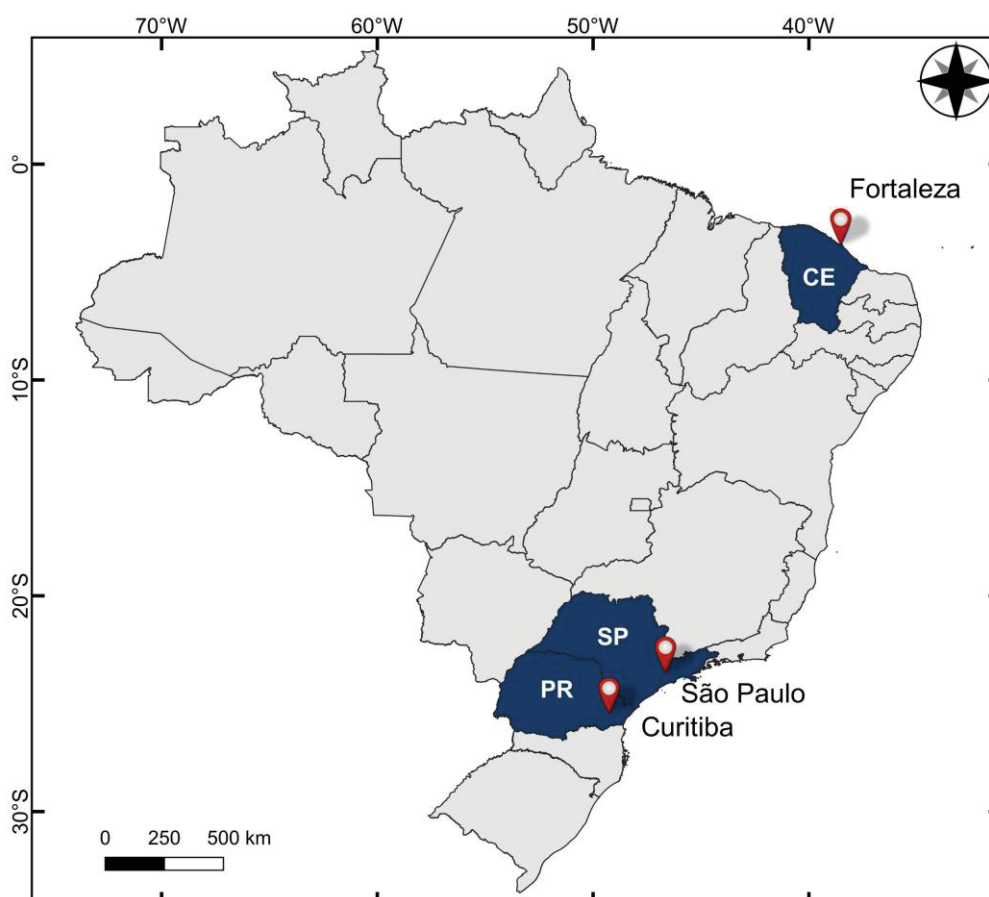
As localidades utilizadas neste estudo estão listadas na Tabela 4 e foram selecionadas por representarem distintas condições climáticas brasileiras. A Figura 12 apresenta o mapa de localização.

TABELA 4 - Localidades selecionadas

Localidades	Coordenadas	Classificação de Köppen
Fortaleza	03° 43' 02" S; 38° 32' 35" O	As
São Paulo	23° 32' 51" S; 46° 38' 10" O	Cfa
Curitiba	25° 25' 40" S; 49° 16' 23" O	Cfb

Fonte: O autor (2025).

FIGURA 12 - Localização das cidades selecionadas

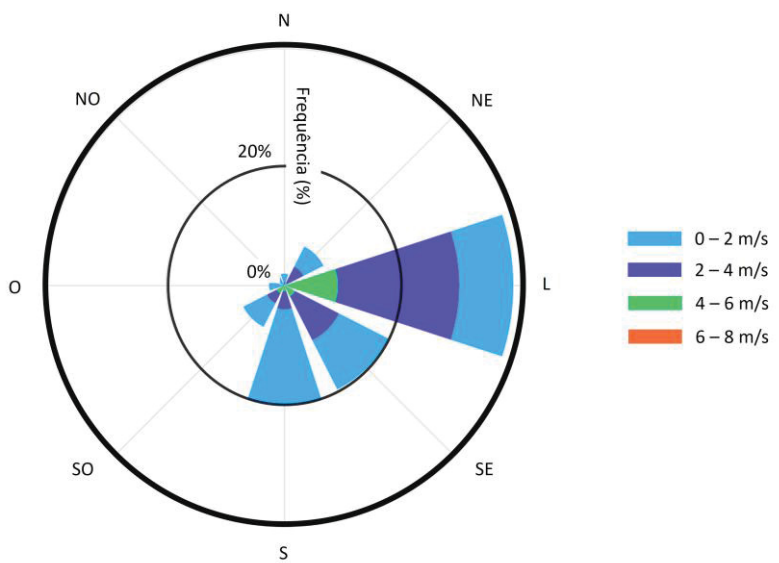
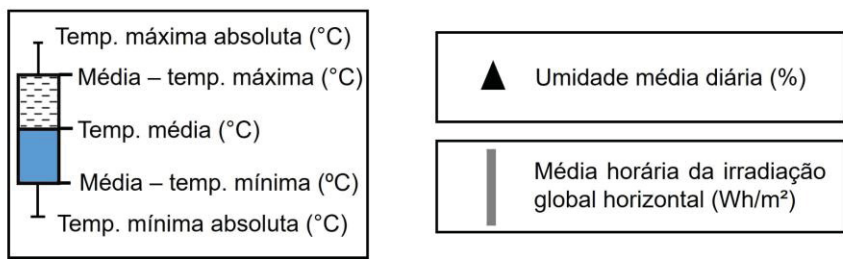
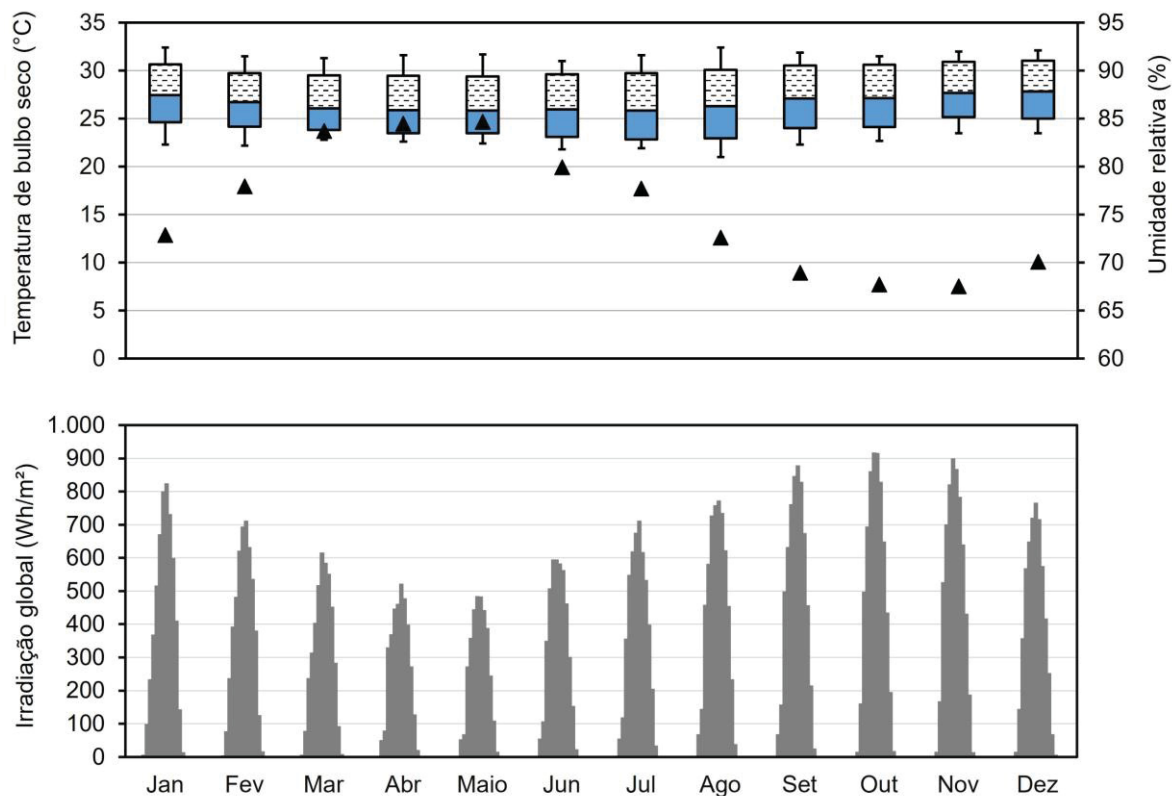


Fonte: O autor (2025).

Fortaleza, localizada no nordeste do Brasil, é classificada como de clima tropical de savana (As) segundo a classificação de Köppen. São Paulo, na região Sudeste, apresenta clima subtropical úmido (Cfa), e Curitiba, no sul do país, possui clima temperado oceânico (Cfb) (Peel; Finlayson; McMahon, 2007). De acordo com a NBR 15220-3 (2024), Fortaleza está situada na zona bioclimática 6A, caracterizada por condições muito quentes e úmidas; São Paulo pertence à zona 2M, definida como fria, com inverno moderado; e Curitiba enquadra-se na zona bioclimática 1M, marcada por clima muito frio, com inverno moderado.

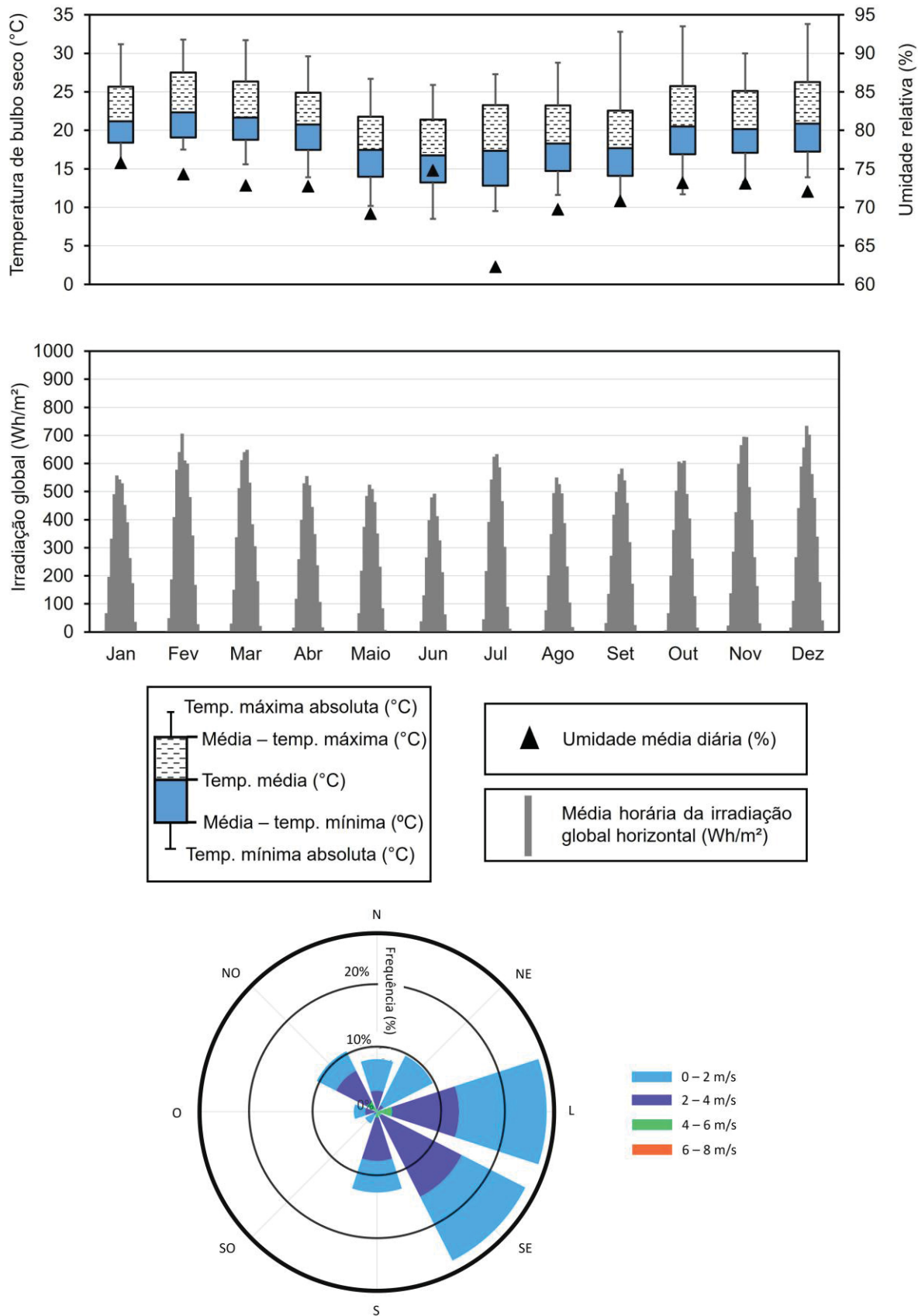
As Figuras 13, 14 e 15 apresentam os perfis climáticos de Fortaleza, São Paulo e Curitiba, respectivamente. Nelas, são exibidas a média mensal das temperaturas externas, considerando seus valores máximos, médios e mínimos diários, a umidade média relativa, a média horária de irradiação global horizontal e a rosa dos ventos. Os dados são oriundos do arquivo climático desenvolvido por estações climatológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) (CLIMATE ONE BUILDING, 2025).

FIGURA 13 – Perfil climático de Fortaleza: temperaturas, umidade, irradiação solar e ventos



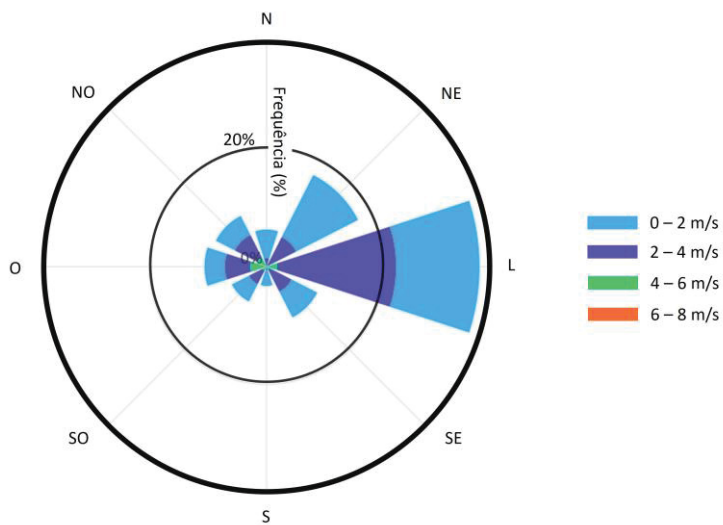
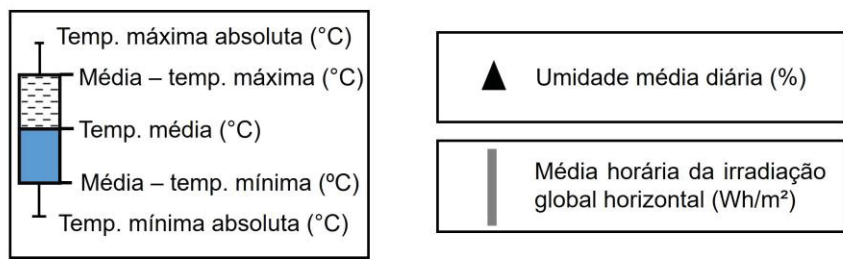
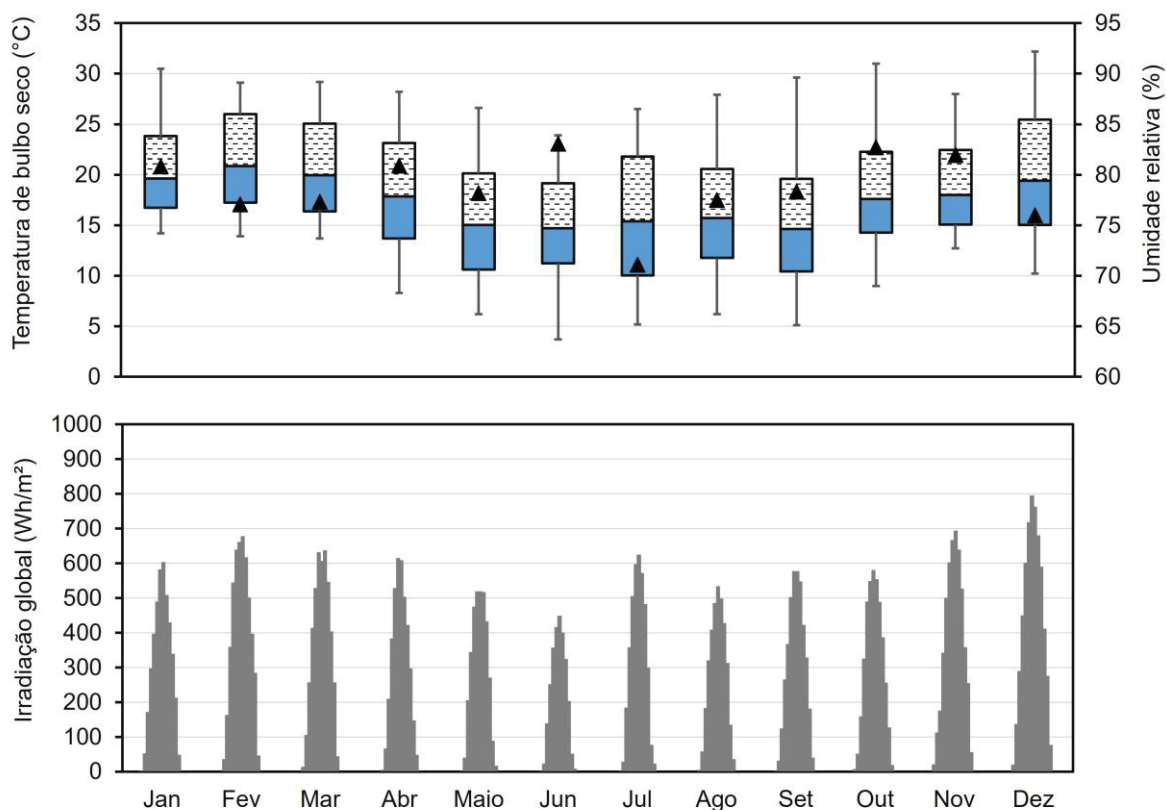
FONTE: O autor (2025) e PROJETEEE (2025).

FIGURA 14 - Perfil climático de São Paulo: temperaturas, umidade, irradiação solar e ventos



FONTE: O autor (2025) e PROJETEE (2025).

FIGURA 15 - Perfil climático de Curitiba: temperaturas, umidade, irradiação solar e ventos



FONTE: O autor (2025) e PROJETEEE (2025)

A temperatura média anual de Fortaleza é de 26,6 °C, com pouca variação sazonal. As médias mensais vão de 25,8 °C em maio a 27,8 °C em dezembro, resultando em uma amplitude térmica anual de apenas 2,0 °C. Fevereiro, durante a estação úmida, apresenta a maior variação média diária de temperatura, de 5,2 °C, enquanto setembro, na estação seca, registra a menor variação, de apenas 1,0 °C.

Os meses mais quentes (novembro e dezembro) apresentaram os menores percentuais de umidade. Maio, com as menores temperaturas médias, teve a maior umidade média relativa e as menores irradiações horárias. A amplitude anual da umidade média relativa foi de 17,1%. A partir de junho, a irradiação global aumenta gradualmente, atingindo o pico em outubro. As maiores médias horárias de irradiação ocorrem em setembro, outubro e novembro, enquanto os menores valores são registrados em março, abril e maio.

A rosa dos ventos para esta localidade demonstra que a direção com maiores incidências de ventos é a leste, chegando a atingir o ápice de velocidade entre 4 e 6 m/s com 8,9% de frequência, indicando que esta orientação é favorável para aproveitamento da VN. Ventos calmos predominam na direção sul e sudeste, com velocidades entre 0 e 2 m/s, com maior frequência.

O perfil climático de São Paulo revela condições mais variadas. A temperatura média anual é mais baixa, de 19,5 °C, e as médias mensais variam de 16,7 °C em junho a 22,3 °C em fevereiro. Isso resulta em uma amplitude térmica anual de 5,6 °C, aproximadamente três vezes maior do que a de Fortaleza. A maior amplitude térmica mensal ocorre em outubro, com 12,2 °C, e a menor em julho, com 6,5 °C.

A umidade média registra uma queda entre junho e julho, culminando na menor umidade relativa e na maior variação mensal do ano. Sua amplitude anual é de 13,49%. A maior umidade média, de 75,8%, foi observada em janeiro. A irradiação global apresenta variações sazonais mais suaves e de menor intensidade do que em Fortaleza; os meses com as maiores médias foram dezembro, novembro e fevereiro, respectivamente. Em contrapartida, junho, maio, agosto apresentaram as menores.

A distribuição dos ventos é mais diversificada do que em Fortaleza, com predominância das direções sudeste e leste. Os ventos do sudeste ocorrem com mais frequência entre 2 e 4 m/s, enquanto os do leste ocorrem com mais frequência entre 0 e 2 m/s.

Curitiba apresenta a menor temperatura média anual entre as localidades analisadas, de 17,4 °C. As médias mensais variam de 14,6 °C em setembro a 20,9 °C

em fevereiro, resultando em uma amplitude térmica anual de 6,3 °C, a maior do estudo. Outubro registra a maior amplitude térmica mensal, de 12 °C, enquanto fevereiro registra a menor, de 5,2 °C.

A umidade relativa atinge seu pico em junho, com média de 83,1%, e cai para o menor valor em julho, com 71,1%, configurando uma amplitude anual de 12,0%. Junho, o mês mais úmido, também apresenta as menores médias horárias de irradiação global horizontal. A maior incidência ocorre em dezembro.

Observa-se que a maior frequência dos ventos ocorre nas direções leste e nordeste. A direção leste apresenta a maior ocorrência de ventos com velocidades entre 2 e 4 m/s, porém também apresenta alta ocorrência de ventos mais calmos, de 0 a 2 m/s.

O potencial de ventilação natural dessas localidades foi avaliado com base no número de horas em que a temperatura do ar externo se encontra na faixa de conforto adaptativo com 80% de aceitabilidade, conforme definido pela norma ASHRAE Standard 55 (2023). As Figuras 16, 17 e 18 exibem as médias e as amplitudes diárias da temperatura de bulbo seco sob a zona de conforto térmico adaptativo para Fortaleza, São Paulo e Curitiba, respectivamente. O gráfico foi gerado utilizando dados de estações climatológicas do INMET, por meio da ferramenta CBE Clima Tool (Betti *et al.*, 2024).

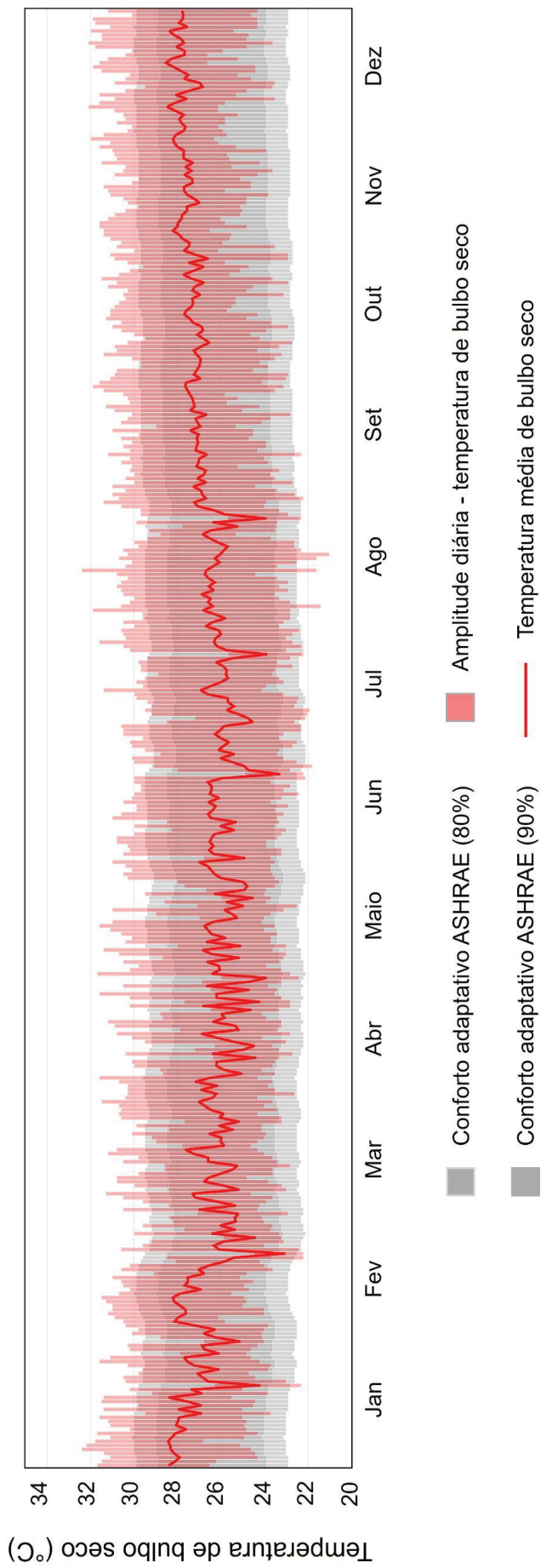
Fortaleza apresenta um potencial significativamente maior para ventilação natural, com 7.544 das 8.760 horas anuais dentro da faixa de conforto. No entanto, durante o horário comercial, esse valor cai para 3.561 horas. O desconforto por calor é mais expressivo, totalizando 1.181 horas anuais, concentradas no período comercial. Isso indica que, embora o clima tropical de Fortaleza favoreça a VN, pode ser necessário um maior funcionamento dos sistemas de ventilação mecânica para mitigar o desconforto por calor, especialmente em períodos de maior produção de cargas internas.

São Paulo registra apenas 2.856 horas anuais com o ar externo dentro da faixa de conforto, sendo 2.308 horas durante o horário comercial. A cidade enfrenta maior desconforto térmico por frio, com um total de 5.561 horas ao longo do ano, das quais 2.098 ocorrem durante o período comercial. O desconforto por calor é menos frequente, com 343 horas anuais, das quais 339 em horário comercial. Esses dados indicam a provável necessidade de aquecimento por sistemas ativos para garantir conforto térmico em ambientes internos.

Curitiba registra o menor número de horas com o ar externo dentro da faixa de conforto, totalizando apenas 2.110 horas anuais, das quais 1.924 ocorrem no horário comercial. O desconforto por frio é predominante, totalizando 6.474 horas ao longo do ano, das quais 2.645 em horário comercial. Já o desconforto por calor é pontual e ocorre exclusivamente no horário comercial, totalizando 176 horas.

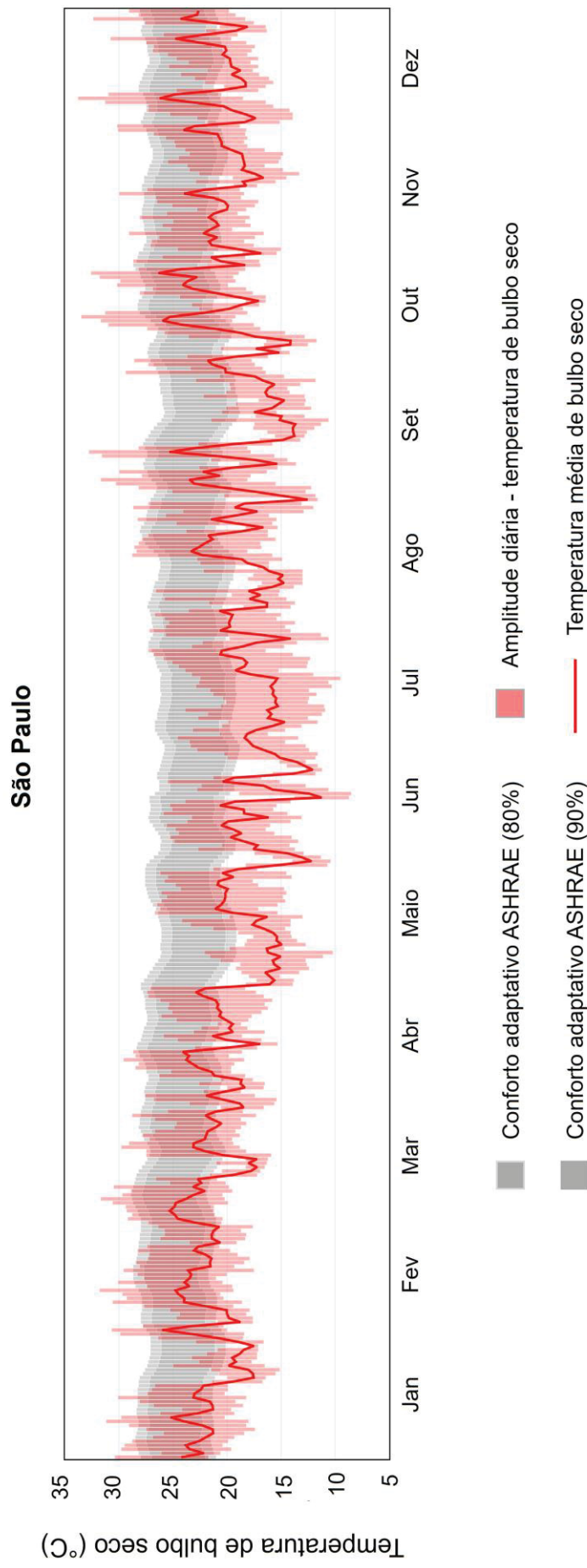
FIGURA 16 – Adequação da temperatura do ar externo à faixa de conforto térmico adaptativo em Fortaleza

### Fortaleza



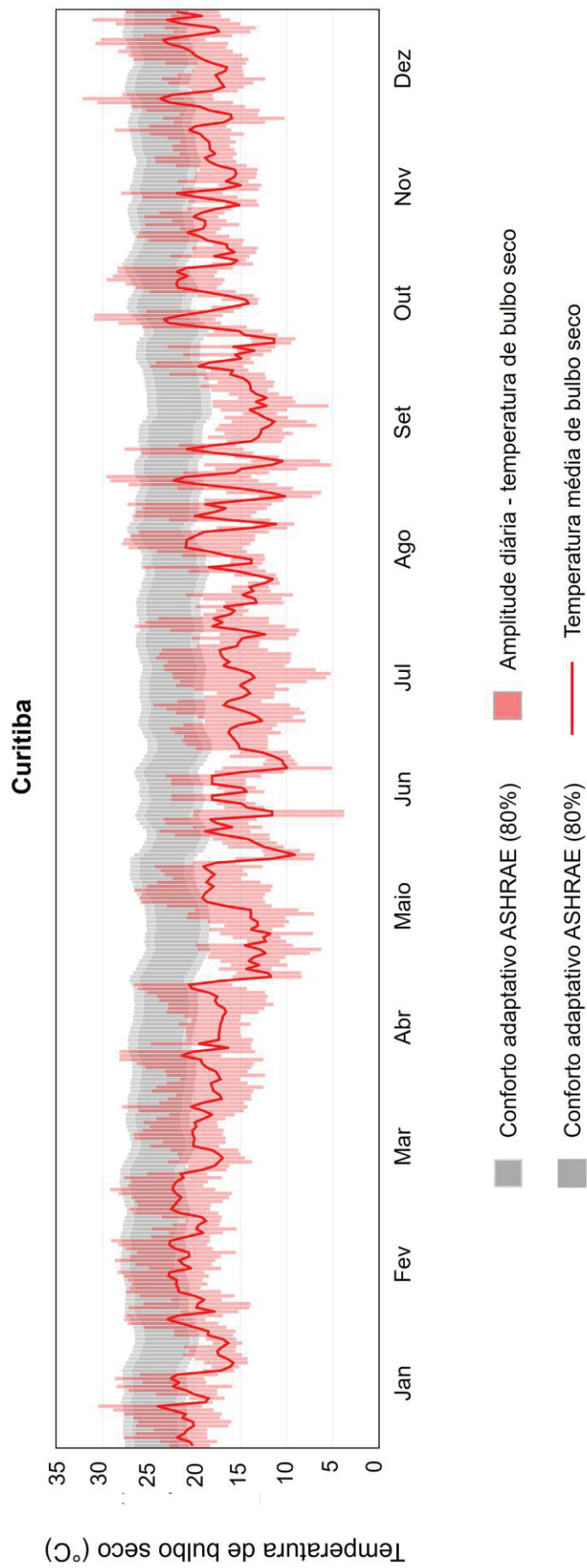
FONTE: Betti *et al.* (2024)

FIGURA 17 – Adequação da temperatura do ar externo à faixa de conforto térmico adaptativo em São Paulo



FONTE: Betti *et al.* (2024)

FIGURA 18 – Adequação da temperatura do ar externo à faixa de conforto térmico adaptativo em Curitiba



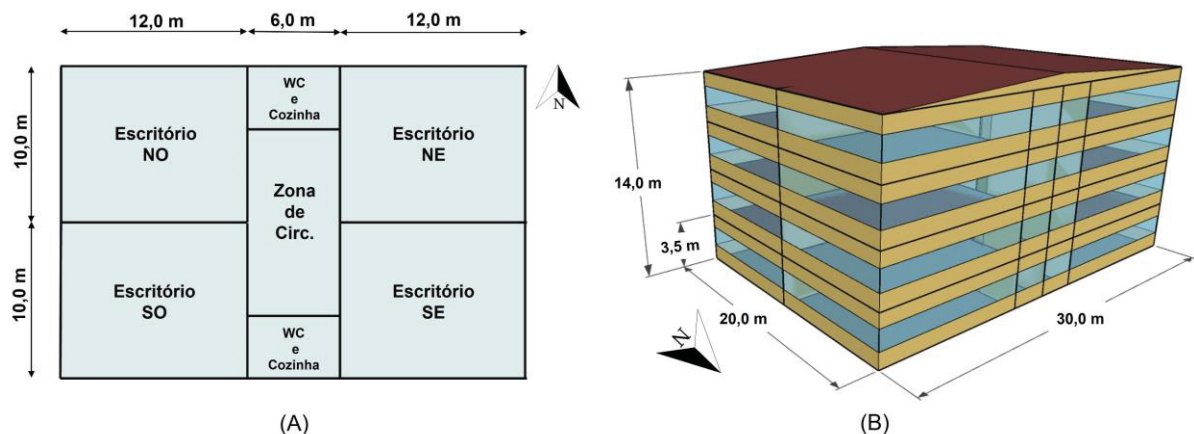
FONTE: Betti *et al.* (2024)

### 3.2 CARACTERÍSTICAS DA EDIFICAÇÃO

Neste tópico, são detalhados a tipologia, o padrão de uso e as variações aplicadas nos componentes construtivos da edificação. As condições de tipologia e padrão de uso foram mantidas constantes em todas as condições testadas neste estudo, com o objetivo de isolar o efeito das diferentes propriedades térmicas dos componentes construtivos sobre os indicadores de desempenho analisados.

O edifício escolhido pertence à categoria comercial de médio porte e foi selecionado com base em diversos projetos de escritórios no Brasil que apresentam características semelhantes (Sorgato; Schneider; Rütther, 2018). A Figura 19 apresenta o croqui da planta baixa e da volumetria da edificação. O edifício possui 4 pavimentos e área construída de 2.400 m<sup>2</sup>, com dimensões de 30 x 20 x 14 m.

FIGURA 19 – Planta baixa e modelo tridimensional da edificação



FONTE: O autor (2025).

O pavimento tipo é dividido em quatro escritórios, uma zona de circulação, dois WC e duas cozinhas. O WC e a cozinha foram modelados e agrupados em uma única zona térmica. As fachadas de cada zona possuem 40% da área correspondente à área de abertura (WWR). Para a avaliação do desempenho térmico da edificação, a análise direcionou-se às zonas térmicas correspondentes aos escritórios e a todo o pavimento tipo. A partir deste ponto, as zonas de escritório serão identificadas com base na orientação de suas fachadas, conforme a Figura 19.

### 3.2.1 Cargas internas

A densidade de ocupação adotada para os escritórios foi de 10 m<sup>2</sup> por pessoa. A taxa metabólica foi definida com base na ASHRAE Standard 55 (2023) para a atividade de digitação em ambiente de escritório, considerando uma densidade de 65 W/m<sup>2</sup>. Com uma área de superfície corporal estimada em 1,80 m<sup>2</sup>, obteve-se uma taxa metabólica de 117 W por pessoa.

A densidade de potência de iluminação (DPI) da edificação foi definida de acordo com o limite estabelecido para o nível A de eficiência energética, utilizando o método da área do edifício, conforme previsto na RTQ-C. O valor adotado foi de 9,5 W/m<sup>2</sup>.

A Tabela 5 apresenta a densidade de potência de equipamentos (DPE) adotada nas simulações. Como o padrão de operação desses equipamentos manteve-se constante entre os diferentes cenários simulados, sua contribuição para a carga interna e o consumo energético do pavimento tipo permaneceu o mesmo em todas as simulações.

Foi adotada uma carga de 120 W/pessoa para representar a potência de um desktop por estação de trabalho nos escritórios. Além disso, consideraram-se uma impressora e outros equipamentos de baixa demanda energética classificados como equipamentos de TI. Também foram incluídos na simulação equipamentos localizados fora das zonas de escritório, como refrigerador e micro-ondas. Todas as cargas térmicas foram consideradas 100% sensíveis, sendo distribuídas em 40% convectivas e 60% radiantes.

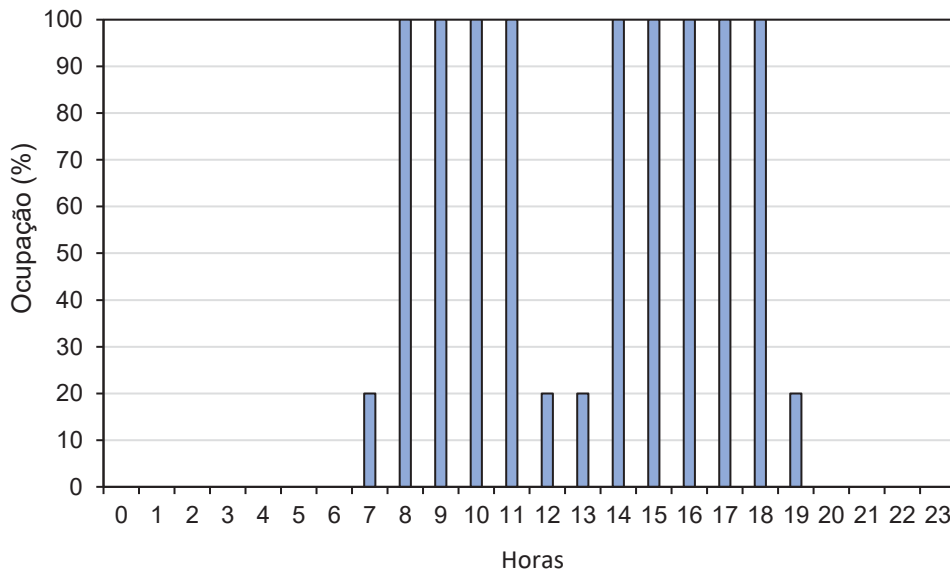
TABELA 5 - Equipamentos considerados nas simulações

<b>Equipamento</b>	<b>Potência</b>	<b>Zonas térmicas</b>
Computadores	120 W/pessoa	Escritórios
Impressora	310 W	Escritórios
TI	25 W	Escritórios
Refrigerador	120 W	Cozinha/WC
Microondas	1000 W	Cozinha/WC

FONTE: O autor (2025).

A Figura 20 ilustra o padrão de uso e ocupação de pessoas, de iluminação e de equipamentos adotado nos escritórios. Foram consideradas a ocupação máxima durante o período de horário comercial e a ocupação de 20% para os períodos de início, meio e fim de expediente.

FIGURA 20 – Padrão de uso e ocupação



FONTE: O autor (2025).

### 3.2.2 Componentes construtivos

Foram adotadas diferentes configurações de componentes construtivos com o objetivo de avaliar o impacto das propriedades térmicas no desempenho da edificação. As variações incluíram a adoção de diferentes composições para as paredes externas e para os elementos internos, como paredes internas, forro e piso.

A Tabela 6 apresenta as composições construtivas adotadas como envoltória. Para a cobertura, optou-se por uma composição de baixa transmitância térmica, a fim de reduzir a transferência de calor entre o ambiente externo e o interior da edificação por meio deste componente. Essa escolha visa minimizar a influência da cobertura no balanço térmico das zonas analisadas e garantir que os efeitos observados nas simulações estejam mais associados às variações dos demais componentes construtivos.

Para as paredes externas, adotaram-se três composições que consistem em blocos de concreto celular autoclavado revestidos com argamassa. Os blocos variam

de espessura para obter diferentes níveis de transmitância e de capacidade térmica. O objetivo é investigar o impacto da variação dessas propriedades no desempenho do edifício.

A transmitância, a capacidade e a resistência térmica foram calculadas de acordo com o método estabelecido pela NBR 15220-2 (2022). Para isso, captaram-se dados de densidade, calor específico e condutividade térmica dos materiais construtivos, conforme a NBR ISO 10456 (2022). Esta norma fornece valores típicos das propriedades higrotérmicas de produtos de construção. A absorptância da cobertura e das paredes foi definida em 0,4, o que representa superfícies de cor clara.

TABELA 6 – Envolvórias adotadas

Elemento	Composição	Material	$\lambda$ (W/mK)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	c (J/kgK)	Propriedades térmicas
Cobertura	Telha metálica (0,1 cm) + Poliestireno (4,0 cm) +	Metal	50	7.800	450	U= 0,61 W/m <sup>2</sup> K CT = 229 kJ/m <sup>2</sup> K
	Telha metálica (0,1 cm) + Câmara de ar (> 5,0 cm) +	Poliestireno	0,034	38	1.420	
	Laje de concreto maciço (10 cm)	Concreto	2,5	2.400	1.000	
Parede externa 1	Argamassa externa (2,5 cm) +	Argamassa	1,0	1.800	1.000	U = 1,69 W/m <sup>2</sup> K CT = 130,22 kJ/m <sup>2</sup> K
	Bloco CCA (60x30x7,5 cm) +	CCA	0,17	500	1.000	
	Argamassa interna (2,5 cm)					
Parede externa 2	Argamassa externa (2,5 cm) +	Argamassa	1,0	1.800	1.000	U = 1,39 W/m <sup>2</sup> K CT = 143,32 kJ/m <sup>2</sup> K
	Bloco CCA (60x30x10 cm) +	CCA	0,17	500	1.000	
	Argamassa interna (2,5 cm)					
Parede externa 3	Argamassa externa (2,5 cm) +	Argamassa	1,0	1.800	1.000	U = 1,04 W/m <sup>2</sup> K CT = 169,42 kJ/m <sup>2</sup> K
	Bloco CCA (60x30x15 cm) +	CCA	0,17	500	1.000	
	Argamassa interna (2,5 cm)					

FONTE: O autor (2025).

Para os elementos internos (paredes internas, forro e piso), foram adotadas composições abrangendo desde materiais leves, com baixa capacidade térmica, a materiais pesados, com elevada capacidade térmica, conforme apresentado na Tabela 7. As paredes internas foram modeladas em três configurações distintas: 1) divisória de gesso acartonado *drywall*, 2) alvenaria de blocos cerâmicos revestida com argamassa e 3) concreto maciço sem revestimento. Para o forro, foram considerados dois cenários: a) forro de gesso e b) laje de concreto maciço exposta ao ambiente de

escritório. Quanto ao piso, foram utilizados dois acabamentos: revestimento laminado de madeira e cerâmico.

TABELA 7 – Componentes construtivos adotados para os elementos internos

Elemento	Composição	Material	$\lambda$ (W/mK)	P (kg/m <sup>3</sup> )	C (J/kgK)	Propriedades térmicas
Parede interna 1	Placa de gesso (1,25 cm) + Câmara de ar (> 2 cm) + Placa de gesso (1,25 cm)	Placa de gesso	0,25	900	1.000	R= 0,43 m <sup>2</sup> K/W CT= 19,6 kJ/m <sup>2</sup> K
Parede interna 2	Argamassa (2,5 cm) + Bloco cerâmico (9x14x24 cm) + Argamassa (2,5 cm)	Argamassa	1,0	1.800	1.000	R= 0,44 m <sup>2</sup> K/W CT= 150,0 kJ/m <sup>2</sup> K
		Bloco cerâmico	0,9	1.600	920	
Parede interna 3	Concreto maciço (10 cm)	Concreto	2,3	2.300	1.000	R= 0,21 m <sup>2</sup> K/W CT = 240,0 kJ/m <sup>2</sup> K
Forro 1	Gesso (1,25 cm)	Gesso	0,21	700	1.000	R= 0,44 m <sup>2</sup> K/W CT = 8,75 kJ/m <sup>2</sup> K
Forro 2	Concreto maciço (15 cm)	Concreto	2,5	2.400	1.000	R= 0,27 m <sup>2</sup> K/W CT = 360,0 kJ/m <sup>2</sup> K
Piso 1	Laminado (1,0 cm) + EPS (2 cm) + Contrapiso (2 cm)	Madeira laminada	0,07	250	1.700	R= 0,85 W/m <sup>2</sup> K CT = 4,68 kJ/m <sup>2</sup> K
		Poliestireno	0,034	38	1.420	
Piso 2	Cerâmico (1,0 cm) + EPS (2 cm) + Contrapiso (2 cm)	Cerâmica	0,7	1.600	920	R = 0,72 m <sup>2</sup> K/W CT = 18,83 kJ/m <sup>2</sup> K
		Cimento	0,8	1.800	1.000	

FONTE: O autor (2025).

Adicionalmente, foram realizados cálculos para quantificar a capacidade térmica da zona térmica com base nos materiais dos seus elementos internos. A Equação 12 apresenta o cálculo da Capacidade Térmica Efetiva (CTE) do ambiente, obtida pelo somatório do produto da área de cada elemento interno e da fração de sua massa térmica que contribui termicamente para o ambiente, considerada 50% da capacidade térmica total do componente construtivo. Em seguida, a Equação 13 define a Capacidade Térmica Média (CTM), calculada pela razão entre a CTE e a soma das áreas das superfícies dos elementos internos. Essa análise considera exclusivamente os componentes construtivos internos, desconsiderando os elementos da envoltória.

$$CTe = \sum (A \times MTi) \quad \text{EQUAÇÃO 12}$$

Sendo:

Cte = capacidade térmica efetiva (kJ/m<sup>2</sup>K);

A = área de superfície do elemento interno (m<sup>2</sup>);

MTi = massa térmica interna do elemento (kJ/m<sup>2</sup>K).

$$CTm = \frac{CTe}{\sum A} \quad \text{EQUAÇÃO 13}$$

Sendo:

CTm = capacidade térmica média do ambiente (kJ/m<sup>2</sup>K);

CTe = capacidade térmica efetiva (kJ/m<sup>2</sup>K);

$\sum A$  = somatório das áreas superficiais dos elementos internos (m<sup>2</sup>).

Essa abordagem possibilita a ordenação das 12 configurações distintas resultantes da combinação entre os componentes construtivos internos, permitindo a avaliação de ambientes com diferentes níveis de capacidade térmica, de construções leves a pesadas, conforme apresentado na Tabela 8. Esses componentes internos (CI) foram combinados com os tipos de paredes externas utilizados, resultando em um total de 36 cenários construtivos.

TABELA 8 - Composições do ambiente interno

CI	Composição dos elementos internos			CTE (kJ/K)	CTM (kJ/m <sup>2</sup> .K)
	Paredes internas	Piso	Forro		
1	1	1	1	1.560,40	4,92
2	1	2	1	2.409,40	7,60
3	2	1	1	6.580,80	20,76
4	2	2	1	7.429,80	23,44
5	3	1	1	10.045,80	31,69
6	3	2	1	10.894,80	34,37
7	1	1	2	22.635,40	71,41
8	1	2	2	23.484,40	74,08
9	2	1	2	27.655,80	87,24
10	2	2	2	28.504,80	89,92
11	3	1	2	31.120,80	98,17
12	3	2	2	31.969,80	100,85

FONTE: O autor (2025).

As janelas são compostas por dois painéis de vidro; suas propriedades estão dispostas na Tabela 9. Os painéis são separados por uma camada de ar de espessura padrão (12,7 mm). O painel externo consiste no produto SunGuard® HP Neutral 55, de 8 mm de espessura; o painel interno é comum, incolor, de 4 mm de espessura.

TABELA 9 – Propriedades dos vidros adotados

Vidro		Interno	Externo	Sistema
Fabricante		GUARDIAN	GUARDIAN	GUARDIAN
Modelo		Clear glass	SunGuard® HP Neutral 55	Vidro duplo
Espessura (mm)		4	8	24,7
Transmitância (%)		90,2	54	54
Luz visível	Refletância externa (%)	8,5	22	24,6
	Refletância interna (%)	8,5	17	15,7
Transmitância (%)		85,8	36	36,5
Energia solar	Refletância externa (%)	8,0	31	28,5
	Refletância interna (%)	8,0	25	29
Fator solar		0,873	0,44	0,40
Transmitância térmica (W/m²K)		5,8	5,67	1,6
Característica		Simplex incolor	Laminado incolor	Insulado

FONTE: GUARDIAN GLASS ANALYTICS (2025)

### 3.3 ESTRATÉGIAS DE CONDICIONAMENTO

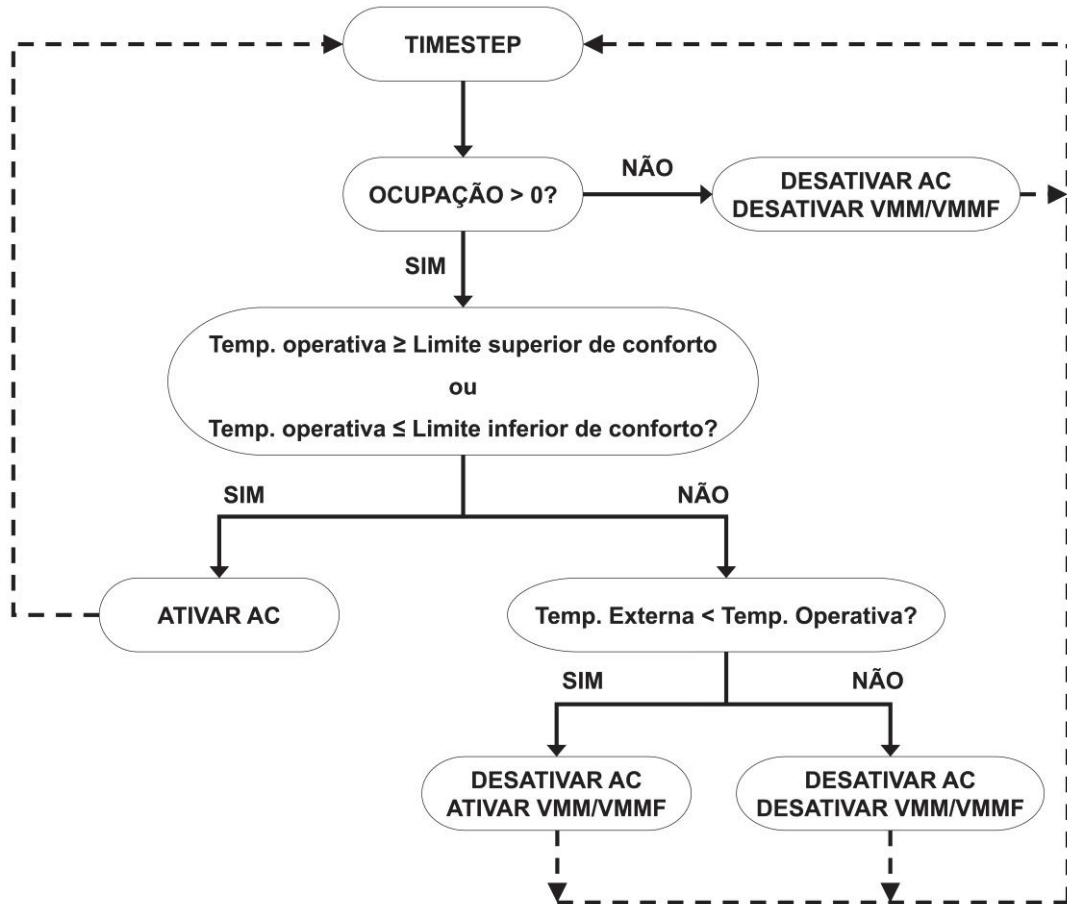
Serão simuladas diferentes estratégias de condicionamento para os escritórios da edificação: (i) ventilação exclusivamente mecânica por sistema AC; (ii) ventilação de modo misto (VMM); e (iii) ventilação de modo misto por *fans* (VMMF).

A condição VMMF consiste no insuflamento de ar externo diretamente no ambiente, a taxas predeterminadas, alternando com o sistema AC. Esse método permite o controle da taxa de ventilação e independe da geometria das aberturas, da operação destas e da disponibilidade de ventos externos para a introdução do ar. A condição VMM é semelhante à VMMF, porém, a ventilação natural ocorre por meio da abertura automática das janelas em 50% de sua área, permitindo a entrada de ar conforme a geometria do edifício e as condições climáticas locais. O cenário de uso

exclusivo de condicionamento mecânico representa a realidade de diversos edifícios no Brasil e consiste no uso de um sistema AC para controlar a temperatura do ar interno, independentemente das condições climáticas externas. Nessa condição, o sistema AC é utilizado durante todas as horas de ocupação e desativado ao término do expediente, permanecendo desativado até o próximo dia de ocupação (Ciappina; Urbano; Giglio, 2021).

A Figura 21 apresenta a lógica de controle implementada para as duas estratégias de condicionamento misto (VMM e VMMF). O objetivo é permitir a ventilação passiva durante os períodos de ocupação, desde que a temperatura operativa permaneça dentro da faixa de conforto e a temperatura externa seja inferior à temperatura operativa do ambiente. Caso o ambiente esteja ocupado e as condições de conforto não sejam atendidas, o sistema AC será acionado e permanecerá em operação até o final do período de ocupação, a fim de garantir a regulação térmica adequada. Os limites de temperatura operativa foram definidos de acordo com o modelo de conforto térmico adaptativo da ASHRAE Standard 55 (2023) para 80% de aceitabilidade.

FIGURA 21 – Lógica de controle de condicionamento misto (VMM e VMMF)



FONTE: O autor (2025).

A Tabela 10 exhibe as taxas de ventilação adotadas neste estudo, cada uma correspondente a um cenário de simulação de VMMF distinto. Em cada simulação, a taxa de ventilação permaneceu fixa ao longo de todo o período analisado, sem variação desse parâmetro no mesmo cenário. Esse método visa investigar se o controle da taxa de ventilação sob condições naturais pode resultar em maior eficiência energética, quando comparado à ventilação dependente das condições de vento (VMM).

TABELA 10 - Taxas de renovações de ar simuladas para a VMMF

Taxas de renovações de ar adotadas
2,5 ACH
5,0 ACH
10,0 ACH

FONTE: O autor (2025).

No modo VMMF, cada escritório é equipado com ventiladores capazes de introduzir ar externo no ambiente. O módulo *ZoneVentilation:DesignFlowRate* permite o controle do fluxo de ar intencional proveniente do ambiente externo, direcionado diretamente para a zona térmica. O método de cálculo da taxa de fluxo adotado foi *AirChanges/hour*.

A VN foi modelada utilizando o *Airflow Network*, o qual emprega algoritmos *AIRNET*. A Tabela 11 apresenta os coeficientes adotados no modelo.

TABELA 11 - Coeficientes adotados na simulação da VN

Parâmetros	Valores
Coeficiente de pressão	Equações de Swami e Chandra (1988)
Coeficiente de descarga	0,60
Coeficiente de fluxo de ar através de frestas	0,001
Expoente de fluxo de ar através de frestas	0,65
Coeficiente de rugosidade do entorno	0,33

FONTE: O autor (2024).

O coeficiente de pressão inserido no módulo foi calculado internamente pelo *software* com base nas equações de Swami e Chandra (1988), adequadas para edifícios retangulares. O coeficiente de descarga é empregado para determinar as trocas de ar decorrentes de diferenças de temperatura, sendo seu valor influenciado pela geometria da abertura. Foi adotado o coeficiente de 0,60, adequado e comumente utilizado para janelas de formato retangular (Aynsley, 1999). O coeficiente de rugosidade do entorno do edifício foi estabelecido em 0,33, valor típico para edifícios em centros urbanos, em que 50% das edificações são maiores que 21 metros (ASHRAE, 2025).

O sistema AC modelado consiste em *um Packaged Terminal Heat Pump (PTHP)*, comumente utilizado para reproduzir o desempenho de aparelhos AC do modelo *Split*. A Tabela 12 exhibe os parâmetros inseridos na modelagem do sistema. A taxa de fluxo de ar adotada é a mínima indicada pela ANVISA (2003) para ambientes climatizados.

TABELA 12 - Parâmetros adotados na modelagem do sistema AC

Parâmetro	Valor
Taxa de fluxo de ar	27 m <sup>3</sup> /h/pessoa
Modo de operação do ventilador	Contínuo
Eficiência do ventilador	0,7
Pressão do ventilador	75 (Pa)
Capacidade de refrigeração	Auto dimensionamento
Capacidade de aquecimento	Auto dimensionamento
COP de Refrigeração	3,5 W/W
COP de Aquecimento	3,5 W/W

FONTE: O autor (2024).

As mesmas propriedades foram adotadas para o AC, independentemente do uso como sistema de ventilação exclusivo ou como condicionamento misto (VMM ou VMMF). Conforme discutido na seção 2.2, o modelo de conforto adaptativo não se adequa a ambientes condicionados mecanicamente. Assim, os setpoints foram fixados em 24 °C para o resfriamento e em 21 °C para o aquecimento, conforme Sorgato, Schneider e Rüter (2018).

O controle e a integração dos diferentes sistemas de ventilação foram realizados por meio da ferramenta EMS, que permite a escrita de algoritmos avançados diretamente no arquivo de simulação. O EMS proporciona controle de alto nível que lê dados de saída e de modelagem em intervalos pré-definidos e, com base nesses dados, executa comandos definidos no algoritmo. Durante a execução da simulação, o EnergyPlus interpreta e executa o código escrito na *EnergyPlus Runtime Language* (Erl), linguagem de programação própria do EnergyPlus (DOE, 2025b, 2025a).

### 3.4 ANÁLISE DE RESULTADOS

A escolha do método e dos indicadores para a avaliação do desempenho térmico de um edifício é importante para a tomada de decisões durante a fase de projeto. Métodos e indicadores mal selecionados podem levar a avaliações imprecisas e, conseqüentemente, a decisões que comprometem a eficiência, a sustentabilidade e a funcionalidade do edifício (Mendes *et al.*, 2024).

A análise dos resultados considerou os seguintes indicadores de desempenho: consumo energético, percentual de horas em conforto térmico por condicionamento natural (PHFT), percentual de uso do sistema AC e taxa média de renovação de ar por hora. Esses indicadores foram calculados para o pavimento tipo e, individualmente, para cada zona de escritório.

O cálculo do consumo de energia elétrica engloba a iluminação, os equipamentos e o sistema AC, conforme Equação 14.

$$C = C_{ac} + C_i + C_e \quad \text{EQUAÇÃO 14}$$

No qual:

$C$  = consumo (kWh);

$C_{ac}$  = consumo de eletricidade do sistema AC (kWh);

$C_i$  = consumo de eletricidade do sistema de iluminação (kWh);

$C_e$  = consumo de eletricidade dos equipamentos (kWh).

O consumo de energia do equipamento que proporciona a VMMF não foi considerado neste estudo. O consumo de energia foi restrito ao sistema AC. O foco da análise está no impacto da taxa de ventilação no desempenho térmico e na redução da demanda por climatização ativa. Assume-se, portanto, que o custo energético dos sistemas de insuflamento é desprezível em relação ao do sistema de climatização mecânica. Este pressuposto permite isolar o efeito do controle da estratégia de ventilação sobre a carga térmica e, conseqüentemente, sobre o consumo de AC.

O PHFT corresponde ao percentual de horas ocupadas em que a temperatura operativa se mantém dentro dos limites de conforto sem a atuação do sistema ativo de climatização ao longo do ano, conforme cálculo descrito na Equação 15. De forma análoga, o percentual de uso do AC é obtido identificando as horas de ocupação em que o sistema permaneceu em operação, conforme descrito na Equação 16. Assim, para períodos ocupados, o PHFT e o percentual de uso do AC são complementares e totalizam 100% quando somados.

$$PHFT = \frac{\sum TO_{op}}{\sum TO} \times 100 \quad \text{EQUAÇÃO 15}$$

No qual:

PHFT = percentual de horas de conforto (adimensional);

$\sum TO_{op}$  = número de *timesteps* ocupados em que a temperatura operativa está dentro da faixa de conforto ao longo do ano;

$\sum TO_n$  = número de *timesteps* ocupados ao longo do ano

$$Uso\ de\ AC = \frac{\sum TO_{ac}}{\sum TO} \times 100 \quad \text{EQUAÇÃO 16}$$

No qual:

Uso de AC = percentual de horas em que sistema AC esteve ativo (adimensional);

$\sum TO_{op}$  = número de *timesteps* ocupados com sistema AC ativo;

$\sum TO_n$  = número de *timesteps* ocupados ao longo do ano.

A Equação 17 exhibe o cálculo da média da taxa de renovação de ar. O índice foi obtido a partir dos valores de renovação de ar fornecidos pela simulação a cada *timestep*. Para cada cenário, os valores de taxa de renovação foram somados e divididos pelo número total de *timesteps* em que a ventilação esteve ativa, resultando na média anual. Esse procedimento tem como objetivo determinar a taxa média anual de renovação de ar permitida pelo controle e, por meio da comparação entre os diferentes cenários, fornecer evidências sobre a influência da taxa de ventilação no desempenho térmico da edificação.

$$ACH\ médio = \frac{\sum ACH_{inst}}{\sum T_{ativo}} \quad \text{EQUAÇÃO 17}$$

No qual:

ACH médio = média anual da taxa de renovação de ar (ACH);

$\sum ACH_{inst}$  = ACH no *timestep* em que a ventilação esteve ativa;

$\sum TO_n$  = número de *timesteps* em que a ventilação esteve ativa ao longo do ano.

Para obter os dados necessários para o cálculo dos indicadores, será necessário extrair as seguintes informações dos modelos:

1. Consumo de energia elétrica do sistema mecânico AC no cenário de uso exclusivo;
2. Consumo de energia elétrica do sistema mecânico AC no cenário VMM;
3. Identificação das taxas de ventilação e do número de *timesteps* de operação de ventilação passiva (VMM e VMMF);
4. Número de *timesteps* em que os escritórios estão sob ocupação;
5. Número de *timesteps* em que os escritórios estão ocupados e com temperatura operativa dentro da faixa de conforto, sem uso de sistema ativo (AC).

Após a obtenção destes *outputs* e o cálculo dos indicadores de desempenho, será realizada a comparação entre os diferentes cenários simulados, considerando as variações nos componentes construtivos, nas estratégias de condicionamento e nas localidades analisadas.

As composições construtivas adotadas resultam em 36 combinações, variando a massa térmica de leve a pesada. São aplicadas três estratégias de condicionamento: uso exclusivo de ventilação mecânica (AC), VMM e VMMF. No cenário VMMF, são testadas três taxas de ventilação: 2,5 ACH, 5 ACH e 10 ACH. Além disso, são consideradas 3 localidades distintas para as simulações. Portanto, o estudo abrangerá 540 cenários distintos de desempenho.

Os resultados da pesquisa serão apresentados por meio da análise descritiva das simulações e da análise comparativa dos indicadores de desempenho entre os diferentes cenários, incluindo diferenças percentuais, estudos de correlação, regressão e análise de variância. Essa abordagem permite compreender os processos físicos que diferenciam os cenários e identificar comportamentos de desempenho nos diferentes contextos da edificação, oferecendo subsídios para projetistas na tomada de decisões voltadas a estratégias de *retrofitings*.

## 4 RESULTADOS

Esta seção está organizada de acordo com as estratégias de condicionamento simuladas. Para cada estratégia, apresentam-se os indicadores de desempenho de todas as combinações de componentes construtivos. Os resultados são comparados entre as localidades selecionadas.

### 4.1 ESTRATÉGIA DE VENTILAÇÃO EXCLUSIVAMENTE MECÂNICA

Esta seção apresenta e discute os indicadores de desempenho calculados para a estratégia de uso exclusivo de AC. O controle caracteriza-se pelo acionamento do sistema AC em todos os momentos de ocupação ao longo do ano.

A Tabela 13 apresenta as combinações de componentes construtivos que resultaram nos maiores e menores consumos sob essa estratégia de condicionamento.

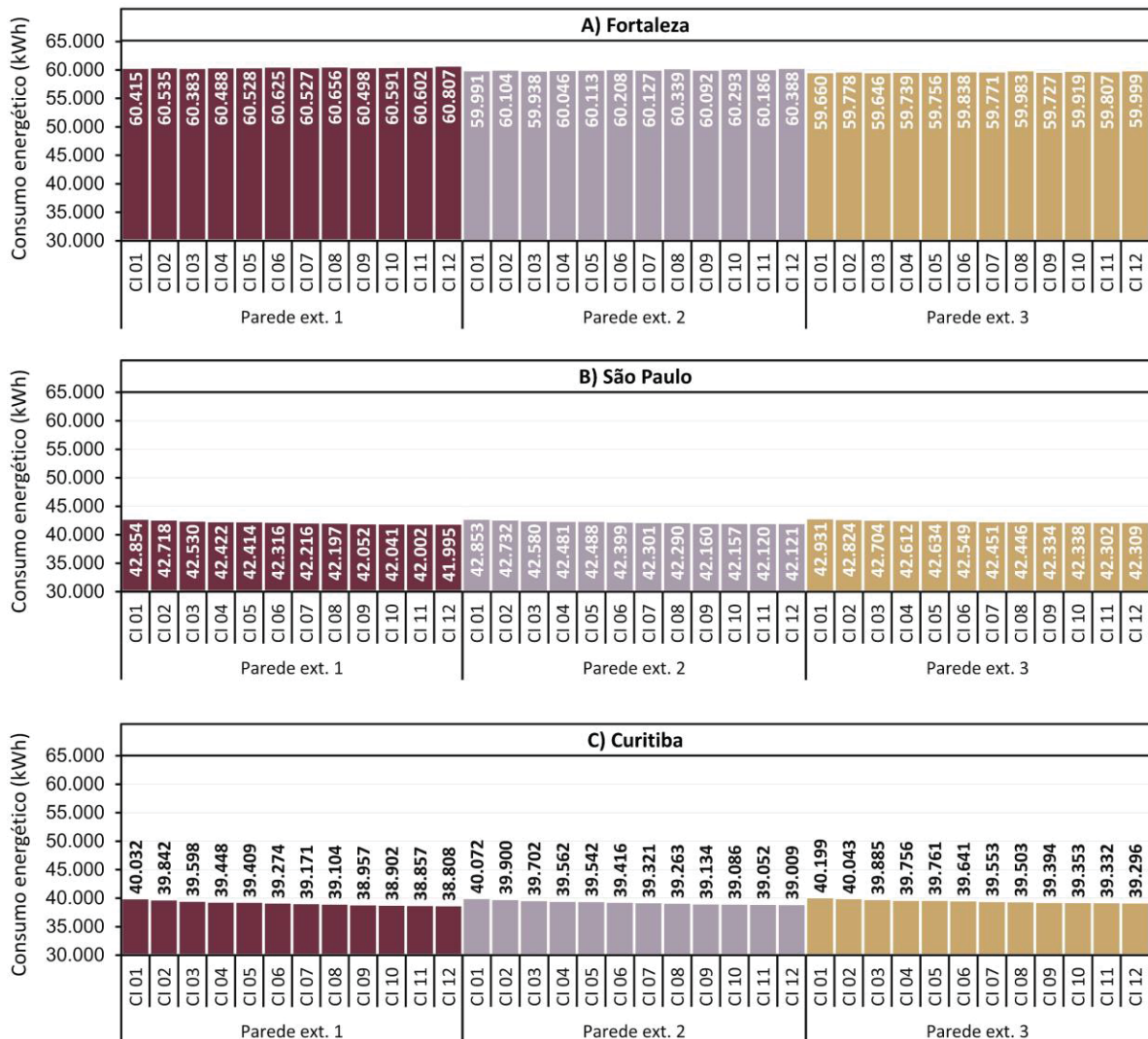
TABELA 13 - Casos de maior e de menor consumo sob estratégia de condicionamento por AC

<b>A) Fortaleza</b>					
Combinações com maior consumo			Combinações com menor consumo		
Parede ext.	CI	Cons. (kWh)	Parede ext.	CI	Cons. (kWh)
1	12	60,806.55	3	3	59,646.07
1	08	60,655.93	3	1	59,659.57
1	06	60,625.16	3	9	59,726.81
<b>B) São Paulo</b>					
Combinações com maior consumo			Combinações com menor consumo		
Parede ext.	CI	Cons. (kWh)	Parede ext.	CI	Cons. (kWh)
3	1	42,930.53	1	12	41,995.37
1	1	42,853,54	1	11	42,001.53
2	1	42,852.61	1	10	42,040.81
<b>C) Curitiba</b>					
Combinações com maior consumo			Combinações com menor consumo		
Parede ext.	CI	Cons. (kWh)	Parede ext.	CI	Cons. (kWh)
3	1	40,198.85	1	12	38,808.34
2	1	40,072.21	1	11	38,856.64
3	2	40,042.67	1	10	38,902.42

FONTE: O autor (2025).

A Figura 22 exibe os resultados de consumo de energia de todos os casos simulados, incluindo iluminação, equipamentos e sistema AC. Como os perfis de uso e ocupação de iluminação e equipamentos são idênticos entre os casos, as variações observadas decorrem exclusivamente do consumo do sistema AC do pavimento tipo.

FIGURA 22 – Consumo por combinações de componentes sob a estratégia de ar-condicionado



FONTE: O autor (2025).

Em Fortaleza (Tabela 13A), o cenário de maior consumo de energia envolveu os componentes internos (CI) 12, combinados à envoltória de maior transmitância térmica, a parede externa 1. O CI 12 é composto pelos elementos internos mais pesados, formados por materiais com alta capacidade térmica. Em contraste, o CI 03 apresentou o menor consumo de energia quando combinado à parede externa 3.

Assim, a maior redução obtida por meio da alteração dos componentes construtivos foi de apenas 1,91%.

Isso indica que, neste clima, as combinações compostas por CIs com baixa massa térmica, associadas a envoltórias com baixa transmitância térmica, apresentam desempenho energético superior sob esta estratégia de condicionamento. A envoltória com menor transmitância térmica contribui para reduzir a transferência de calor para o interior da edificação, enquanto os componentes internos com menor capacidade térmica armazenam menos calor. Como consequência, a demanda de energia do sistema AC é reduzida.

Além disso, nesta localidade, a parede externa 1 (Figura 22A) apresentou os maiores valores de consumo entre todas as combinações testadas. Isso indica que a transmitância térmica da envoltória teve maior influência sobre o consumo energético do que a massa térmica interna dos escritórios. Essa relação fica evidente ao observar que, mesmo com as paredes externas 2 e 3 associadas a CIs de maior capacidade térmica, essas combinações consumiram menos energia do que CIs de menor capacidade térmica acoplados à parede externa 1. Como exemplo, o CI 12, combinado com a parede externa 2, apresentou consumo inferior ao dos CIs 04 e 02, ambos associados à parede externa 1.

A parede externa 3 (Figura 22A) apresentou o menor consumo entre todos os CIs analisados nesta estratégia de condicionamento. Considerando as diferentes combinações de massa térmica dos elementos internos, a maior redução no consumo anual de energia para essa envoltória foi de apenas 0,59%. Reduções superiores foram observadas nas paredes externas 1 e 2, que atingiram 0,70% e 0,74%, respectivamente. Isso sugere que envoltórias com alta transmitância térmica possuem maior potencial de economia de energia diante de mudanças nas condições de massa térmica interna.

A análise também revela que a substituição de elementos pesados por leves na construção do forro ou do piso resulta, de forma consistente, na redução do consumo de energia do sistema AVAC. Esse efeito torna-se ainda mais evidente quando ambos os componentes são alterados simultaneamente, como observado nas comparações entre os casos CI 12 e CI 05, CI 10 e CI 03, e CI 08 e CI 01. Além disso, ao analisar o impacto da substituição das paredes internas de concreto por cerâmica, observa-se que essa modificação reduziu o consumo energético em todos os cenários desta localidade.

No entanto, a troca de paredes cerâmicas por drywall (CI 03 para CI 01, CI 04 para CI 02, CI 09 para CI 07, CI 10 para CI 08) levou a um aumento no consumo de energia, o que representa uma exceção à tendência geral, já que o drywall possui menor capacidade térmica. Esse resultado sugere que, embora a menor massa térmica interna esteja, em geral, associada à redução da demanda energética, isso não implica, necessariamente, menor consumo em todos os cenários. Por exemplo, o CI 08 apresentou maior consumo do que o CI 10, e o CI 01 consumiu mais energia do que o CI 03, independentemente da parede externa considerada.

Em São Paulo e Curitiba (Tabela 13B e Tabela 13C), a combinação que resultou no maior consumo foi CI 01, composta pelos elementos construtivos mais leves, associada à parede externa 3. Em contraste, o menor consumo foi observado para a combinação CI 12 com a parede externa 1. Esse comportamento contrasta com o observado em Fortaleza, indicando que, nessas localidades, há maior benefício no uso de componentes internos mais pesados e de envoltórias com maior transmitância térmica. A maior redução obtida por meio das alterações nos componentes construtivos foi de 2,18% em São Paulo e de 3,46% em Curitiba.

Conforme discutido no estudo sobre o potencial de VN nas localidades selecionadas para este estudo, Curitiba apresenta demanda significativa por aquecimento ao longo do ano. Envoltórias com alta transmitância térmica absorvem calor do ambiente externo durante o dia. Quando essas envoltórias são combinadas com CIs compostos por elementos de alta massa térmica, esse calor é armazenado e posteriormente liberado, contribuindo para reduzir a demanda de aquecimento do sistema de climatização.

O impacto da transmitância térmica das paredes externas sobre a demanda energética parece ser menos significativo para estas localidades quando comparado a Fortaleza. Observa-se que, tanto em São Paulo quanto em Curitiba, os resultados de consumo energético estão mais distribuídos entre diferentes combinações de CIs e paredes externas. Já em Fortaleza, há um padrão mais concentrado: os maiores consumos ocorrem constantemente associados à parede externa 1, enquanto os menores estão associados à parede externa 3. Isso indica que, em climas como os de São Paulo e Curitiba, a massa térmica interna dos componentes parece ter um impacto mais determinante no consumo de energia nessa estratégia de condicionamento do que em Fortaleza.

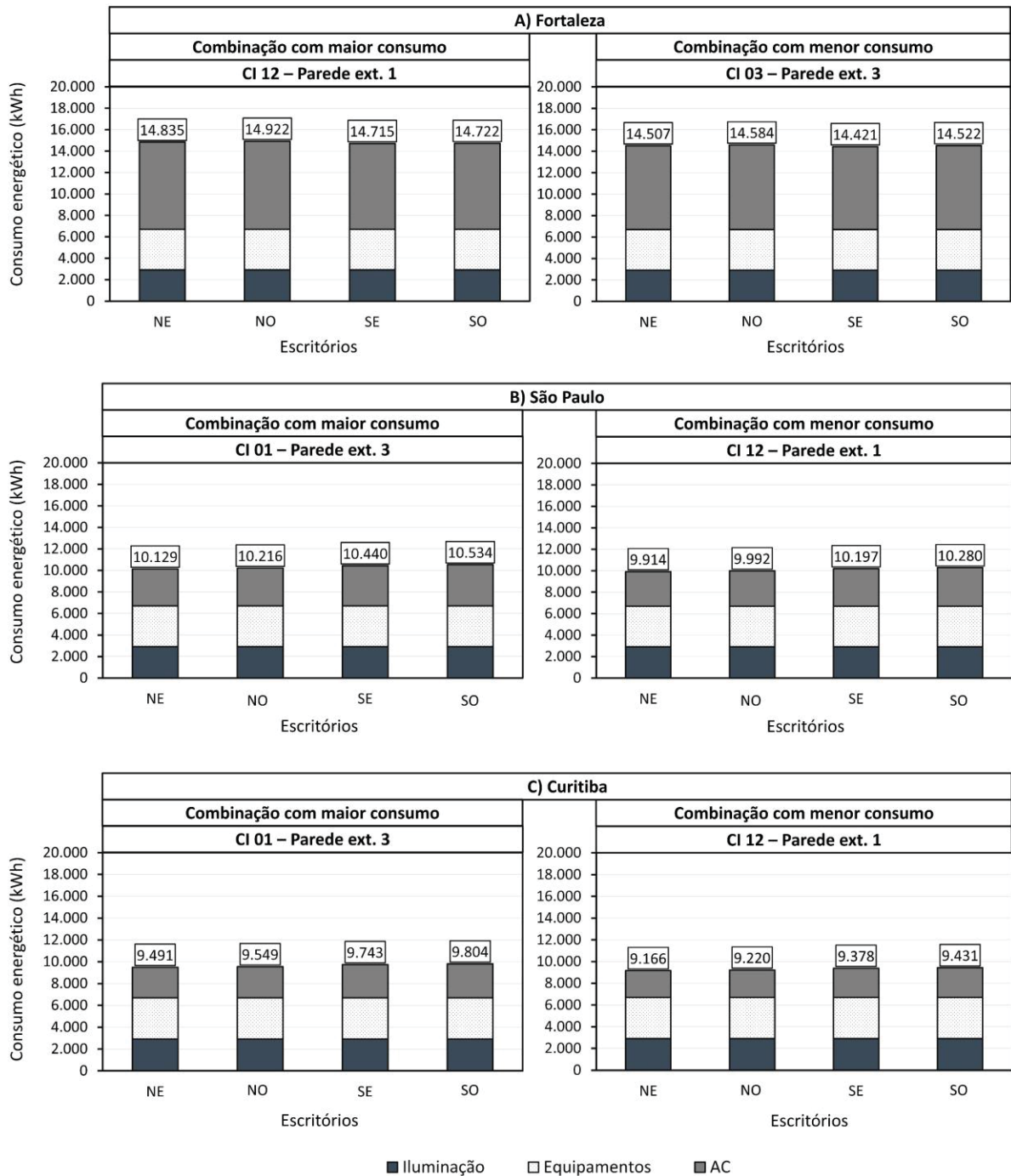
Assim como em Fortaleza, a parede externa 3 apresentou o menor potencial de redução do consumo de energia entre as diferentes combinações de CIs, com redução máxima de 1,46% em São Paulo e de 2,25% em Curitiba. Já as paredes externas 1 e 2 atingiram reduções de 2,00% e 1,71%, respectivamente, em São Paulo, e de 3,06% e 2,65% em Curitiba. Esses valores são superiores aos observados no clima de Fortaleza, indicando que, especialmente em Curitiba, há maior potencial de redução da demanda energética por meio da variação dos componentes internos do edifício independentemente da parede externa utilizada como envoltória.

Em São Paulo, a substituição de componentes leves por pesados resultou, de modo geral, na redução do consumo de energia, com exceção das transições dos CIs 11 para 12 nas paredes externas 2 e 3 e dos CIs 09 para 10 na parede externa 3. Essas exceções indicam um limite potencial a partir do qual o aumento da massa térmica passa a impactar negativamente o desempenho energético. Esses CIs incorporam o forro 2, um elemento construtivo pesado, em conjunto com as paredes externas e internas mais pesadas (2 e 3). Assim, a adição de mais um componente pesado (piso 2) pode ter ultrapassado o limite de massa térmica, resultando em aumento da demanda energética.

De forma geral, esse limite não foi identificado em Curitiba, na qual a redução da massa térmica interna resultou consistentemente na diminuição do consumo de energia. A única exceção foi observada na transição do CI 04 para o CI 05, no caso da parede externa 3. Ainda assim, o comportamento predominante indica que, nessa localidade, a diminuição da massa térmica interna tende a favorecer o desempenho energético.

A Figura 23 apresenta os padrões de consumo de energia dos escritórios para as combinações que resultaram nas maiores e menores demandas das localidades. Em Fortaleza (Figura 23A), os escritórios com aberturas voltadas para o norte e oeste (NO) apresentaram maior consumo de energia devido à maior incidência de radiação solar, enquanto os orientados para o sul e leste (SE) registraram menor consumo. A orientação resultou em uma redução máxima de apenas 1,39% no consumo para essa localidade.

FIGURA 23 - Consumo por escritório para condicionamento por AC



FONTE: O autor (2025).

Em São Paulo e Curitiba, os escritórios voltados para sudoeste (SO) foram os que mais consumiram energia, enquanto os voltados para nordeste (NE) apresentaram os menores consumos em ambos os cenários. A orientação dos escritórios apresentou maior potencial de redução de consumo em São Paulo (Figura 23B), com 3,84% no cenário de maior demanda e 3,56% no de menor demanda. Em

Curitiba (Figura 23C), as reduções máximas no consumo por mudança de orientação foram de 3,19% no caso de maior consumo e de 2,81% no de menor consumo.

#### 4.2 ESTRATÉGIA DE VENTILAÇÃO DE MODO MISTO POR VENTILAÇÃO NATURAL (VMM)

Esta seção apresenta os índices calculados para a estratégia VMM, que consiste no condicionamento misto que alterna entre os sistemas AC e VN por meio das aberturas das janelas. O controle é descrito no tópico 3.3 deste estudo.

A Tabela 14 apresenta as combinações que resultaram nos maiores e menores consumos. Em todas as localidades, os maiores consumos estão associados à parede externa 1, que apresenta a maior transmitância térmica. Os CIs com menor capacidade térmica (1 e 2) apresentaram as maiores demandas energéticas, evidenciando que a baixa massa térmica interna aumenta a dependência do sistema AC nesta estratégia de condicionamento.

TABELA 14 - Casos de maior e menor consumo sob estratégia de condicionamento misto (VMM)

<b>A) Fortaleza</b>					
Combinações com maior consumo			Combinações com menor consumo		
Parede ext.	CI	Cons. (kWh)	Parede ext.	CI	Cons. (kWh)
1	1	61.411,55	3	11	58.883,86
2	1	61.248,02	3	9	58.975,66
3	1	60.996,74	2	11	59.016,90
<b>B) São Paulo</b>					
Combinações com maior consumo			Combinações com menor consumo		
Parede ext.	CI	Cons. (kWh)	Parede ext.	CI	Cons. (kWh)
1	1	40.227,78	3	12	35.038,63
2	1	39.657,43	2	12	35.306,45
1	2	39.578,52	3	11	35.339,30
<b>C) Curitiba</b>					
Combinações com maior consumo			Combinações com menor consumo		
Parede ext.	CI	Cons. (kWh)	Parede ext.	CI	Cons. (kWh)
1	1	39.076,56	3	12	34.265,40
2	1	38.682,06	2	12	34.475,81
1	2	38.495,11	3	10	34.633,77

FONTE: O autor (2025).

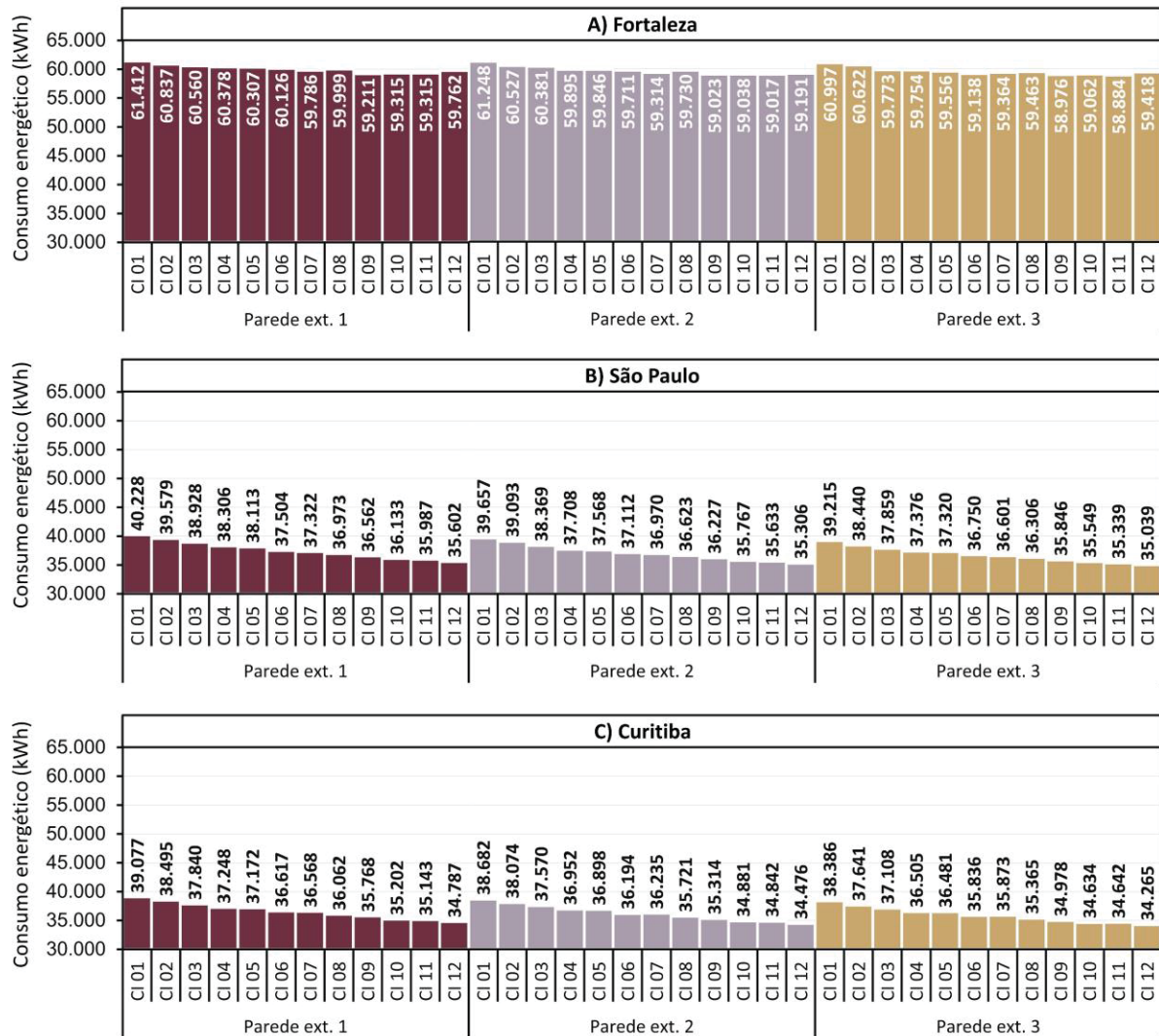
Por outro lado, os menores consumos foram obtidos com as paredes externas 2 e 3, que apresentam menor transmitância térmica, associada aos CIs com maior capacidade térmica (9, 10, 11 e 12). A diferença de consumo entre os cenários extremos foi mais expressiva em São Paulo (Tabela 14B), com uma redução de 12,90% no consumo decorrente da variação dos componentes construtivos, aproximadamente 10% superior à variação observada na estratégia de condicionamento por AC. Curitiba apresentou comportamento semelhante (Tabela 14C), com uma redução de 12,31% entre os cenários de maior e menor consumo nesta estratégia, o que representa cerca de 9% a mais do que a variação registrada na estratégia AC. Já em Fortaleza (Tabela 14A), essa redução foi de apenas 4,11%, cerca de 2,21% acima da observada na estratégia AC. Esses resultados indicam que, em climas mais amenos, a variação nos componentes construtivos pode aumentar significativamente a eficácia da VMM em níveis superiores aos do condicionamento por AC. Em contraste, no clima quente e úmido, esse benefício foi consideravelmente mais limitado.

A Figura 24 exhibe o consumo de energia em todos os cenários simulados sob a estratégia VMM. É possível notar que a VMM apresenta um comportamento distinto do condicionamento por AC no clima de Fortaleza quanto aos componentes construtivos, promovendo maior eficiência energética quando há maior massa térmica. No entanto, os componentes internos com a maior capacidade térmica (CI 12) não apresentaram a menor demanda energética, o que sugere a existência de um limite a partir do qual os benefícios da massa térmica deixam de ser significativos. Nesta localidade (Figura 24A), o aumento da massa térmica contribui para a redução do consumo até certo ponto, a partir do qual acréscimos adicionais não resultam em reduções consistentes, como observado a partir do CI 07 para as paredes externas 1 e 2 e no CI 06 para a parede externa 3.

Isso ocorre porque, com baixa massa térmica interna, o calor é rapidamente transferido para o ar do ambiente interno, provocando variações mais dinâmicas na temperatura operativa e, conseqüentemente, a ativação mais frequente do sistema AC. À medida que a massa térmica aumenta, a capacidade do edifício de armazenar calor também cresce, atenuando as variações de temperatura e reduzindo a necessidade de acionamento do AC. O calor armazenado é liberado de forma gradual e removido por meio da VN ou do sistema de climatização, quando em funcionamento. No entanto, a partir de determinado ponto, a massa térmica torna-se excessiva,

resultando no acúmulo de calor em demasia. Esse calor não é efetivamente removido pela VN e precisa ser removido pelo sistema AC, o que demanda maior consumo de energia.

FIGURA 24 - Consumo por combinações de componentes sob condicionamento misto (VMM)

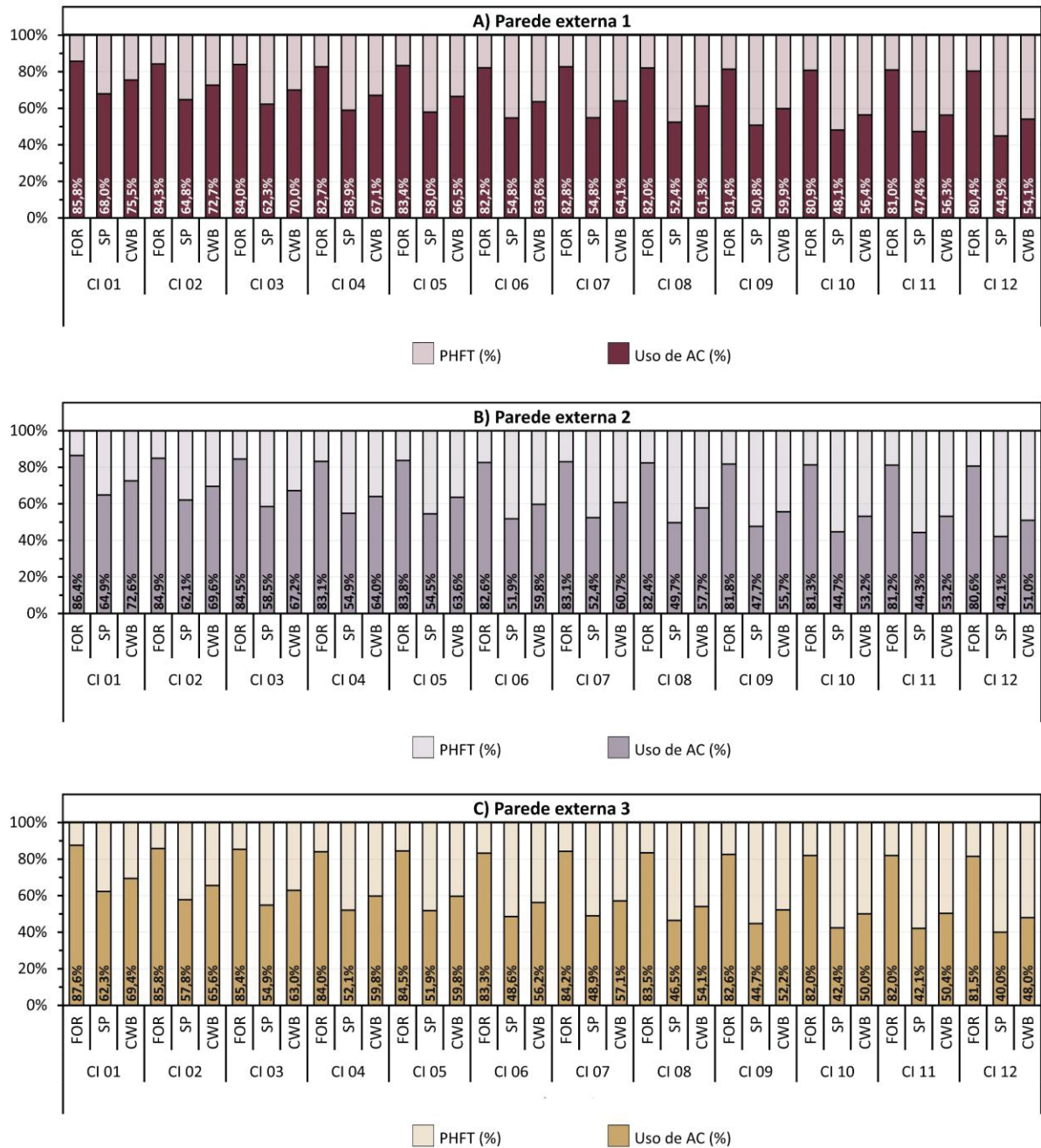


FONTE: O autor (2025).

Esse comportamento pode ser observado por meio da PHFT e do uso do sistema AC nos casos simulados apresentados na Figura 25. Em Fortaleza, o CI 12 foi o que demandou o menor percentual de operação de AC no ano e atingiu os maiores valores de PHFT para todas as paredes externas. Isso reforça que maior massa térmica contribui para ampliar os períodos de conforto por VN, ao absorver e retardar o impacto do calor na temperatura operativa. No entanto, essa combinação de componentes internos não resultou no menor consumo de energia (Figura 24A), indicando que a carga térmica acumulada foi superior à capacidade de remoção pela

VN, exigindo compensação pelo sistema de AC e, conseqüentemente, aumentando seu consumo.

FIGURA 25 - PHFT e uso de sistema AC sob a estratégia de condicionamento misto (VMM)



FONTE: O autor (2025).

Além disso, nesta localidade, a parede externa 1 (Figura 25A) utilizou a VN por períodos mais longos, conforme evidenciado pelo maior PHFT em comparação com as demais paredes externas. Ainda assim, foi a envoltória que apresentou o maior

consumo energético (Figura 24A). Isso indica que, embora o sistema AC tenha sido acionado com menor frequência, quando esteve em funcionamento, exigiu mais energia devido à maior quantidade de calor a ser removido dos componentes construtivos.

Esse padrão observado em Fortaleza não se repete em São Paulo. Nessa localidade, o aumento da massa térmica interna resultou na redução do consumo de energia (Figura 24B) e no maior aproveitamento da VN, conforme os valores de PHFT apresentados na Figura 25. A exceção a esse comportamento foi a transição do CI 06 para o CI 07, que apresentou uma leve queda no PHFT para todas as paredes externas. No entanto, essa redução não comprometeu o desempenho energético, pois o consumo de energia manteve o padrão de redução observado (Figura 24B).

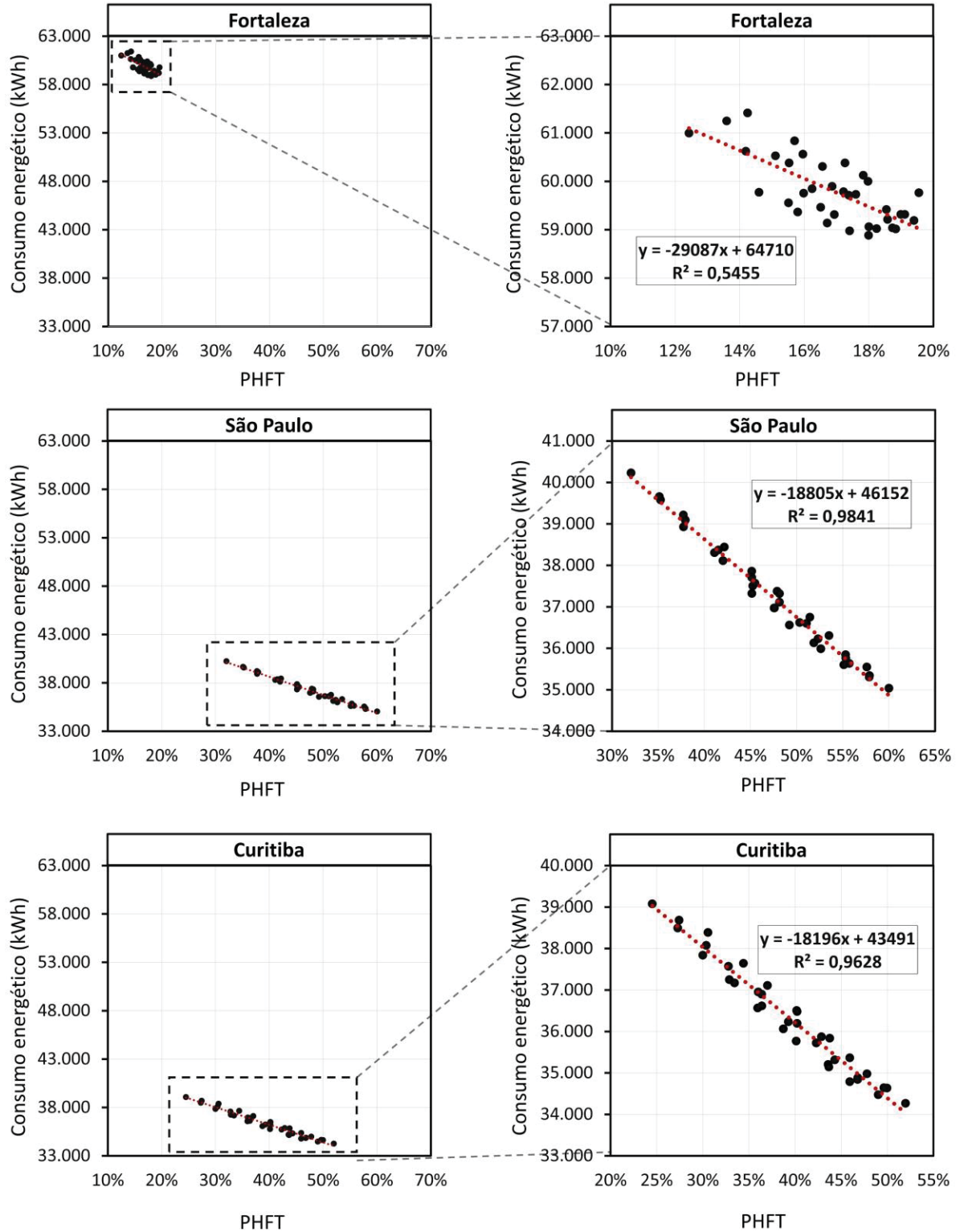
Em Curitiba, foi identificado um comportamento semelhante: o aumento da massa térmica interna contribuiu para o aumento do PHFT (Figura 25) e da eficiência energética (Figura 24C). No entanto, as exceções foram mais significativas do que em São Paulo. A transição do CI 06 para o CI 07, por exemplo, resultou em queda no PHFT para todas as paredes externas, o que se refletiu em um leve aumento no consumo de energia para as paredes externas 2 e 3 (Figura 24C). Além disso, a mudança do CI 10 para o CI 11, no caso da parede externa 3 (Figura 25C), também provocou uma redução no PHFT acompanhada de maior consumo do sistema AC (Figura 24C).

Esses resultados apontam que, em São Paulo e Curitiba, há uma correlação mais significativa entre o PHFT e o consumo do sistema AC para essa faixa de propriedades térmicas testadas. Isso indica que essas localidades possuem maior potencial de economia energética por meio do uso da VN do que Fortaleza, na qual essa relação não se mostrou tão evidente.

Duas abordagens de regressão foram utilizadas para investigar a relação entre o PHFT, a taxa de renovação de ar e o consumo energético, sob a estratégia VMM. A Figura 26 apresenta os gráficos de dispersão entre o PHFT e o consumo anual, enquanto a Figura 27 exibe o gráfico de dispersão entre a média da taxa de renovação de ar e o consumo energético anual. Cada ponto da análise representa um dos 36 cenários testados de massa térmica, associados aos respectivos valores de PHFT, taxa média de renovação de ar e consumo energético. A abordagem pretende identificar tendências gerais entre os indicadores da VN e o consumo de energia, por

meio de uma análise exploratória que avalia o impacto agregado dessas variações, considerando as composições construtivas simuladas.

FIGURA 26 – Correlação e regressão linear entre PHFT e consumo

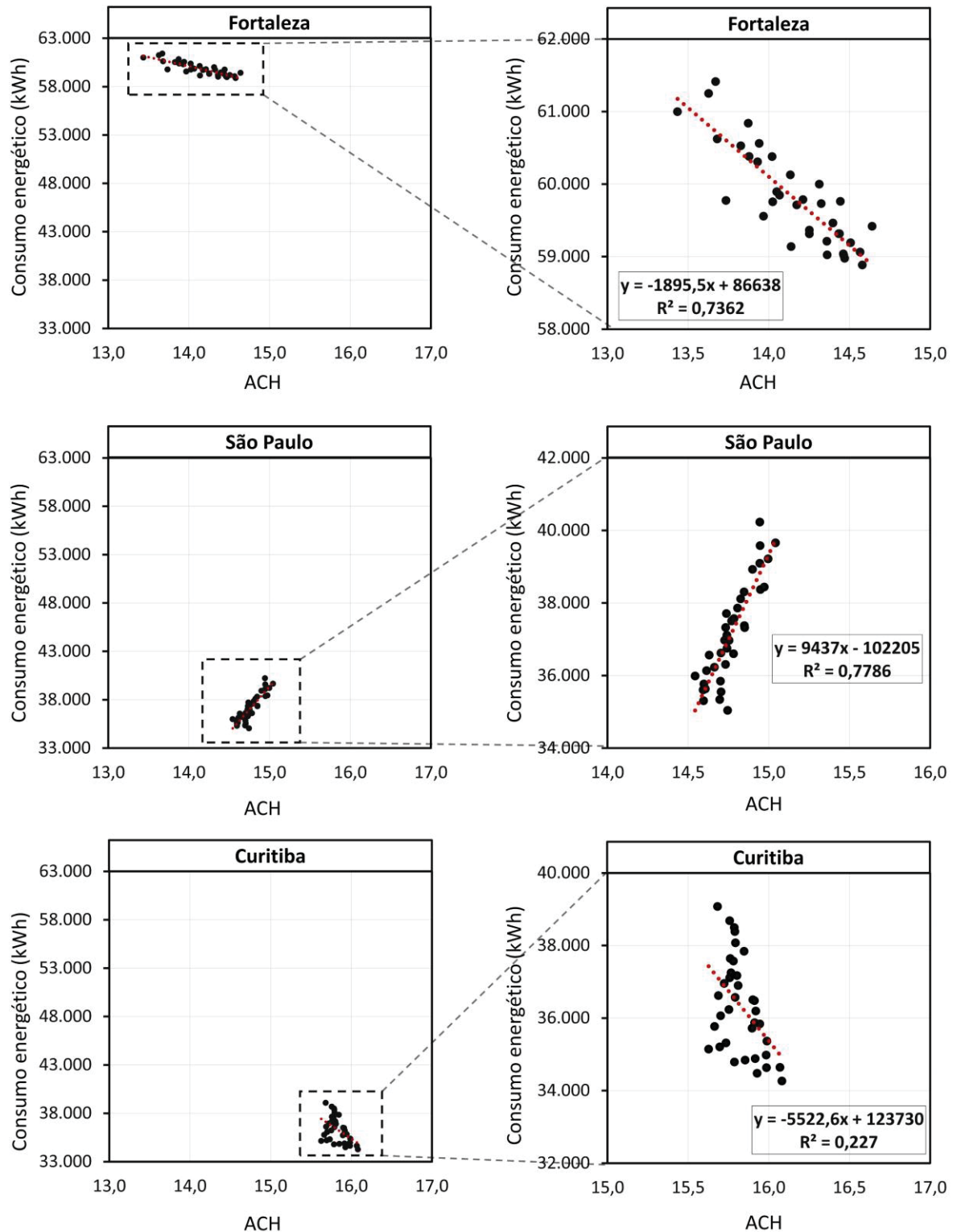


FONTE: O autor (2025).

Os gráficos de dispersão (Figura 26) revelam distintas relações entre PHFT e consumo nas três localidades. Em Fortaleza, a ampla dispersão dos pontos e o  $R^2$  sugerem que, para as diferentes composições simuladas, há uma correlação fraca entre as variáveis. Já em São Paulo e Curitiba, a correlação é superior, o que indica, dentro dos limites dessa abordagem, que a VN tende a ser mais impactante no consumo em climas amenos, uma vez que períodos mais longos de operação estão correlacionados a menor consumo energético. Apesar de a regressão não isolar os efeitos de cada variável envolvida, ela aponta para maior previsibilidade do impacto da VN em contextos de clima moderado, ao passo que, em climas quentes e úmidos, como o de Fortaleza, esse impacto parece não ser descrito por essa correlação.

A Figura 27 revela a existência de correlação entre o consumo anual e a média da taxa de VN efetivamente alcançada no ano. Para isso, foi calculada a média de ACH atingida nos escritórios apenas nos *timesteps* em que a VN estava ativada, considerando os 36 cenários simulados.

FIGURA 27 – Correlação e regressão linear entre taxa de renovação de ar e consumo



FONTE: O autor (2025).

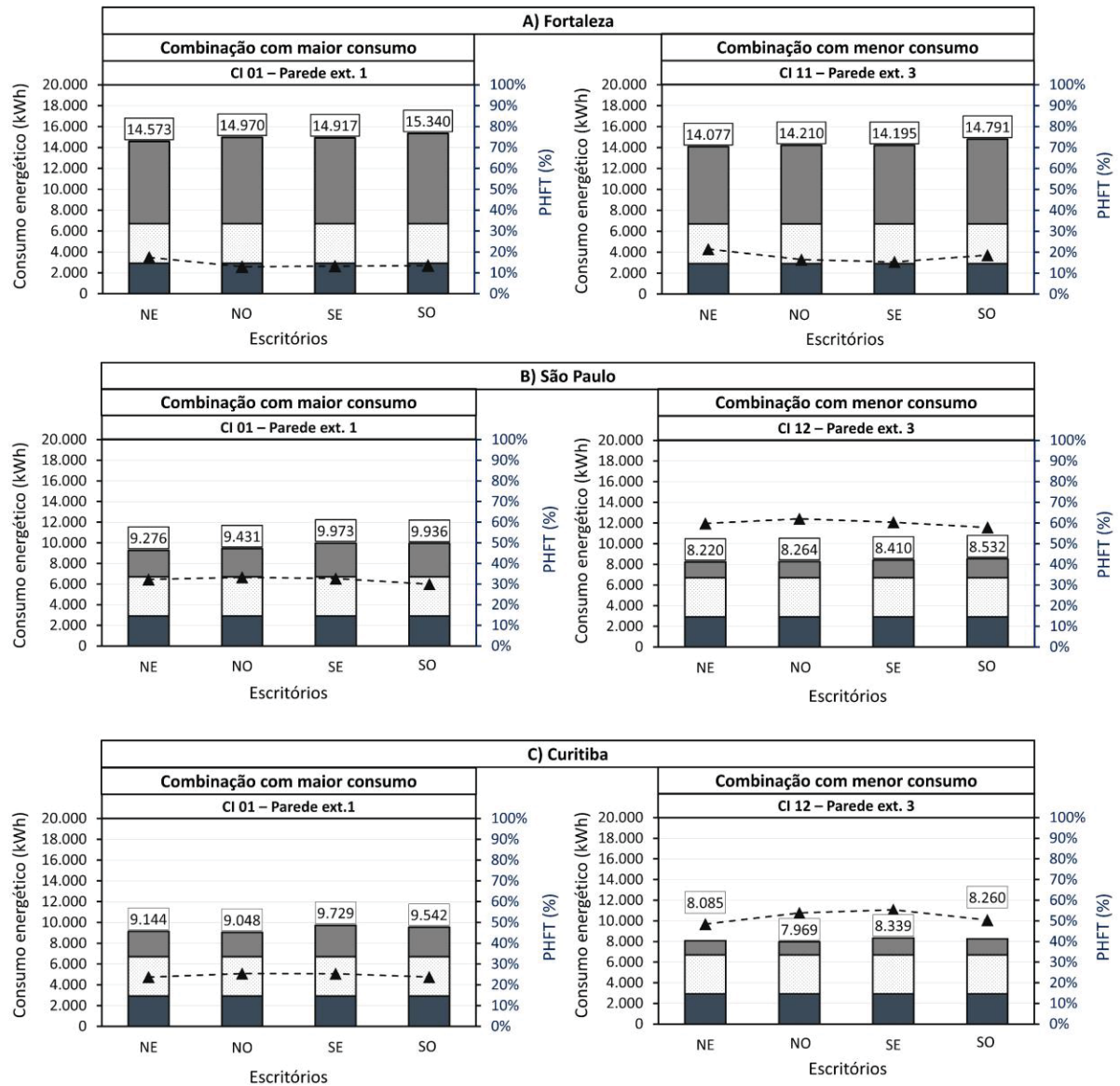
Em Fortaleza, observa-se maior variação da taxa de ventilação entre os cenários e uma correlação de R<sup>2</sup> de 0,74 entre o aumento da taxa da VN e a redução

do consumo de energia dos escritórios. Em São Paulo, o comportamento foi oposto: taxas de ACH mais elevadas estiveram associadas a maiores consumos, com  $R^2$  de 0,78, possivelmente devido à influência das demandas de aquecimento, que podem mascarar o efeito benéfico da VN. Em Curitiba, a fraca correlação observada reforça a hipótese de que o consumo associado ao aquecimento influencia significativamente esse resultado.

Comparando os coeficientes de determinação ( $R^2$ ), percebe-se que a correlação entre PHFT e consumo é mais forte em São Paulo e Curitiba, enquanto, em Fortaleza, a variável com maior correlação com o consumo foi a média anual da taxa de ventilação. Isso sugere que, nesse contexto de componentes construtivos testados, a taxa média de ventilação efetivamente atingida tem maior impacto sobre o desempenho energético em Fortaleza, ao passo que, em São Paulo e Curitiba, a duração do aproveitamento da ventilação natural (PHFT) desempenha papel mais relevante.

O consumo de energia e o PHFT por escritório para as localidades são apresentados na Figura 28. Os resultados indicam que os escritórios voltados para SO apresentaram o maior consumo de energia, enquanto os voltados para NE registraram o menor consumo e o maior PHFT em ambos os cenários para Fortaleza (Figura 28A). Para São Paulo (Figura 28B), a configuração de menor massa térmica variou o PHFT entre 30% e 35%. Em contraste, no cenário de maior massa térmica, o PHFT aumentou para 55–62%, atingindo o pico de 62,02% no escritório voltado para NO. Na configuração leve, o escritório SE apresentou o maior consumo de energia, enquanto no cenário de construção pesada, o maior consumo foi registrado no escritório SO. Destaca-se que o escritório NE demonstrou eficiência energética consistentemente maior, apresentando o menor consumo em ambas as configurações de massa térmica.

FIGURA 28 – Consumo por escritório para condicionamento misto (VMM)

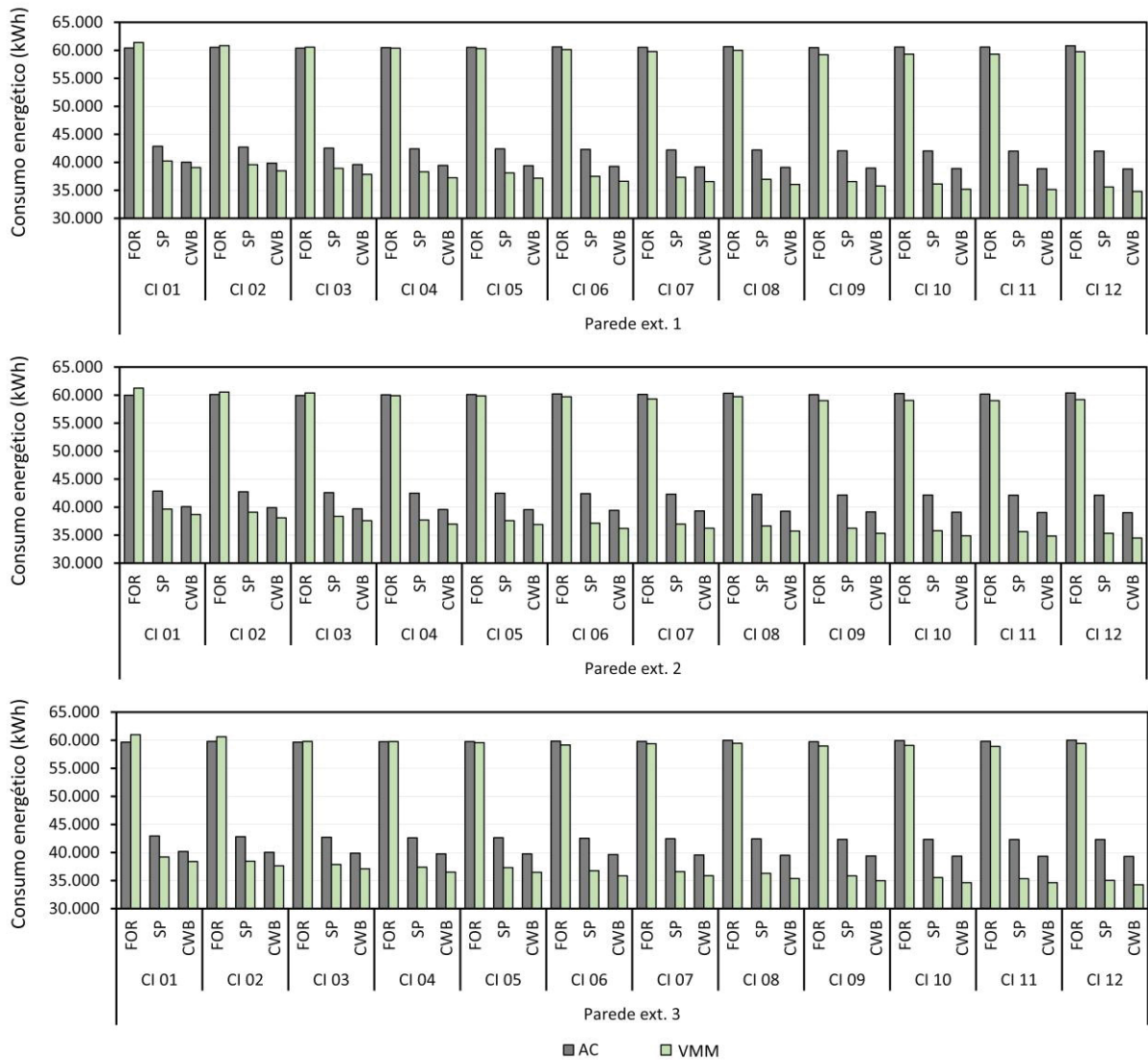


FONTE: O autor (2025).

Em Curitiba, os escritórios com aberturas voltadas para o NO e o SE foram os que atingiram o maior PHFT (Figura 28C). Entretanto, o escritório NO apresentou o menor consumo entre os escritórios, enquanto o SE apresentou o maior consumo em ambos os casos. Isso pode ocorrer porque a posição norte beneficia de maior exposição ao sol, reduzindo o consumo de energia para aquecimento na localidade. Apesar da posição SE aproveitar bastante da VN, a demanda do sistema AC é alta. A redução máxima do consumo, devido à orientação dos escritórios, foi atingida no cenário de componentes construtivos mais leves em todas as localidades. Em Fortaleza, a redução foi de 5,0%; já em São Paulo e Curitiba, de 6,99%.

A Figura 29 apresenta uma comparação do consumo de energia entre as duas estratégias de condicionamento avaliadas até então: uso exclusivo de AC e VMM, considerando todos os casos de componentes construtivos e de localidades simulados.

FIGURA 29 – Comparação do consumo anual entre o modo de uso exclusivo de AC e VMM



FONTE: O autor (2025).

Os resultados indicam que a implementação da estratégia VMM não proporciona economias de energia significativas em Fortaleza, com redução máxima de apenas 2,13%, havendo, inclusive, casos em que o consumo aumentou. Em contraste, São Paulo e Curitiba apresentaram economia de energia em todos os cenários, com reduções máximas de 17,18% para São Paulo e 12,80% para Curitiba. Observa-se, ainda, que a redução no consumo de energia é potencializada com o

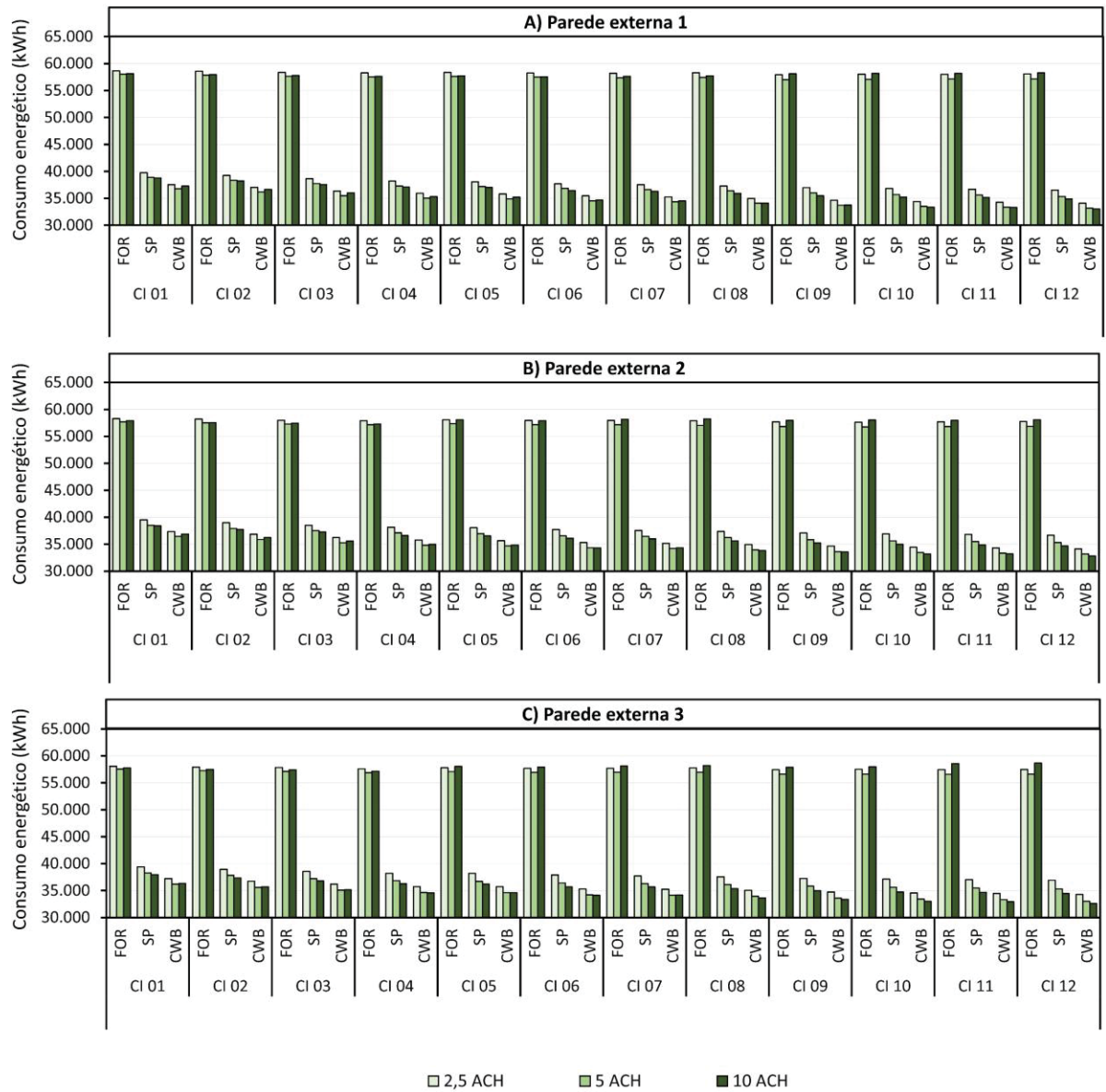
aumento da massa térmica interna e atinge seu máximo na combinação de maior massa térmica.

#### 4.3 ESTRATÉGIA DE VENTILAÇÃO DE MODO MISTO POR *FANS* (VMMF)

Esta seção apresenta os indicadores de desempenho da estratégia de VMMF, que engloba a ventilação forçada por fans, na qual o ar externo é insuflado no ambiente a taxas pré-definidas, independentemente das condições naturais do vento. O controle segue a mesma lógica da estratégia de VMM, com a diferença de que a renovação do ar ocorre por insuflamento mecânico e não pela abertura de janelas. Os detalhes do controle adotado estão descritos na Seção 3.3.

A Figura 30 compara o consumo energético por combinação de componentes construtivos sob a estratégia VMMF, considerando as diferentes taxas de renovação de ar adotadas. As Tabelas 15, 16 e 17 apresentam as combinações de componentes construtivos que resultaram nos maiores e menores consumos sob essa condição de ventilação para as diferentes taxas de ventilação adotadas.

FIGURA 30 – Consumo por combinações de componentes sob a VMMF



□ 2,5 ACH      ■ 5 ACH      ■ 10 ACH

FONTE: O autor (2025).

TABELA 15 - Casos de maior e menor consumo sob estratégia VMMF para Fortaleza

<b>Fortaleza</b>							
<b>2,5 ACH</b>							
Combinações com maior consumo				Combinações com menor consumo			
Parede ext.	CI	Cons. (kWh)	PHFT (%)	Parede ext.	CI	Cons. (kWh)	PHFT (%)
1	1	58.648,12	7,15%	3	11	57.427,60	8,71%
1	2	58.582,66	8,04%	3	9	57.438,23	8,51%
1	5	58.352,34	8,45%	3	12	57.486,19	9,10%
<b>5 ACH</b>							
Combinações com maior consumo				Combinações com menor consumo			
Parede ext.	CI	Cons. (kWh)	PHFT (%)	Parede ext.	CI	Cons. (kWh)	PHFT (%)
1	1	58.045,29	9,59%	3	11	56.579,45	11,89%
1	2	57.855,44	10,93%	3	10	56.627,96	12,16%
2	1	57.703,32	8,94%	3	9	56.630,84	11,56%
<b>10 ACH</b>							
Combinações com maior consumo				Combinações com menor consumo			
Parede ext.	CI	Cons. (kWh)	PHFT (%)	Parede ext.	CI	Cons. (kWh)	PHFT (%)
3	12	58.637,52	17,09%	3	4	57.157,76	14,94%
3	11	58.539,16	16,53%	2	4	57.300,37	15,83%
1	12	58.281,37	18,13%	3	3	57.395,42	13,78%

FONTE: O autor (2025).

Observa-se, em Fortaleza, que o aumento da taxa de renovação de ar de 2,5 para 5,0 ACH resultou na redução do consumo do sistema AC em todos os casos analisados. O aumento da taxa de ventilação favorece a remoção de calor por convecção, reduzindo a carga térmica a ser tratada pelo sistema de climatização. Essa dinâmica se reflete nos resultados de PHFT (expostos no Apêndice A), que indicam maior percentual de horas em conforto térmico sob VMMF na taxa de 5 ACH em comparação com 2,5 ACH, evidenciando menor necessidade de acionamento do AC e maior aproveitamento da ventilação passiva.

No entanto, ao aumentar a taxa de ventilação para 10 ACH, observou-se aumento do consumo em todos os cenários (Figura 30). Esse aumento foi ainda mais acentuado em ambientes com maior massa térmica, chegando a superar o consumo observado à taxa de 2,5 ACH. Apesar de 10 ACH ter proporcionado um PHFT maior

(Tabela 24 - Apêndice A), a renovação de ar elevada resultou em maior acúmulo de calor nos componentes, o que levou ao maior consumo do sistema AC para manter a temperatura dentro da faixa de *setpoints* definidos. Isso sugere que, a partir de um certo limite, para a localidade de Fortaleza, o aumento da taxa de ventilação em condições naturais pode ser contraproducente. Em ambientes com componentes construtivos de maior capacidade térmica, esse efeito é intensificado devido à propriedade de armazenar mais calor, o que contribui para o aumento do consumo em taxas de ventilação mais elevadas.

Além disso, observa-se uma inversão no padrão de desempenho térmico das combinações construtivas com o aumento da taxa de ventilação para 10 ACH (Tabela 15). Enquanto nas taxas de 2,5 e 5 ACH os cenários com maior massa térmica estiveram entre os de menor consumo energético, em 10 ACH essas mesmas combinações passaram a figurar entre os cenários de maior consumo. Isso sugere que, à taxa de ventilação mais elevada, o acúmulo de calor na massa térmica, associado à maior entrada de ar externo, intensifica a carga térmica interna. Nas taxas de ventilação mais baixas, observa-se um acoplamento mais eficiente entre a VMMF e a capacidade térmica dos componentes construtivos em Fortaleza, favorecendo a remoção do calor acumulado e reduzindo a demanda por resfriamento mecânico.

TABELA 16 - Casos de maior e menor consumo sob estratégia VMMF para São Paulo

São Paulo							
2,5 ACH							
Combinações com maior consumo				Combinações com menor consumo			
Parede ext.	CI	Cons. (kWh)	PHFT (%)	Parede ext.	CI	Cons. (kWh)	PHFT (%)
1	1	39.733,82	34,39%	1	12	36.535,99	60,09%
2	1	39.510,37	37,46%	2	12	36.656,11	60,48%
3	1	39.390,43	39,66%	1	11	36.688,62	58,53%
5 ACH							
Combinações com maior consumo				Combinações com menor consumo			
Parede ext.	CI	Cons. (kWh)	PHFT (%)	Parede ext.	CI	Cons. (kWh)	PHFT (%)
1	1	38.881,69	35,55%	3	12	35.288,57	65,22%
2	1	38.501,98	39,12%	2	12	35.324,31	63,11%
1	2	38.356,25	39,40%	1	12	35.333,44	61,50%
10 ACH							
Combinações com maior consumo				Combinações com maior consumo			
Parede ext.	CI	Cons. (kWh)	PHFT (%)	Parede ext.	CI	Cons. (kWh)	PHFT (%)
1	1	38.774,57	33,08%	3	12	34.454,15	62,75%
2	1	38.415,71	35,92%	3	11	34.680,28	60,42%
1	2	38.220,86	36,53%	2	12	34.690,82	59,78%

FONTE: O autor (2025).

Em São Paulo, observou-se uma redução contínua no consumo de energia à medida que aumentaram tanto a taxa de ventilação quanto a massa térmica das combinações de componentes construtivos (Figura 30). Esse comportamento indica que as condições de temperatura do ar externo nessa localidade favoreceram a redução da carga térmica interna em cenários de alta taxa de ventilação. Assim, a VMMF pode ser aproveitada de forma eficiente, sem apresentar tendência de aumento do consumo, mesmo em altas vazões, para os componentes selecionados neste estudo.

Para esta localidade (São Paulo), os maiores PHFT foram observados com a taxa de 5 ACH (Tabela 23 - Apêndice A). No entanto, os menores consumos de energia do sistema de climatização ocorreram à taxa de 10 ACH (Figura 30). Esse resultado indica que, em 5 ACH, o ambiente manteve o conforto passivo por mais tempo, mas acumulou maior carga térmica, exigindo mais energia quando o sistema AC foi acionado. Já em 10 ACH, o sistema AC operou com maior frequência, porém sob cargas térmicas menores, resultando em menor consumo total.

Esse comportamento pode estar relacionado ao fato de que a maior taxa de renovação de ar (10 ACH) torna o ambiente mais sensível às variações térmicas externas de São Paulo, levando o sistema AC a ser acionado mais rapidamente em comparação às menores taxas de ventilação (Apêndice A). Ainda assim, a ventilação mais intensa favorece a remoção do calor acumulado nos componentes construtivos, mesmo em períodos curtos de operação, reduzindo a carga térmica enfrentada pelo AC (Figura 30). Assim, o aumento da taxa de ventilação tende a melhorar o desempenho em São Paulo, por intensificar o acoplamento entre a VMMF e a massa térmica dos elementos construtivos, ainda que o tempo de conforto passivo ao longo do ano seja menor (PHFT reduzido).

TABELA 17 - Casos de maior e menor consumo sob estratégia VMMF para Curitiba

<b>Curitiba</b>							
<b>2,5 ACH</b>							
Combinações com maior consumo				Combinações com menor consumo			
Parede ext.	CI	Cons. (kWh)	PHFT (%)	Parede ext.	CI	Cons. (kWh)	PHFT (%)
1	1	37.537,62	29,99%	1	12	34.088,43	60,27%
2	1	37.339,14	33,70%	2	12	34.119,45	63,36%
3	1	37.222,32	37,94%	1	11	34.265,30	58,61%
<b>5 ACH</b>							
Combinações com maior consumo				Combinações com menor consumo			
Parede ext.	CI	Cons. (kWh)	PHFT (%)	Parede ext.	CI	Cons. (kWh)	PHFT (%)
1	1	36.787,58	31,52%	3	12	32.995,79	63,31%
2	1	36.459,79	34,91%	1	12	33.177,57	56,31%
3	1	36.211,71	38,41%	2	12	33.179,67	58,87%
<b>10 ACH</b>							
Combinações com maior consumo				Combinações com menor consumo			
Parede ext.	CI	Cons. (kWh)	PHFT (%)	Parede ext.	CI	Cons. (kWh)	PHFT (%)
1	1	37.260,32	25,39%	3	12	32.598,33	57,62%
2	1	36.876,31	29,25%	2	12	32.797,18	54,08%
1	2	36.650,27	29,03%	3	11	32.914,66	55,02%

FONTE: O autor (2025).

Em Curitiba (Figura 30), a taxa de ventilação de 5 ACH resultou em desempenho mais consistente, com redução do consumo de energia em todos os

cenários avaliados, em comparação à taxa de 2,5 ACH. Além disso, resultou nos maiores PHFT entre as taxas testadas, o que evidencia sua maior eficácia em manter a temperatura operativa dos escritórios dentro dos limites de conforto e em reduzir as cargas térmicas. Esses resultados indicam que a ventilação a 5 ACH estabelece um acoplamento mais eficiente e estável com as massas térmicas analisadas sob as condições climáticas de Curitiba. No entanto, os ganhos em eficiência energética podem ser ainda mais significativos ao associar taxas elevadas de ventilação a elementos construtivos de alta massa térmica.

Nesta localidade (Curitiba), a taxa de ventilação de 10 ACH só promove redução no consumo de energia quando combinada a níveis elevados de massa térmica (Figura 30). A partir do CI 08, observa-se que essa taxa passa a promover, de forma consistente, menor consumo em comparação às taxas inferiores, independentemente da parede externa adotada. Antes disso, o melhor desempenho energético é obtido com 5 ACH. Isso sugere que apenas a partir desse nível de massa térmica interna é possível equilibrar o armazenamento de calor suficiente para atenuar as variações de temperatura, reduzir o acionamento do sistema de climatização e reduzir a carga térmica interna por meio de ventilação passiva.

Nas configurações de menores massas térmicas do que CI 08, a capacidade de amortecimento do calor interno em Curitiba é limitada. Assim, quando se aplicou uma alta taxa de ventilação (10 ACH) nesses casos, não houve massa térmica suficiente para absorver e retardar o ganho térmico. Como resultado, a ventilação intensificou o impacto do calor na temperatura operativa das zonas, levando o controle a acionar o sistema AC com mais frequência ao atingir os limites de conforto. Esse efeito é corroborado pelos valores mais baixos de PHFT observados nas combinações com ventilação a 10 ACH em relação às demais taxas e pelo aumento progressivo do PHFT à medida que a massa térmica dos componentes construtivos se eleva (Tabela 24 - Apêndice A), o que indica maior estabilidade térmica e menor demanda por climatização ativa.

Ademais, para Curitiba, observou-se que CIs pesados apresentaram os maiores valores de PHFT quando combinados à taxa de ventilação de 5 ACH (Tabela 23 - Apêndice A). No entanto, os menores consumos de energia ocorreram à taxa de 10 ACH (Figura 30). Isso se deve ao fato de que, embora a ventilação a 10 ACH tenha aumentado a frequência de acionamento do sistema de climatização, ela proporcionou um acoplamento mais eficiente com a massa térmica da edificação, favorecendo a

remoção das cargas térmicas internas por meio da ventilação passiva. O ambiente esteve sujeito a variações operativas mais intensas, o que levou a mais ciclos de operação do AC, porém com menor carga térmica em cada ciclo, resultando em menor consumo energético total.

Observa-se que o PHFT nem sempre está associado aos melhores cenários de desempenho energético. Em algumas ocasiões, seu aumento pode indicar um maior acúmulo de calor nos componentes que a VN não consegue remover por completo. Em Fortaleza, a maior taxa de ventilação (10 ACH) resultou em um PHFT mais elevado dentre as demais taxas. No entanto, esse uso excessivo elevou a carga térmica a ser removida pelo sistema de climatização quando este estava ativado. Já em São Paulo e Curitiba, a alta taxa de VMMF esteve associada a menores PHFT, pois intensificaram as flutuações térmicas internas e aumentaram o acionamento do AC. Entretanto, São Paulo reduziu o consumo para essa taxa de ventilação em todos os cenários de componentes construtivos, enquanto Curitiba reduziu apenas para casos de CIs pesados (a partir do CI 08).

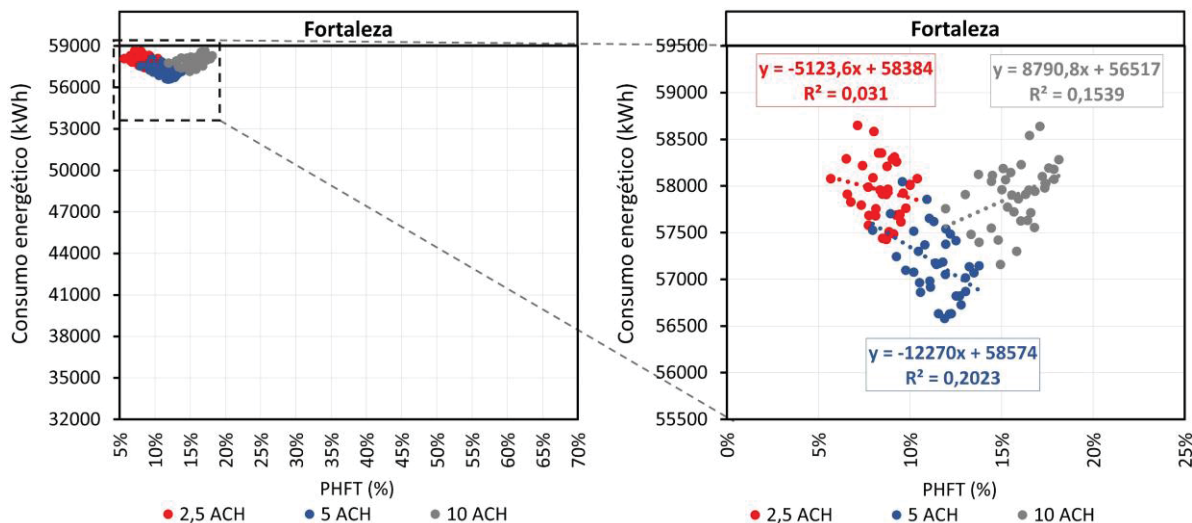
#### 4.4 AVALIAÇÃO DO IMPACTO DAS TAXAS DE VENTILAÇÃO NO CONSUMO ENERGÉTICO

Este tópico apresenta os estudos realizados para compreender o impacto das taxas de ventilação simuladas no consumo energético da edificação, buscando identificar como as diferentes condições do ar externo de cada localidade influenciam o desempenho nas distintas composições construtivas adotadas. Para investigar essas relações, foram realizadas análises de correlação, de regressão e de variância.

##### 4.4.1 Análise de correlação e regressão

As Figuras 31, 32 e 33 apresentam os gráficos de dispersão com regressões lineares entre PHFT e o consumo anual de energia para os cenários de massa térmica simulados em Fortaleza, São Paulo e Curitiba, respectivamente. Os dados estão agrupados por taxa de renovação de ar.

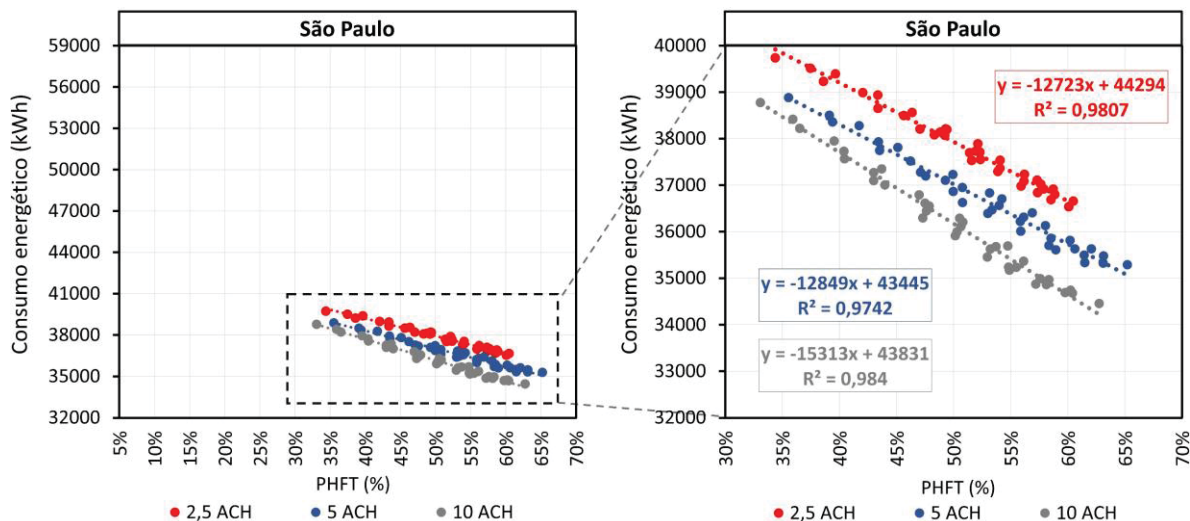
FIGURA 31 – Regressões lineares entre PHFT e consumo para as diferentes taxas de ventilação adotadas em Fortaleza



FONTE: O autor (2025).

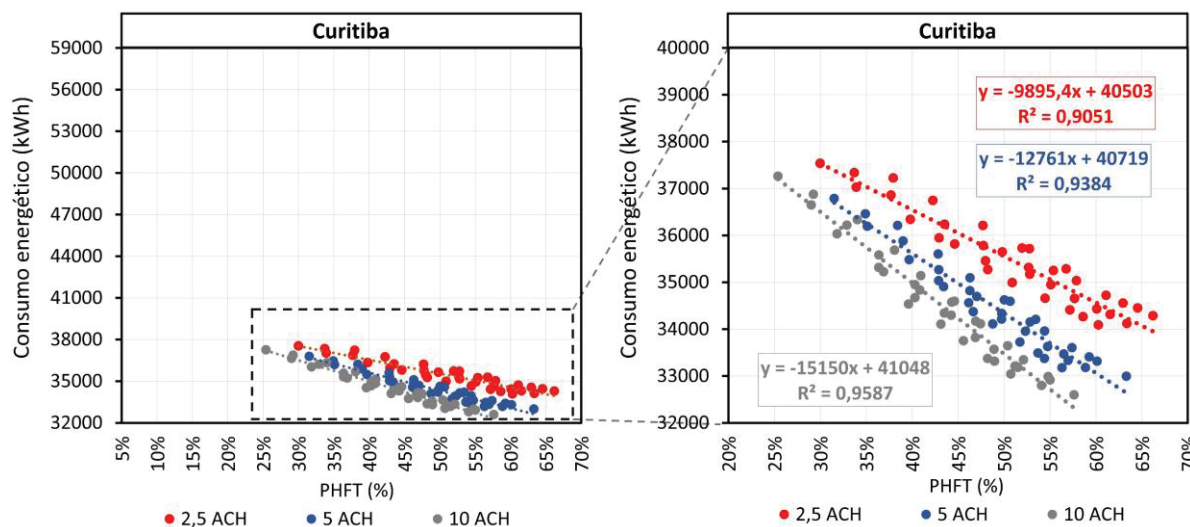
Vê-se que há uma fraca correlação entre o aumento do PHFT e a redução do consumo de energia em Fortaleza (Figura 31). As curvas de regressão apresentam baixos coeficientes de determinação ( $R^2$ ) para todas as taxas de ventilação adotadas, o que indica baixa correlação entre as variáveis. Observa-se que, na taxa de ventilação máxima (10 ACH), há correlação positiva entre o PHFT e o consumo de energia, ou seja, quanto maior o tempo de ventilação, maior o consumo. Já para as taxas inferiores, a correlação é negativa. A taxa de 5 ACH apresenta a maior força de relação linear e a maior variação de consumo em resposta ao PHFT, embora ainda apresente baixa correlação e pouca representatividade nos dados.

FIGURA 32 – Regressões lineares entre PHFT e consumo para as diferentes taxas de ventilação adotadas em São Paulo



FONTE: O autor (2025).

FIGURA 33 – Regressões lineares entre PHFT e consumo para as diferentes taxas de ventilação adotadas em Curitiba



FONTE: O autor (2025).

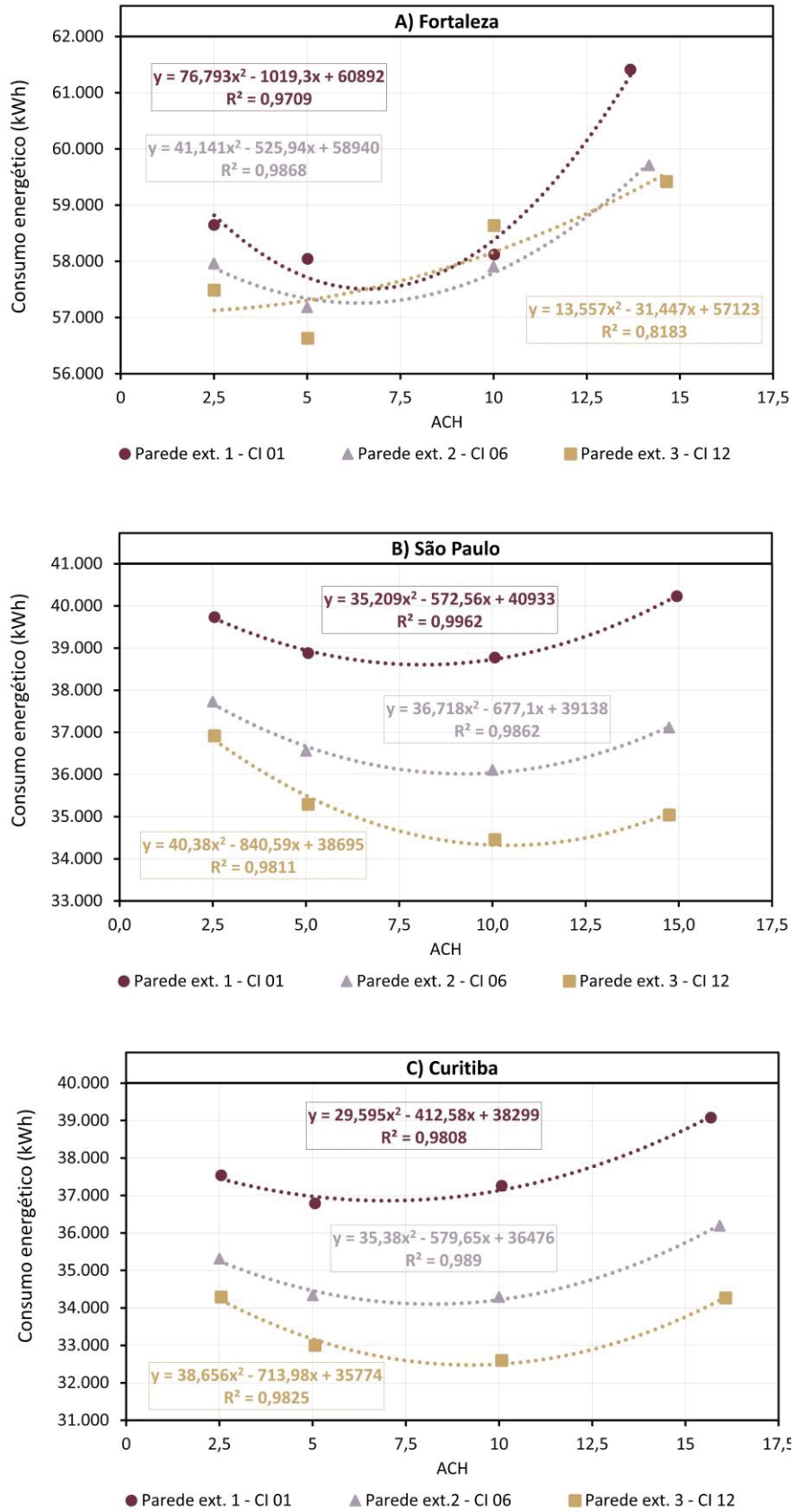
Ademais, vê-se uma relação linear inversa entre o PHFT e o consumo energético em todas as taxas de ACH para São Paulo e Curitiba, bem representada pelas regressões lineares, com valores de  $R^2$  elevados, conforme apresentado nas Figuras 32 e 33, respectivamente. Isso indica que, nessas localidades, o aumento dos períodos de ventilação passiva pode ser eficaz na redução do consumo de energia, especialmente em cenários com maiores taxas de renovação de ar, cujas retas

apresentaram coeficientes angulares mais acentuados, indicando maior sensibilidade do consumo em função do PHFT.

Para analisar a correlação entre a taxa média de renovação de ar e o consumo energético, foram selecionadas, para cada localidade, duas combinações de componentes construtivos que representam os extremos de massa térmica. Essa escolha visa compreender como diferentes níveis de renovação de ar impactam o consumo de energia em contextos contrastantes de capacidade de armazenamento térmico, permitindo interpretar os fenômenos físicos do acoplamento entre o ar externo e os materiais da edificação.

A Figura 34 apresenta a regressão quadrática entre a taxa média de ventilação e o consumo de energia para as estratégias VMM e VMMF, considerando apenas três casos de massa térmica. As taxas médias foram calculadas com base apenas nos períodos em que a ventilação esteve ativa ao longo do ano. Na VMMF, as taxas são pré-definidas e constantes, de modo que a média corresponde exatamente ao valor fixo adotado. Já na VMM, a ventilação natural depende das condições instantâneas de vento, o que faz com que a taxa média varie entre os cenários simulados. Em todas as localidades e combinações de componentes, a VMM apresentou taxas médias de renovação de ar mais altas do que a VMMF. Essa abordagem permite isolar o efeito da quantidade de ar insuflado sobre o consumo energético, mantendo constantes as demais variáveis do ambiente.

FIGURA 34 – Regressões polinomiais entre as médias de taxas de ventilação simuladas e consumo para as localidades



FONTE: O autor (2025).

Em Fortaleza (Figura 34A), o caso de menor massa térmica (Parede ext. 1 – CI 01) favorece a redução do consumo de energia com o aumento da taxa de ventilação, desde 2,5 ACH até o ponto ótimo de 6,64 ACH. Acima desse valor, o consumo aumenta de forma acentuada, evidenciando que há um limite a partir do qual a ventilação se torna contraproducente. O caso de massa térmica intermediária (Parede ext. 2 – CI 06) segue um padrão semelhante ao de menor massa térmica. Entretanto, apresenta ponto ótimo ligeiramente inferior (6,39 ACH) e menor sensibilidade às variações nas taxas de ventilação. Por outro lado, no cenário de maior massa térmica (Parede ext. 3 – CI 12), a parábola da regressão sugere que não há redução do consumo nos pontos testados, mas sim um aumento gradual e menos acentuado, reforçando a maior capacidade da edificação de amortecer os efeitos térmicos decorrentes do aumento da taxa de ventilação. É importante observar que esta regressão resultou em um  $R^2$  de aproximadamente 0,82, o menor para Fortaleza.

Em São Paulo (Figura 34B), as regressões indicam que o aumento da massa térmica não apenas reduz o consumo total, mas também desloca o ponto ótimo de ventilação para uma taxa de renovação de ar mais elevada. Isso amplia a faixa de operação eficiente da VN. No cenário de menor massa térmica (Parede ext. 1 – CI 01), o ponto de menor consumo ocorre em 8,13 ACH. No caso de massa térmica intermediária (Parede ext. 2 – CI 06), o ponto de menor consumo ocorre a 9,21 ACH, enquanto na maior massa térmica (Parede ext. 3 – CI 12), o mínimo consumo é alcançado à taxa de 10,41 ACH. No entanto, a curvatura mais acentuada da parábola associada à maior massa térmica revela maior sensibilidade do consumo às variações de ACH após o ponto ótimo. Embora mais eficientes até certo limite, variações desse ponto resultam em aumentos mais acentuados no consumo em comparação com os cenários de menor massa térmica. O aumento da média da taxa de ventilação anual nos cenários de VMMF (2,5 ACH, 5,0 ACH e 10,0 ACH) favoreceu o desempenho nos três cenários de componentes construtivos testados, e a maior redução ocorreu no cenário de construções mais pesadas (Parede ext. 3 – CI 12). Entretanto, vê-se que, na média da taxa de ventilação atingida no cenário de VMM, há um aumento significativo do consumo nos três casos, indicando também um limite da taxa de ventilação em que a VN torna-se contraproducente.

Em Curitiba (Figura 34C), o aumento da massa térmica provoca um efeito semelhante ao observado em São Paulo: desloca o ponto ótimo de consumo para valores mais altos de taxas de ventilação, ampliando a faixa eficiente de operação.

Embora os valores ótimos de taxas de ventilação sejam menores que os de São Paulo, o comportamento de expansão da faixa de redução de consumo com o aumento da massa térmica se repete. No cenário de menor massa térmica (Parede ext. 1 – CI 01), o ponto de menor consumo ocorre em 6,97 ACH, enquanto, no cenário intermediário e no de maior massa térmica, o mínimo ocorre em 8,19 ACH e 9,24 ACH, respectivamente. Diferentemente de São Paulo, o aumento da média da taxa de ventilação anual nos cenários de VMMF resultou em economias apenas no cenário intermediário (Parede ext. 2 – CI 06) e nos componentes construtivos mais pesados (Parede ext. 3 – CI 12).

Os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) são elevados em todos os casos (Figura 34), demonstrando que as regressões representam adequadamente a relação entre o consumo energético e a taxa de renovação do ar. Fortaleza apresenta o menor  $R^2$  (0,8183) no cenário de maior massa térmica (Figura 34A), indicando que esta regressão é a que menos descreve o comportamento das variáveis. Já em São Paulo e Curitiba, os valores de  $R^2$  são próximos de 1, o que revela forte previsibilidade.

Fortaleza foi a localidade com menor tolerância ao aumento da taxa de ventilação (Figura 34A). No cenário de maior massa térmica (Parede ext. 3 – CI 12), a equação revela que, a partir de apenas 1,16 ACH, o consumo passou a crescer, indicando o aumento de armazenamento de calor na massa térmica. No cenário de menor massa térmica (Parede ext. 1 – CI 01), esse limite foi maior (6,64 ACH). Isso mostra que, em Fortaleza, mesmo pequenas taxas de ventilação podem ser contraproducentes, especialmente em cenários com componentes de alta massa térmica. Em seguida, Curitiba foi a localidade que apresentou a segunda menor capacidade de uso de ventilação a altas taxas, revelando que suas condições externas podem favorecer a elevação da carga térmica. Em São Paulo, o aumento da taxa de ventilação resultou em reduções de consumo mais consistentes. No entanto, a regressão também evidencia um limite a partir do qual novos aumentos podem levar ao aumento do consumo.

#### 4.4.2 Análise de variância

Ademais, realizou-se o estudo da análise de variância (ANOVA) de dois fatores sem replicação, considerando como fatores as combinações de componentes construtivos e os modos de condicionamento misto simulados neste estudo. Os modos

de condicionamento misto englobam o caso da ventilação natural por abertura de janelas (VMM) e as três configurações de VMMF, diferenciadas pelas taxas de renovação de ar adotadas: 2,5 ACH, 5,0 ACH e 10,0 ACH. Os grupos de componentes construtivos correspondem às 36 combinações analisadas neste estudo, formadas por 12 composições internas e 3 tipos de parede externa. Esse procedimento estatístico permite verificar se há evidências de que pelo menos um dos grupos de condicionamento misto difere significativamente dos demais quanto ao consumo e se pelo menos uma das combinações de componentes construtivos apresenta diferença estatisticamente significativa em relação às demais também quanto ao consumo.

A Tabela 18 apresenta as hipóteses testadas nesta análise e a Tabela 19 apresenta os resultados da ANOVA em cada localidade. Adotou-se um nível de significância de 5%. Ressalta-se que a análise das interações entre os fatores não foi considerada, uma vez que o consumo não contou com replicações.

TABELA 18 - Hipóteses da análise de variância (ANOVA)

Hipóteses	Fator componentes construtivos	Fator condicionamento misto
$H_0$ (hipótese nula):	Não existe diferença de consumo entre os grupos de componentes construtivos	Não existe diferença de consumo entre os grupos de condicionamento misto
$H_1$ (hipótese alternativa):	Existe diferença de consumo para pelo menos dois grupos de componentes construtivos	Existe diferença de consumo para pelo menos dois grupos de condicionamento misto

Fonte: O autor (2025)

A Tabela 19 demonstra, por meio do p-valor, que se pode descartar as hipóteses nulas e afirmar que há pelo menos dois grupos de condicionamento misto e de componentes construtivos estatisticamente diferentes entre si em todas as localidades. Ou seja, há evidência estatística de que a taxa de ventilação e as composições construtivas, de fato, impactam o consumo nas três localidades.

TABELA 19 - Análise de variância entre as combinações de componentes construtivos e as modalidades de condicionamento misto

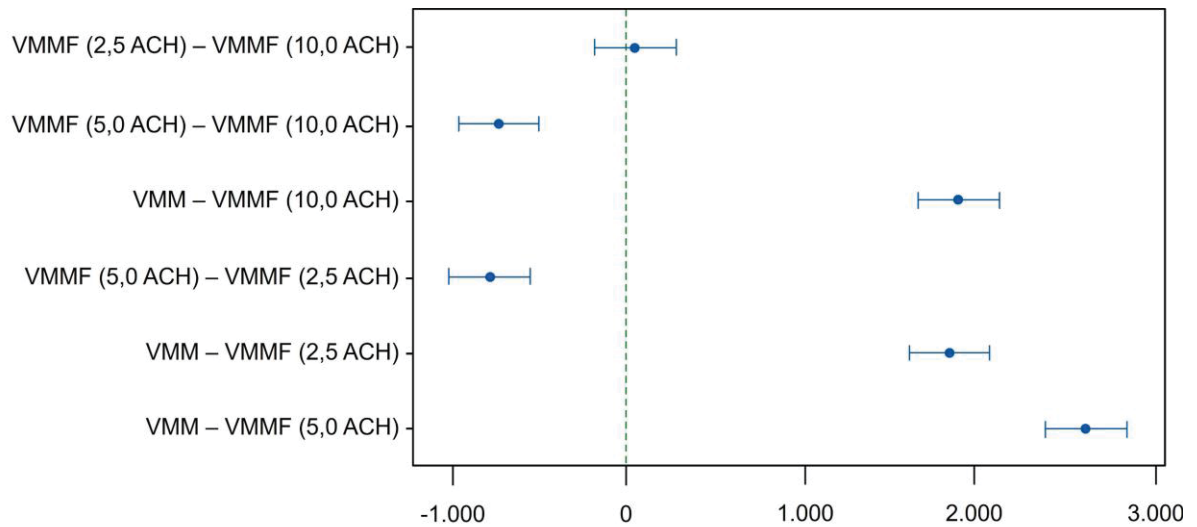
<b>Fortaleza</b>					
Fator	Graus de Liberdade	Soma dos quadrados	Quadrado médio	f-valor	p-valor
Componentes	35	13327443	380784	2,68	0
Condicionamento misto	3	136129425	45376475	319,29	0
Erro	105	14922475	142119		
Total	143	164379343			
<b>São Paulo</b>					
Fator	Graus de Liberdade	Soma dos quadrados	Quadrado médio	f-valor	p-valor
Componentes	35	170368745	4867678	69,29	0
Condicionamento misto	3	54096531	18032177	256,68	0
Erro	105	7376556	70253		
Total	143	231841833			
<b>Curitiba</b>					
Fator	Graus de Liberdade	Soma dos quadrados	Quadrado médio	f-valor	p-valor
Componentes	35	182810302	5223151	121,91	0
Condicionamento misto	3	86358760	28786253	671,90	0
Erro	105	4498514	42843		
Total	143	273667575			

FONTE: O autor (2025).

Para identificar quais grupos diferem entre si, aplicou-se o teste de Tukey com nível de confiança de 95%. Esse procedimento permite identificar quais componentes construtivos apresentam diferenças estatisticamente significativas no consumo, considerando os diferentes modos de condicionamento. Da mesma forma, permite verificar quais tipos de condicionamento diferenciam-se estatisticamente entre si, em função dos componentes construtivos adotados.

Os resultados do teste de Tukey abrangem as comparações entre os grupos de condicionamento, apresentadas nos gráficos de diferenças de médias para cada localidade (Figuras 35, 36 e 37), e as comparações entre as combinações de componentes construtivos por localidade, detalhadas no Apêndice B.

FIGURA 35 – Diferenças das médias de consumo para Fortaleza (Tukey 95% IC)

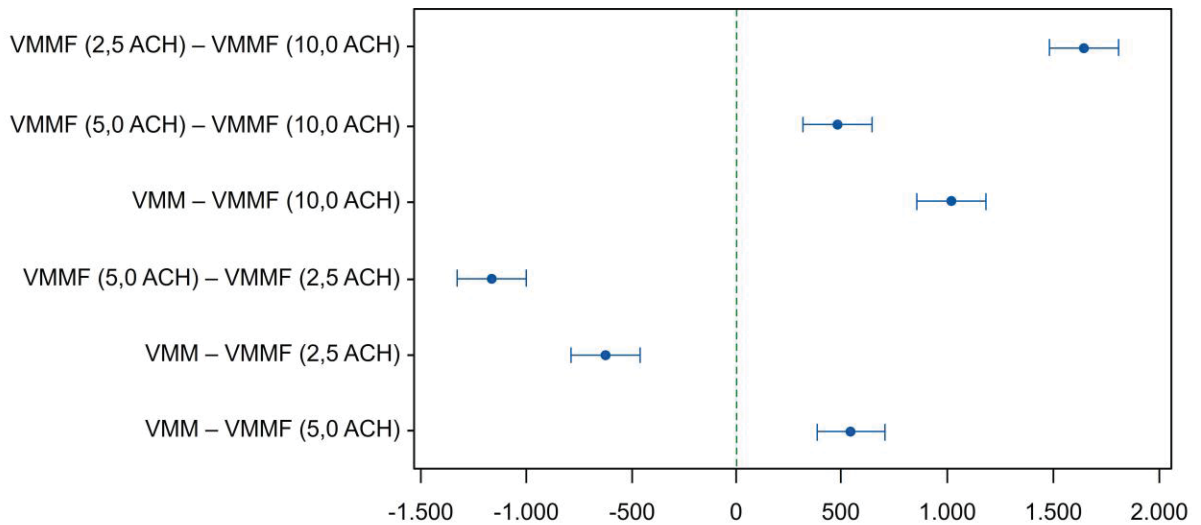


\*Se o intervalo não contém o valor zero, as médias correspondentes são significativamente diferentes

FONTE: O autor (2025).

Analisando o gráfico das diferenças de médias do teste de Tukey para Fortaleza (Figura 35), observa-se que, no eixo y, estão representados os modos de condicionamento misto, cujas médias de consumo são comparadas entre si. Nota-se que as modalidades VMMF (2,5 ACH) e VMMF (10,0 ACH) não apresentam diferença estatisticamente significativa, indicando que a implementação do controle de ventilação nessas duas taxas resulta em impactos semelhantes no consumo para os componentes construtivos avaliados. Por outro lado, todos os demais grupos apresentaram diferenças estatisticamente significativas entre si. Ademais, verifica-se que a modalidade VMM, que utiliza a ventilação natural por meio da abertura de janelas, apresenta médias de consumo superiores às de todas as modalidades de VMMF. Além disso, a condição VMMF (5,0 ACH) apresentou a menor média de consumo em comparação com VMMF (2,5 ACH) e VMMF (10,0 ACH).

FIGURA 36 – Diferenças das médias de consumo para São Paulo (Tukey 95% IC)



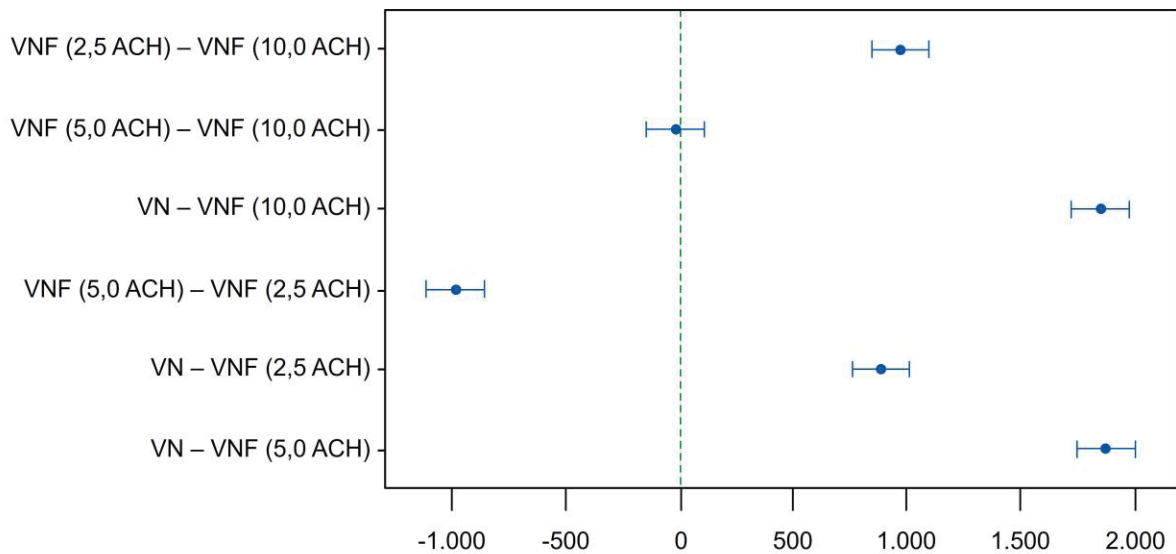
\*Se o intervalo não contém o valor zero, as médias correspondentes são significativamente diferentes

FONTE: O autor (2025).

As diferenças de médias obtidas pelo teste de Tukey para São Paulo (Figura 36) mostram que todos os modos de condicionamento apresentam diferenças estatisticamente significativas entre si. A maior diferença foi observada entre VMMF (2,5 ACH) e VMMF (10,0 ACH), indicando que a adoção da maior taxa de ventilação promoveu uma redução expressiva do consumo. Contudo, ao analisar o caso da VMM, em que a taxa de ventilação média supera 10 ACH, o teste de Tukey revela que essa modalidade apresenta consumo significativamente menor apenas em relação ao VMMF (2,5 ACH). Para os demais cenários, a VMM se mostrou menos eficiente.

A análise mostrou que, nesta localidade, a VMMF (10 ACH) apresentou o melhor desempenho energético, seguida pela VMMF (5 ACH). Em seguida, veio a VMM e, por último, a VMMF (2,5 ACH), que foi a menos eficiente em termos de energia. Esse resultado sugere a existência de um limite ótimo da taxa de ventilação, a partir do qual o aumento dela não gera ganhos adicionais em termos de economia de consumo para as combinações dos componentes testados.

FIGURA 37 – Diferenças das médias de consumo para Curitiba (Tukey 95% IC)



\*Se o intervalo não contém o valor zero, as médias correspondentes são significativamente diferentes

FONTE: O autor (2025).

O teste Tukey para Curitiba (Figura 37) mostra que não há diferença estatisticamente significativa entre os modos VMMF (5,0 ACH) e VMMF (10,0 ACH), indicando que aumentar a vazão de 5 para 10 ACH não reduz o consumo de forma significativa. No entanto, ambos se mostraram mais eficientes do que a taxa de ventilação de 2,5 ACH, enquanto a modalidade VMM foi a menos eficiente entre todos os modos de condicionamento avaliados.

O teste de Tukey, que compara as médias de consumo das diferentes combinações de componentes construtivos (Apêndice B), permitiu identificar quais combinações apresentam diferenças estatisticamente significativas entre si. Observa-se, na Tabela 25 do Apêndice B, que, em Fortaleza, as combinações apresentam consumos médios próximos entre si. A combinação parede externa 1 - CI 1 destacou-se como estatisticamente superior no consumo, enquanto a parede externa 3 - CI 09 situou-se no grupo de menor consumo. A maioria das combinações não apresentou distinção significativa, indicando que, sob os modos de condicionamento misto em Fortaleza, as variações entre componentes construtivos produziram, em sua maioria, diferenças marginais no consumo energético anual.

São Paulo e Curitiba apresentaram comportamento distinto em relação a Fortaleza (Tabelas 26 e 27 do Apêndice B), com maior dispersão estatística nas combinações de componentes construtivos. Enquanto a combinação da parede externa 1 com CI 01 apresentou o maior consumo, a combinação da parede externa 2 com CI 12 registrou o menor. A ampla variação de grupos indica que, nesses climas, as escolhas construtivas exercem influência mais significativa sobre o consumo energético combinada com estas condições de ventilação. Ainda assim, em São Paulo, observa-se uma sobreposição gradual entre os grupos intermediários, sugerindo que as diferenças se distribuem de forma mais progressiva (Tabela 26 do Apêndice B). Curitiba apresentou a menor quantidade de grupos em comparação a São Paulo, o que revela maior separação estatística entre os cenários (Tabela 27 do Apêndice B).

## 5 CONCLUSÕES

Este estudo avaliou o desempenho energético de diferentes estratégias operacionais para edifícios, categorizados em uso exclusivo de AC e condicionamento misto. O uso exclusivo de AC aplica esse sistema durante todos os períodos de ocupação. O condicionamento misto considera dois modos de operação: a VMM, caracterizada pela alternância entre VN, por abertura automática de janelas, e o sistema AC; e a VMMF, na qual a ventilação em condições naturais ocorre a diferentes taxas pré-definidas (2,5 ACH, 5,0 ACH e 10,0 ACH), também alternando com o AC.

O controle desenvolvido para os modos de condicionamento misto baseia-se no modelo de conforto térmico adaptativo da ASHRAE 55. As estratégias foram aplicadas a um edifício comercial em três localidades: Fortaleza, de clima quente e úmido (As); São Paulo, classificada como clima ameno (Cfa); e Curitiba, de clima temperado oceânico (Cfb). A análise considerou componentes construtivos com diferentes propriedades térmicas, incluindo elementos internos de distintas capacidades térmicas e paredes externas com três níveis de transmitância térmica.

No modo de uso exclusivo de AC, verificou-se que o aumento de massa térmica interna melhorou a eficiência energética em São Paulo e Curitiba, especialmente quando associado à envoltória de alta transmitância. Já no clima quente e úmido (Fortaleza), observou-se maior sensibilidade à transmitância térmica da envoltória, com melhor desempenho em construções internas leves associadas a paredes externas de baixa transmitância. As reduções de consumo devido a alterações nas combinações de componentes construtivos foram mais limitadas em Fortaleza do que nas demais localidades sob essa estratégia de condicionamento (AC). Em todos os climas, identificaram-se combinações limiáres da massa térmica, a partir das quais aumentos ou reduções adicionais fugiam à tendência de economia energética. As orientações dos escritórios atingiram um maior potencial de redução do consumo em São Paulo.

No modo VMM, as reduções de consumo decorrentes de alterações nas combinações de componentes construtivos foram mais significativas do que no uso exclusivo de AC. São Paulo apresentou a redução mais expressiva, de 12,90%, seguida por Curitiba, com 12,31%, e por Fortaleza, com apenas 4,11%. Os ganhos de desempenho energético nas três localidades ocorreram quando se combinou a construção interna pesada com envoltórias de baixa transmitância sob essa estratégia

de condicionamento (VMM). Em São Paulo, o aumento da massa térmica dos componentes construtivos gerou reduções de consumo consistentes, enquanto em Fortaleza e Curitiba foram identificadas combinações que apresentaram desempenho distinto dos padrões observados. Quando comparados com os consumos da estratégia exclusiva por sistema AC, Fortaleza apresentou casos que resultaram em queda no desempenho energético e as economias alcançadas foram limitadas. Em São Paulo e Curitiba, todos os cenários de VMM apresentaram reduções de energia em comparação aos cenários sob a estratégia exclusiva por AC, indicando alto potencial de aproveitamento da VN na redução das cargas térmicas do edifício. Nesta estratégia de condicionamento (VMM), as orientações dos escritórios geraram maiores variações no consumo em comparação aos cenários de uso exclusivo de AC.

Sob o modo VMMF, o aumento da taxa de ventilação de 2,5 ACH para 5,0 ACH resultou em redução do consumo em todas as combinações de componentes analisadas em Fortaleza. Entretanto, o aumento da taxa de ventilação para 10 ACH elevou o consumo em todos os cenários, sobretudo nas combinações de maior massa térmica. Isso indica que o aumento da taxa de ventilação nesta localidade apresenta um limite a partir do qual o consumo pode ser contraproducente para as combinações de componentes avaliadas. Similarmente, Curitiba apresentou desempenho energético mais consistente sob a taxa de ventilação de 5,0 ACH. No entanto, há potencial para reduções maiores no consumo ao combinar componentes internos de alta massa térmica com a máxima taxa de ventilação (10,0 ACH). Ademais, as condições de temperatura do ar externo em São Paulo permitiram a redução contínua da carga térmica à medida que aumentavam a taxa de ventilação e a massa térmica dos componentes.

As análises de correlação e regressão mostraram que a relação entre PHFT e consumo varia conforme a taxa de ventilação e a localidade. O alto PHFT nem sempre corresponde a melhores cenários de desempenho energético, e o consumo pode ser pouco explicado por essa correlação em alguns casos. A análise também mostrou que Fortaleza foi a localidade com menor tolerância ao aumento da taxa de ventilação, seguida por Curitiba. Em contrapartida, em São Paulo ocorre o maior aproveitamento da ventilação natural a taxas mais altas. No entanto, identificou-se um limite a esse benefício. A análise de variância e o teste de Tukey realizados mostraram modos de condicionamento mistos e combinações de componentes construtivos com diferenças estatisticamente significativas. Em São Paulo, todas as modalidades de

condicionamento misto mostraram-se estatisticamente diferentes. Entretanto, nem todas as variações de condicionamento misto geraram diferenças significativas em Fortaleza e em Curitiba, o que evidencia que ajustes na ventilação podem não impactar de forma relevante o consumo.

A implementação do controle de ventilação passiva por meio da abertura de janelas mostrou-se mais eficaz em São Paulo e Curitiba, com reduções significativas do consumo e da manutenção do conforto térmico em todas as combinações de componentes construtivos. No clima quente e úmido de Fortaleza, embora tenham ocorrido reduções, estas foram limitadas pela baixa responsividade da estratégia. Todavia, por meio da implementação de controle com taxas de ventilação pré-definidas, verificou-se que é possível otimizar a eficiência energética do edifício em todas as localidades, identificando a taxa de ventilação que proporciona o melhor acoplamento com a massa térmica dos componentes. Esses resultados fornecem subsídios para projetos de edificações energeticamente eficientes, adaptadas às condições climáticas locais.

## 6 LIMITAÇÕES

As seguintes limitações foram identificadas neste estudo:

- O módulo Airflow Network (AFN) não representa com precisão a abertura das janelas no que diz respeito ao comportamento térmico das superfícies envidraçadas. Mesmo que o AFN considere a janela completamente aberta, o programa mantém o vidro como parte da envoltória, sem alterar sua interação com o ambiente externo. Essa limitação faz com que as trocas de calor permaneçam constantes durante os períodos de ventilação natural, o que pode resultar na superestimação das cargas térmicas internas e na introdução de incertezas na avaliação do desempenho térmico da edificação.
- Em sistemas de condicionamento misto com ventilação assistida por *fans*, o desempenho energético e térmico do ambiente é influenciado não apenas pelo funcionamento do AC, mas também pelos equipamentos responsáveis pela movimentação e pelo controle do ar. Esses dispositivos consomem energia elétrica e podem introduzir ganhos térmicos no ambiente, especialmente quando operam com motores de maior potência. No entanto, na modelagem adotada neste estudo, tais componentes não foram considerados, sendo contabilizado apenas o consumo energético dos sistemas de ar-condicionado. Essa simplificação constitui uma limitação, pois desconsidera o impacto energético e térmico real dos equipamentos auxiliares que compõem o modo VMMF.

## REFERÊNCIAS

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15220-1: Desempenho térmico de edificações - Parte 1: Definições, símbolos e unidades**. 2024.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15220-2: Desempenho térmico de edificações - Parte 2 – Componentes e elementos construtivos das edificações — Resistência e transmitância térmica — Métodos de cálculo (ISO 6946:2017 MOD)**. 2022.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15220-3: Desempenho térmico de edificações - Parte 3: Zoneamento bioclimático por desempenho**. 2024.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR ISO 10456. Materiais e produtos de construção – Propriedades higrotérmicas – Valores e procedimentos de projeto tabulados para determinar valores térmicos declarados e de projeto**. 2022.

ACKERLY, K.; BRAGER, G. **Human Behavior Meets Building Intelligence: How Occupants Respond to “Open Window” Signals**. Berkeley: Center for the Built Environment, 2012. Disponível em: <https://escholarship.org/uc/item/0835d5w4>. Acesso em: 12 jan. 2024.

AFLAKI, A. *et al.* A review on natural ventilation applications through building façade components and ventilation openings in tropical climates. **Energy and Buildings**, v. 101, p. 153-162, 2015. DOI: [10.1016/j.enbuild.2015.04.033](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.04.033).

AGARWAL, N. *et al.* Indoor air quality improvement in COVID-19 pandemic: Review. **Sustainable Cities and Society**, v. 70, p. 102942, jul. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102942>.

AGUILERA, J. J. *et al.* Comfort-based control for mixed-mode buildings. **Energy and Buildings**, v. 252, p. 111465, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111465>.

ALLARD, F.; GHIAUS, C. **Natural Ventilation in the Urban Environment: Assessment and Design**. 2005. Disponível em: <https://www.routledge.com/Natural-Ventilation-in-the-Urban-Environment-Assessment-and-Design/Allard-Ghiaus/p/book/9781138994393>. Acesso em: 25 fev. 2024.

ALLOCCA, C.; CHEN, Q.; GLICKSMAN, L. R. Design analysis of single-sided natural ventilation. **Energy and Buildings**, v. 35, n. 8, p. 785–795, 2003. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00239-6](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00239-6).

ANDRÉ, Maíra *et al.* Achieving mid-rise NZEB offices in Brazilian urban centres: A control strategy with desk fans and extension of set point temperature. **Energy and Buildings**, v. 259, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.111911>.

ANVISA. BRASIL. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. **Resolução RE nº 9**, de 16 de janeiro de 2003. Determina a publicação de Orientação Técnica sobre Padrões Referenciais de Qualidade do Ar Interior, em ambientes climatizados artificialmente de uso público e coletivo. Diário Oficial da União: Seção 1, Brasília, DF, n. 14, p. 30, 20 jan. 2003.

ARENDDT, K.; KRZACZEK, M.; TEJCHMAN, J. Influence of input data on airflow network accuracy in residential buildings with natural wind- and stack-driven ventilation. **Building Simulation**, v. 10, n. 2, p. 229–238, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12273-016-0320-5>.

ARENS, E. *et al.* Moving air for comfort. *ASHRAE Journal*, v. 51, n. 5, p. 18-28, 2009. Disponível em: <https://escholarship.org/uc/item/6d94f90b>. Acesso em: 19 set 2024.

ARTMANN, N. *et al.* Climatic potential for passive cooling of buildings by night-time ventilation in Europe. *Applied Energy*, v. 84, n. 2, p. 187–201, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2006.05.004>.

ASHRAE Standard 55. **Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy**. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, 2013.

ASHRAE. 2025 ASHRAE Handbook: Fundamentals.: American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2025.

ATTIA, Shady; CARLUCCI, Salvatore. Impact of different thermal comfort models on zero energy residential buildings in hot climate. **Energy and Buildings**, v. 102, p.117–128, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.05.017>.

AYNSLEY, R. **Unresolved issues in natural ventilation for thermal comfort**. 1999. Disponível em: <https://www.aivc.org/resource/unresolved-issues-natural-ventilation-thermal-comfort>. Acesso em: 16 maio 2024.

BARBADILLA-MARTÍN, E. *et al.* Field study on adaptive thermal comfort in mixed mode office buildings in southwestern area of Spain. **Building and Environment**, v. 123, p. 163–175, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.06.042>.

BEN-DAVID, T.; WARING, M. S. Impact of natural versus mechanical ventilation on simulated indoor air quality and energy consumption in offices in fourteen U.S. cities. **Building and Environment**, v. 104, p. 320–336, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.05.007>.

BETTI, G. *et al.* CBE Clima Tool: A free and open-source web application for climate analysis tailored to sustainable building design. **Building Simulation**, v. 17, n. 3, p. 493–508, 2024.

BRAGER, G. S.; DE DEAR, R. J. Thermal adaptation in the built environment: a literature review. **Energy and Buildings**, v. 27, n. 1, p. 83–96, 1998. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(97\)00053-4](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(97)00053-4).

BRE, F.; GIMENEZ, J. M.; FACHINOTTI, V. D. Prediction of wind pressure coefficients on building surfaces using artificial neural networks. **Energy and Buildings**, v. 158, p. 1429–1441, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.11.045>.

BREESCH, H.; MEREMA, B. Ventilative Cooling and Control Systems. In: CHIESA, G.; KOLOKOTRONI, M.; HEISELBERG, P. (eds.). **Innovations in Ventilative Cooling**. Cham: Springer International Publishing, p. 125–138, 2021.

BUSCH, J. F. A tale of two populations: thermal comfort in air-conditioned and naturally ventilated offices in Thailand. **Energy and Buildings**, v. 18, n. 3, p. 235–249, 1992. DOI: [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(92\)90016-A](https://doi.org/10.1016/0378-7788(92)90016-A).

CARLUCCI, S. *et al.* Review of adaptive thermal comfort models in built environmental regulatory documents. **Building and Environment**, v. 137, p. 73–89, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.03.053>.

CHEN, Q. Ventilation performance prediction for buildings: A method overview and recent applications. **Building and Environment**, v. 44, n. 4, p. 848–858, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.05.025>.

CHEN, Y.; TONG, Z.; MALKAWI, A. Investigating natural ventilation potentials across the globe: regional and climatic variations. **Building and Environment**, v. 122, p. 386–396, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.06.026>.

CHEN, Yujiao *et al.* Achieving natural ventilation potential in practice: Control schemes and levels of automation. **Applied Energy**, v. 235, p. 1141–1152, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.11.016>.

CHEUNG, T. *et al.* Analysis of the accuracy on PMV – PPD model using the ASHRAE Global Thermal Comfort Database II. **Building and Environment**, v. 153, p. 205–217, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.01.055>.

CHO, J.; LEE, H.; HEO, Y. Dynamic rule-based change-over ventilation strategy with weather-responsive air-conditioning setpoints. **Building and Environment**, v. 246, p. 110966, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110966>.

CHOI, K. *et al.* Review of infiltration and airflow models in building energy simulations for providing guidelines to building energy modelers. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 181, p. 113327, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113327>.

CIAPPINA, J. C. P.; URBANO, M. R.; GIGLIO, T. G. F. Determinação de padrões comportamentais na operação dos sistemas de iluminação e climatização em edifícios comerciais. **Ambiente Construído**, v. 22, p. 71–94, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212022000100579>.

CLIMATE ONE BUILDING. **Climate.onebuilding.org**. 2025. Disponível em: <https://climate.onebuilding.org/>. Acesso em: 22 jul. 2025.

CÓSTOLA, D.; BLOCKEN, B.; HENSEN, J.L.M. Overview of pressure coefficient data in building energy simulation and airflow network programs. **Building and Environment**, v. 44, n. 10, p. 2027–2036, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.02.006>.

CRAWLEY, D. B. *et al.* Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs. **Part Special: Building Performance Simulation**, v. 43, n. 4, p. 661–673, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.10.027>.

DAVIS, L. W.; GERTLER, P. J. Contribution of air conditioning adoption to future energy use under global warming. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 112, n. 19, p. 5962-5967, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1423558112>.

DE DEAR, R. J. *et al.* Progress in thermal comfort research over the last twenty years. **Indoor Air**, v. 23, n. 6, p. 442–461, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1111/ina.12046>.

DE DEAR, R. J.; BRAGER, G. S. Thermal comfort in naturally ventilated buildings: revisions to ASHRAE Standard 55. **Energy and Buildings**, v. 34, n. 6, Special Issue on Thermal Comfort Standards, p. 549–561, 2002. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00005-1](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00005-1).

DE DEAR, R. J.; LEOW, K. G.; FOO, S. C. Thermal comfort in the humid tropics: Field experiments in air conditioned and naturally ventilated buildings in Singapore. **International Journal of Biometeorology**, v. 34, n. 4, p. 259–265, 1991. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01041840>.

DE DEAR, R.; BRAGER, G. S. The adaptive model of thermal comfort and energy conservation in the built environment. *International Journal of Biometeorology*, v. 45, n. 2, p. 100–108, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1007/s004840100093>.

DEAR, R.; BRAGER, G. Developing an adaptive model of thermal comfort and preference. Berkeley, CA: **Center for the Built Environment**, 1998. Disponível em: <https://escholarship.org/uc/item/4qq2p9c6>. Acesso em: 19/09/2024.

DOE, U. S. Department of Energy. **Application Guide for EMS**. 2025a.

DOE, U. S. Department of Energy. **EnergyPlus Essentials**. 2025b.

DOE, U. S. Department of Energy. **Getting Started**. 2025c.

DOE. U.S. EnergyPlus 22.1. Department of Energy, 2025d. Disponível em: <https://energyplus.net/downloads>.

DUBRUL, C. **TN 23: Inhabitant Behaviour with Respect to Ventilation – A Summary Report of IEA Annex VIII**. 1988. Disponível em: <https://www.aivc.org/resource/tn-23-inhabitant-behaviour-respect-ventilation-summary-report-iea-annex-viii>. Acesso em: 2 jun. 2023.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Atlas da Eficiência Energética Brasil 2024: Relatório de Indicadores**. Rio de Janeiro: EPE, 2024a. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/atlas-de-eficiencia-energetica-brasil-2024>. Acesso em: 19 abr. 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Atlas de Eficiência Energética**. Rio de Janeiro. 2023. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/atlas-de-eficiencia-energetica-brasil-2023>. Acesso em: 20 jul. 2024.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balço Energético Nacional 2025**. Rio de Janeiro, 2025. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-885/topico-767/BEN\\_S%C3%ADntese\\_2025\\_PT.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-885/topico-767/BEN_S%C3%ADntese_2025_PT.pdf). Acesso em: 01 set. 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balço Energético Nacional 2024**. Rio de Janeiro: EPE, 2024b. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2024>. Acesso em: 19 abr. 2025.

ETHERIDGE, D. W. Ventilation, air quality and airtightness in buildings. In: HALL, Matthew R. (ed.). **Materials for Energy Efficiency and Thermal Comfort in Buildings**. Cambridge: Woodhead Publishing, 2010. p. 77-100. DOI: <https://doi.org/10.1533/9781845699277.1.77>.

FANGER, P.O. Thermal Comfort. Danish Technical Press. Copenhagen. 1970. Disponível em: <https://www.scirp.org/reference/ReferencesPapers?ReferenceID=1120088>. Acesso em: 19 jul. 2024.

FEIJÓ-MUÑOZ, J. *et al.* Energy impact of the air infiltration in residential buildings in the Mediterranean area of Spain and the Canary islands. **Energy and Buildings**, v. 188–189, p. 226–238, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.02.023>.

FERNANDES, L. *et al.* Evaluation of discharge coefficients of large openable windows using full-scale samples in wind tunnel tests. **Revista Ingeniería de Construcción**, v. 35, n. 2, p. 203–214, 2020. Disponível em: <https://revistaingenieriaconstruccion.uc.cl/index.php/ric/article/view/40715>. Acesso em: 13 out. 2023.

FIORENTINI, M. *et al.* Development and evaluation of a comfort-oriented control strategy for thermal management of mixed-mode ventilated buildings. **Energy and Buildings**, v. 202, p. 109347, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109347>.

GAN, V. J. L. *et al.* Physics-based, data-driven approach for predicting natural ventilation of residential high-rise buildings. **Building Simulation**, v. 15, n. 1, p. 129–148, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12273-021-0784-9>.

GIVONI, B. **Passive and Low Energy Cooling of Buildings**. Toronto: John Wiley and Sons, Inc., 1994.

GOMIS, L. L.; FIORENTINI, M.; DALY, D. Potential and practical management of hybrid ventilation in buildings. **Energy and Buildings**, v. 231, p. 110597, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110597>.

GONZÁLEZ-TORRES, M.; PÉREZ-LOMBARD, L.; CORONEL, J. F.; MAESTRE, I. R.; YAN, D. A review on buildings energy information: trends, end-uses, fuels and drivers. **Energy Reports**, v. 8, p. 626-637, 2022. ISSN 2352-4847. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.11.280>.

GRAÇA, G. C.; LINDEN, P. Ten questions about natural ventilation of non-domestic buildings. **Building and Environment**, v. 107, p. 263–273, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.08.007>.

GRASSI, B. *et al.* A Review of Recent Literature on Systems and Methods for the Control of Thermal Comfort in Buildings. **Applied Sciences**, v. 12, n. 11, p. 5473, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12115473>.

GUARDIAN GLASS ANALYTICS®. 2025. Disponível em: <https://glassanalytics.guardian.com/app/configure>. Acesso em: 31 jul. 2024.

HAN, J. *et al.* Field study on occupants' thermal comfort and residential thermal environment in a hot-humid climate of China. **Building and Environment**, v. 42, n. 12, p. 4043–4050, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.06.028>.

HAUSFATHER, Z. State of the climate: 2024 will be first year above 1,5 °C of global warming. **Carbon Brief**, 7 nov. 2024. Disponível em: <https://www.carbonbrief.org/state-of-the-climate-2024-sets-a-new-record-as-the-first-year-above-1-5c/>. Acesso em: 27 jan. 2025.

HEISELBERG, P. **Design of Natural and Hybrid Ventilation**. Aalborg: Aalborg University, 2006. (DCE Lecture notes, n. 5).

HEISELBERG, P. Principles of hybrid ventilation. 2002. Disponível em: <https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/20346312>. Acesso em: 17 jan. 2024.

HESARAKI, A.; MYHREN, J. A.; HOLMBERG, S. Influence of different ventilation levels on indoor air quality and energy savings: A case study of a single-family house. **Sustainable Cities and Society**, v. 19, p. 165–172, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2015.08.004>.

HOLOPAINEN, R. *et al.* Comfort assessment in the context of sustainable buildings: Comparison of simplified and detailed human thermal sensation methods. **Building and Environment**, v. 71, p. 60–70, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.09.009>.

HU, Y. *et al.* Performance evaluation of ventilative cooling systems for buildings under different control parameters and strategies. **Journal of Building Engineering**, v. 65, p. 105627, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.105627>.

HULT, E. L.; IACCARINO, G.; FISCHER, M. Using CFD Simulations to Improve the Modeling of Window Discharge Coefficients. **Proceedings of SimBuild Conference 2012: 5th conference of IBPSA USA**. Madison: IBPSA USA, 2012. v. 5, p. 322-328. Disponível em:

[https://publications.ibpsa.org/conference/paper/?id=simbuild2012\\_05b\\_3\\_Hult](https://publications.ibpsa.org/conference/paper/?id=simbuild2012_05b_3_Hult).

Acesso em: 13 out. 2023.

HUMPHREYS, M. A; NICOL, J.F. The validity of ISO-PMV for predicting comfort votes in every-day thermal environments. **Energy and Buildings**, v. 34, n. 6, Special Issue on Thermal Comfort Standards, p. 667–684, 2002. DOI:

[https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00018-X](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00018-X).

IEA – International Energy Agency. Space cooling. Paris: IEA, set. 2023. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/space-cooling-2>. Acesso em: 20 nov. 2023.

IEA – International Energy Agency. The Future of Cooling: Opportunities for energy-efficient air conditioning. Paris: IEA, maio 2018. Disponível em:

<https://www.iea.org/reports/the-future-of-cooling>. Acesso em: 05 mar. 2023.

ISO 7730. **Ergonomics of the thermal environment — analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria**. Geneva: International Organization for Standardization, 2005.

KANDELOUSI, M. S. **AVAC System**. BoD – Books on Demand, 2018. DOI:

<http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.73114>.

KATO, S. Review of airflow and transport analysis in building using CFD and network model. **JAPAN ARCHITECTURAL REVIEW**, v. 1, n. 3, p. 299–309, 2018. DOI:

<https://doi.org/10.1002/2475-8876.12051>.

KENT, Michael G. *et al.* Energy savings and thermal comfort in a zero energy office building with fans in Singapore. **Building and Environment**, v. 243, 2023. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110674>.

KIM, J.; DE DEAR, R. Is mixed-mode ventilation a comfortable low-energy solution? A literature review. **Building and Environment**, v. 205, p. 108215, 2021. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108215>.

KIM, M. K.; BALDINI, L. Energy analysis of a decentralized ventilation system compared with centralized ventilation systems in European climates: Based on review of analyses. **Energy and Buildings**, v. 111, p. 424–433, 2016. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.11.044>.

KLEIVEN, T. **Natural ventilation in buildings: architectural concepts, consequences and possibilities**. 2003. Tese (Doutorado) - Institutt for arkitektur og teknologi, Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, Trondheim, 2003.

Disponível em: <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/handle/11250/231090>. Acesso em: 04 fev. 2024.

KOLOKOTRONI, M. *et al.* **Ventilative cooling: state-of-the-art review**. Air Infiltration and Ventilation Centre (AIVC), Energy in Buildings & Communities Programme – Annex 62 Ventilative Cooling, 2015. Disponível em: <https://www.aivc.org/resource/ventilative-cooling-state-art-review>. Acesso em: 15 jan. 2025.

KOLOKOTRONI, M.; WEBB, B. C.; HAYES, S. D. Summer cooling with night ventilation for office buildings in moderate climates. **Energy and Buildings**, v. 27, n. 3, p. 231–237, 1998. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(97\)00048-0](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(97)00048-0).

KRELLING, A. F. *et al.* A thermal performance standard for residential buildings in warm climates: lessons learned in Brazil. **Energy and Buildings**, v. 281, p. 112770, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112770>.

KRÓL, M. *et al.* Wind driven natural flow through the different types of openings on the façade – An experimental investigation. **Journal of Building Engineering**, v. 71, p. 106491, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.106491>.

KUCZYŃSKI, T. *et al.* Effect of thermal mass, night ventilation and window shading on summer thermal comfort of buildings in a temperate climate. **Building and Environment**, v. 204, p. 108126, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108126>.

KWOK, A. G. Thermal comfort in tropical classrooms. 1998. Disponível em: <https://www.osti.gov/biblio/649433>. Acesso em: 14 dez. 2023.

KWONG, Q. J.; ADAM, N. M.; SAHARI, B. B. Thermal comfort assessment and potential for energy efficiency enhancement in modern tropical buildings: A review. **Energy and Buildings**, v. 68, p. 547–557, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.09.034>.

LEI, Z. *et al.* Effect of natural ventilation on indoor air quality and thermal comfort in dormitory during winter. **Building and Environment**, v. 125, p. 240–247, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.08.051>.

LI, X.; WEN, J. Review of building energy modeling for control and operation. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 37, p. 517–537, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.056>.

LIDDAMENT, M. W. **A Guide to Energy Efficient Ventilation**. 1996. Disponível em: <https://www.aivc.org/resource/gv-guide-energy-efficient-ventilation>. Acesso em: 17 jul. 2024.

LIDDAMENT, M. W. **Air Infiltration Calculation Techniques – An Applications Guide**. 1986. Disponível em: <https://www.aivc.org/resource/air-infiltration-calculation-techniques-applications-guide>. Acesso em: 16 jul. 2024.

LÓPEZ-CABEZA, V. P. *et al.* Effect of thermal inertia and natural ventilation on user comfort in courtyards under warm summer conditions. **Building and Environment**, v. 228, p. 109812, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109812>.

- LUO, M. *et al.* Evaluating thermal comfort in mixed-mode buildings: a field study in a subtropical climate. **Building and Environment**, v. 88, p. 46–54, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.06.019>.
- MCCARTNEY, K. J.; HUMPHREYS, M. A. Thermal comfort and productivity. **Proceedings of Indoor Air**, v. 2002, p. 822-827, 2002.
- MENASSA, C. C.; TAYLOR, N.; NELSON, J. A framework for automated control and commissioning of hybrid ventilation systems in complex buildings. **Automation in Construction**, v. 30, p. 94–103, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.11.022>.
- MENDES, V. F. *et al.* A systematic review of methods for evaluating the thermal performance of buildings through energy simulations. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 189, p. 113875, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113875>.
- MENG, X. *et al.* Experimental study on the performance of hybrid buoyancy-driven natural ventilation with a mechanical exhaust system in an industrial building. **Energy and Buildings**, v. 208, p. 109674, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109674>.
- MOSTAFAVI SANI, H.; SHOKOUHMAND, H. Integrating energy efficiency and health safety in building design: A multi-objective optimization approach to minimize virus transmission risk. **Journal of Building Engineering**, v. 86, p. 108839, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.108839>.
- NAIR, A. N. *et al.* A review of strategies and their effectiveness in reducing indoor airborne transmission and improving indoor air quality. **Environmental Research**, v. 213, p. 113579, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113579>.
- NATIONAL CENTERS FOR ENVIRONMENTAL INFORMATION (NCEI). Global Climate Report – Annual 2024. Asheville, NC: NOAA NCEI, 10 jan. 2025. Disponível em: <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/monthly-report/global/202413>. Acesso em: 17 fev. 2025.
- NAWAZ, A.; JAVED, A.; RAJA, U. M. Impact of workspace design on employee's productivity: a case study of public sector universities in Hazara division. **International Journal of Sustainable Real Estate and Construction Economics**, v. 1, n. 3, p. 201–214, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1504/IJSRECE.2019.097646>.
- NICOL, J.F.; HUMPHREYS, M.A. Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings. **Energy and Buildings**, v. 34, n. 6, p. 563–572, 2002. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00006-3](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00006-3).
- NIU, D.; ZHANG, S. Outdoor thermal condition based-segmented intermittent demand-controlled ventilation for constant-air-volume system. **Building and Environment**, v. 244, p. 110815, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110815>.

O'DONNAN, Adam *et al.* **Ventilative cooling design guide**. 2018. Disponível em: <https://www.aivc.org/resource/ventilative-cooling-design-guide>. Acesso em: 20 jul. 2024.

OHBA, M.; LUN, I. Overview of natural cross-ventilation studies and the latest simulation design tools used in building ventilation-related research. **Advances in Building Energy Research**, v. 4, n. 1, p. 127–166, 2010. DOI: <https://doi.org/10.3763/aber.2009.0405>.

OMRANI, S. *et al.* Natural ventilation in multi-storey buildings: Design process and review of evaluation tools. **Building and Environment**, v. 116, p. 182–194, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.02.012>.

ORME, M; LEKSMONO, N. **GU 5: Ventilation Modelling Data Guide**. 2002. Disponível em: <https://www.aivc.org/resource/gu-5-ventilation-modelling-data-guide>. Acesso em: 17 jul. 2024.

PAN, Y. *et al.* Building energy simulation and its application for building performance optimization: A review of methods, tools, and case studies. **Advances in Applied Energy**, v. 10, p. 100135, 2023.

PARK, Kyung-Yong *et al.* Impact of Hybrid Ventilation Strategies in Energy Savings of Buildings: In Regard to Mixed-Humid Climate Regions. **Energies**, v. 15, n. 6, p. 1960, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15061960>.

PEEL, M. C.; FINLAYSON, B. L.; MCMAHON, T. A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 11, n. 5, p. 1633–1644, 2007. DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>.

PENG, Y. *et al.* Hybrid system controls of natural ventilation and AVAC in mixed-mode buildings: A comprehensive review. **Energy and Buildings**, v. 276, p. 112509, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112509>.

PENNYCOOK, K. A. **The illustrated guide to ventilation**. Bracknell: BSRIA, 2009. Disponível em: [https://www.aivc.org/sites/default/files/Illustrated\\_Guide\\_to\\_Ventilation.pdf](https://www.aivc.org/sites/default/files/Illustrated_Guide_to_Ventilation.pdf). Acesso em: 29 set. 2024

PEREIRA, P. F.; RAMOS, N. M. M. The impact of mechanical ventilation operation strategies on indoor CO<sub>2</sub> concentration and air exchange rates in residential buildings. **Indoor and Built Environment**, v. 30, n. 9, p. 1516–1530, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1177/1420326X20960767>.

PORSANI, G. B. *et al.* Empirical evaluation of EnergyPlus infiltration model for a case study in a high-rise residential building. **Energy and Buildings**, v.296, p. 113322, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113322>.

PRIGNON, M.; VAN MOESEKE, G. Factors influencing airtightness and airtightness predictive models: A literature review. **Energy and Buildings**, v. 146, p. 87–97, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.04.062>.

PROJETEEE – PROJETANDO EDIFICAÇÕES ENERGETICAMENTE EFICIENTES. 2025. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/projeteee/>. Acesso em: 30 jul. 2024.

PSOMAS, T. *et al.* Automated roof window control system to address overheating on renovated houses: Summertime assessment and intercomparison. **Energy and Buildings**, v. 138, p. 35–46, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.12.019>.

PSOMAS, T. *et al.* Overheating risk barriers to energy renovations of single family houses: Multicriteria analysis and assessment. **Energy and Buildings**, v. 117, p. 138–148, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.02.031>.

RAMPONI, R.; ANGELOTTI, A.; BLOCKEN, B. Energy saving potential of night ventilation: Sensitivity to pressure coefficients for different European climates. **Applied Energy**, v. 123, p. 185–195, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.02.041>.

RUPP, R. F.; VÁSQUEZ, N. G.; LAMBERTS, R. A review of human thermal comfort in the built environment. **Energy and Buildings**, v. 105, p. 178–205, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.07.047>.

SALCIDO, J. C.; RAHEEM, A. A.; ISSA, R. R. A. From simulation to monitoring: Evaluating the potential of mixed-mode ventilation (MMV) systems for integrating natural ventilation in office buildings through a comprehensive literature review. **Energy and Buildings**, v. 127, p. 1008–1018, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.06.054>.

SCHWEIKER, M. *et al.* Review of multi-domain approaches to indoor environmental perception and behaviour. **Building and Environment**, v. 176, p. 106804, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106804>.

SHAHCHERAGHIAN, A.; MADANI, H.; ILINCA, A. From White to Black- Box Models: A Review of Simulation Tools for Building Energy Management and Their Application in Consulting Practices. **Energies**, v. 17, n. 2, p. 376, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/en17020376>.

SORGATO, M. J. **Desempenho térmico de edificações residenciais unifamiliares ventiladas naturalmente**. 2009. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2009.

SORGATO, M. J.; MELO, A. P.; LAMBERTS, R. The effect of window opening ventilation control on residential building energy consumption. **Energy and Buildings**, v. 133, p. 1–13, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.09.059>.

SORGATO, M. J.; SCHNEIDER, K.; RÜTHER, R. Technical and economic evaluation of thin-film CdTe building-integrated photovoltaics (BIPV) replacing façade and rooftop materials in office buildings in a warm and sunny climate. **Renewable Energy**, v. 118, p. 84–98, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.10.091>.

SOUSA, F. P.; SILVA, A. S. **Manual de Introdução à Simulação do Desempenho de Edifícios: Um Curso para Iniciantes no Software EnergyPlus™**. Campo Grande, MS. 2021. Disponível em: [https://ppgees.ufms.br/files/2021/04/MANUAL\\_de\\_introducao\\_%C3%A0\\_simulacao\\_catalogado-19.04.2021.pdf](https://ppgees.ufms.br/files/2021/04/MANUAL_de_introducao_%C3%A0_simulacao_catalogado-19.04.2021.pdf). Acesso em: 13 out. 2023.

SU, X. *et al.* Human thermal comfort in non-uniform thermal environments: A review. **Energy and Built Environment**, v. 5, n. 6, p. 853–862, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2023.06.012>.

SWAMI, M. V; CHANDRA, S. **Correlations for pressure distribution on buildings and calculation of natural ventilation airflow**. 1988. Disponível em: [https://www.aivc.org/sites/default/files/airbase\\_3362.pdf](https://www.aivc.org/sites/default/files/airbase_3362.pdf). Acesso em: 16 maio 2024.

SZOKOLAY, S. V. Climate analysis based on the psychrometric chart. **International Journal of Ambient Energy**, v. 7, n. 4, p. 171–182, 1986. DOI: <https://doi.org/10.1080/01430750.1986.9675499>.

TOGNON, G. *et al.* Mechanical, natural and hybrid ventilation systems in different building types: Energy and indoor air quality analysis. **Journal of Building Engineering**, v. 76, p. 107060, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.107060>.

TRČKA, M.; HENSEN, J. L.M. Overview of AVAC system simulation. **Automation in Construction**, v. 19, n. 2, p. 93–99, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2009.11.019>.

VASATURO, R. *et al.* On the effect of pressure coefficient source on the energy demand of an isolated cross-ventilated building. **Building and Environment**, v. 255, p. 111436, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111436>.

WOOD, A.; SALIB, R. (ed.). **Guide To Natural Ventilation in High Rise Office Buildings**. London: Routledge, 2012. DOI: <https://doi.org/10.4324/9780203720042>.

XIE, X. *et al.* Use of wind pressure coefficients to simulate natural ventilation and building energy for isolated and surrounded buildings. **Building and Environment**, v. 230, p. 109951, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109951>.

YAMAMOTO, N. Control technologies. In: YAMAMOTO, Naomichi (ed.). **Fundamentals of Bioaerosols Science**: Elsevier, 2023. cap. 7, p. 359-397. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824411-1.00001-6>.

YANG, W.; ZHANG, G. Air movement preferences observed in naturally ventilated buildings in humid subtropical climate zone in China. **International Journal of Biometeorology**, v. 53, n. 6, p. 563–573, 2009. DOI: [10.1007/s00484-009-0246-z](https://doi.org/10.1007/s00484-009-0246-z).

YU, Y. *et al.* Optimization control strategy for mixed-mode buildings based on thermal comfort model: A case study of office buildings. **Applied Energy**, v. 358, p. 122627, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.122627>.

ZHAI, Z.; JOHNSON, M.; KRARTI, M. Assessment of natural and hybrid ventilation models in whole-building energy simulations. **Energy and Buildings**, v. 43, n. 9, p. 2251–2261, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.06.026>.

ZHONG, Huai-Yu *et al.* Single-sided natural ventilation in buildings: a critical literature review. **Building and Environment**, v. 212, p. 108797, 2022. DOI: [10.1016/j.buildenv.2022.108797](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.108797).

ZHOU, J. *et al.* Effects of elevated air speed on thermal comfort in hot-humid climate and the extended summer comfort zone. **Energy and Buildings**, v. 287, p.112953, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.112953>.

## APÊNDICE A – INDICADORES DE DESEMPENHO PARA TODOS OS CASOS SIMULADOS

TABELA 20 - Consumo para as combinações de componentes construtivos sob condicionamento por AC

		AC		
		FOR	SP	CWB
		Consumo (kWh)	Consumo (kWh)	Consumo (kWh)
Parede ext. 1	CI 01	60.415,29	42.853,54	40.031,68
	CI 02	60.535,22	42.717,84	39.841,84
	CI 03	60.383,41	42.529,85	39.598,21
	CI 04	60.487,73	42.421,98	39.448,16
	CI 05	60.527,89	42.413,59	39.408,86
	CI 06	60.625,16	42.315,96	39.274,06
	CI 07	60.526,80	42.215,80	39.170,58
	CI 08	60.655,93	42.197,12	39.103,53
	CI 09	60.498,22	42.051,61	38.956,97
	CI 10	60.590,50	42.040,82	38.902,43
	CI 11	60.601,92	42.001,53	38.856,65
	CI 12	60.806,55	41.995,37	38.808,34
Parede ext. 2	CI 01	59.990,85	42.852,62	40.072,21
	CI 02	60.103,59	42.732,37	39.899,54
	CI 03	59.937,99	42.580,34	39.702,20
	CI 04	60.046,08	42.480,95	39.562,31
	CI 05	60.112,75	42.488,38	39.542,27
	CI 06	60.207,55	42.399,13	39.415,92
	CI 07	60.126,95	42.300,91	39.321,34
	CI 08	60.339,43	42.289,55	39.263,01
	CI 09	60.092,36	42.160,37	39.133,74
	CI 10	60.293,01	42.157,10	39.085,71
	CI 11	60.186,25	42.119,63	39.052,18
	CI 12	60.388,24	42.121,14	39.009,39
Parede ext. 3	CI 01	59.659,57	42.930,53	40.198,85
	CI 02	59.778,19	42.823,93	40.042,67
	CI 03	59.646,07	42.703,64	39.885,37
	CI 04	59.738,71	42.612,10	39.755,72
	CI 05	59.756,09	42.633,97	39.761,25
	CI 06	59.837,73	42.549,37	39.641,27
	CI 07	59.770,78	42.451,26	39.553,49
	CI 08	59.983,35	42.445,90	39.503,27
	CI 09	59.726,81	42.333,97	39.393,64
	CI 10	59.919,48	42.338,15	39.353,29

	<b>CI 11</b>	59.807,31	42.301,91	39.332,10
	<b>CI 12</b>	59.998,86	42.309,37	39.295,95

Fonte: O autor (2025)

TABELA 11 - Consumo para as combinações de componentes construtivos sob estratégia de VMM

		VMM					
		FOR		SP		CWB	
		Consumo (kWh)	PHFT (%)	Consumo (kWh)	PHFT (%)	Consumo (kWh)	PHFT (%)
<b>Parede ext. 1</b>	<b>CI 01</b>	61.411,55	14,25%	40.227,78	32,05%	39.076,56	24,53%
	<b>CI 02</b>	60.837,18	15,70%	39.578,52	35,24%	38.495,11	27,29%
	<b>CI 03</b>	60.560,29	15,96%	38.927,55	37,74%	37.840,40	30,01%
	<b>CI 04</b>	60.378,50	17,26%	38.306,47	41,10%	37.248,42	32,88%
	<b>CI 05</b>	60.307,12	16,57%	38.113,41	42,02%	37.172,05	33,45%
	<b>CI 06</b>	60.126,20	17,83%	37.503,92	45,24%	36.616,84	36,40%
	<b>CI 07</b>	59.786,34	17,22%	37.322,23	45,16%	36.567,64	35,95%
	<b>CI 08</b>	59.998,64	17,98%	36.973,30	47,56%	36.061,57	38,74%
	<b>CI 09</b>	59.211,32	18,58%	36.562,15	49,22%	35.768,19	40,14%
	<b>CI 10</b>	59.314,79	19,11%	36.132,97	51,87%	35.202,48	43,59%
	<b>CI 11</b>	59.315,17	18,99%	35.987,01	52,63%	35.142,74	43,67%
	<b>CI 12</b>	59.762,08	19,55%	35.601,79	55,12%	34.787,19	45,94%
<b>Parede ext. 2</b>	<b>CI 01</b>	61.248,02	13,60%	39.657,43	35,13%	38.682,06	27,44%
	<b>CI 02</b>	60.526,55	15,11%	39.093,18	37,93%	38.073,84	30,38%
	<b>CI 03</b>	60.380,92	15,53%	38.368,97	41,52%	37.570,45	32,79%
	<b>CI 04</b>	59.894,89	16,87%	37.707,51	45,14%	36.951,65	36,02%
	<b>CI 05</b>	59.846,04	16,24%	37.568,12	45,50%	36.898,33	36,39%
	<b>CI 06</b>	59.711,13	17,38%	37.112,12	48,15%	36.194,21	40,23%
	<b>CI 07</b>	59.313,55	16,93%	36.970,29	47,59%	36.234,97	39,28%
	<b>CI 08</b>	59.729,64	17,60%	36.622,92	50,33%	35.720,74	42,31%
	<b>CI 09</b>	59.022,81	18,24%	36.227,49	52,32%	35.313,58	44,32%
	<b>CI 10</b>	59.038,37	18,73%	35.766,69	55,34%	34.880,63	46,80%
	<b>CI 11</b>	59.016,90	18,84%	35.633,23	55,71%	34.841,55	46,79%
	<b>CI 12</b>	59.190,79	19,40%	35.306,45	57,86%	34.475,81	49,02%
<b>Parede ext. 3</b>	<b>CI 01</b>	60.996,74	12,43%	39.214,52	37,72%	38.385,94	30,57%
	<b>CI 02</b>	60.622,03	14,19%	38.439,99	42,16%	37.641,17	34,41%
	<b>CI 03</b>	59.772,71	14,60%	37.859,20	45,14%	37.107,93	37,02%
	<b>CI 04</b>	59.754,16	15,98%	37.375,99	47,89%	36.504,76	40,19%
	<b>CI 05</b>	59.556,25	15,52%	37.320,10	48,14%	36.480,55	40,24%
	<b>CI 06</b>	59.138,08	16,71%	36.750,35	51,44%	35.836,38	43,77%
	<b>CI 07</b>	59.364,44	15,80%	36.600,80	51,07%	35.872,52	42,87%
	<b>CI 08</b>	59.462,67	16,51%	36.306,37	53,51%	35.364,65	45,94%
	<b>CI 09</b>	58.975,66	17,41%	35.846,26	55,31%	34.978,11	47,80%

	<b>CI 10</b>	59.061,70	18,00%	35.548,59	57,62%	34.633,77	49,98%
	<b>CI 11</b>	58.883,86	18,00%	35.339,30	57,90%	34.642,27	49,64%
	<b>CI 12</b>	59.417,93	18,54%	35.038,63	60,00%	34.265,40	51,99%

Fonte: O autor (2025)

TABELA 22 - Consumo para as combinações de componentes construtivos sob estratégia VMMF com taxa de ventilação de 2,5 ACH

		VMMF (2,5 ACH)					
		FOR		SP		CWB	
		Consumo (kWh)	PHFT (%)	Consumo (kWh)	PHFT (%)	Consumo (kWh)	PHFT (%)
<b>Parede ext. 1</b>	<b>CI 01</b>	58.648,12	7,15%	39.733,82	34,39%	37.537,63	29,99%
	<b>CI 02</b>	58.582,66	8,04%	39.228,69	38,60%	37.027,53	33,92%
	<b>CI 03</b>	58.351,35	8,29%	38.651,31	43,38%	36.341,49	39,80%
	<b>CI 04</b>	58.287,47	9,05%	38.205,01	47,05%	35.944,28	42,94%
	<b>CI 05</b>	58.352,35	8,45%	38.083,39	48,32%	35.814,73	44,63%
	<b>CI 06</b>	58.258,66	9,27%	37.697,49	51,40%	35.458,10	47,99%
	<b>CI 07</b>	58.209,61	8,76%	37.531,70	51,58%	35.270,96	48,23%
	<b>CI 08</b>	58.308,21	9,15%	37.292,35	53,88%	34.993,58	50,89%
	<b>CI 09</b>	57.921,45	9,63%	36.979,84	55,91%	34.658,26	54,47%
	<b>CI 10</b>	58.016,51	10,00%	36.838,28	57,36%	34.409,04	57,17%
	<b>CI 11</b>	58.008,18	10,01%	36.688,62	58,53%	34.265,30	58,61%
	<b>CI 12</b>	58.078,32	10,40%	36.535,99	60,09%	34.088,43	60,27%
<b>Parede ext. 2</b>	<b>CI 01</b>	58.289,47	6,53%	39.510,37	37,46%	37.339,15	33,70%
	<b>CI 02</b>	58.216,92	7,42%	38.986,50	42,05%	36.859,64	37,71%
	<b>CI 03</b>	57.987,44	7,72%	38.496,03	45,65%	36.234,73	43,54%
	<b>CI 04</b>	57.911,98	8,49%	38.140,58	48,83%	35.781,31	47,75%
	<b>CI 05</b>	58.085,81	7,99%	38.072,06	49,22%	35.647,31	49,80%
	<b>CI 06</b>	57.964,48	8,80%	37.730,74	51,95%	35.315,91	52,68%
	<b>CI 07</b>	57.955,35	8,37%	37.551,64	52,35%	35.172,28	52,81%
	<b>CI 08</b>	57.908,93	8,71%	37.362,18	54,06%	34.946,61	55,09%
	<b>CI 09</b>	57.687,72	9,25%	37.086,60	56,17%	34.655,39	57,67%
	<b>CI 10</b>	57.614,59	9,51%	36.918,98	57,89%	34.431,04	60,09%
	<b>CI 11</b>	57.695,43	9,45%	36.800,33	58,88%	34.312,27	61,54%
	<b>CI 12</b>	57.761,28	9,78%	36.656,11	60,48%	34.119,45	63,36%
<b>Parede ext. 3</b>	<b>CI 01</b>	58.077,81	5,68%	39.390,44	39,66%	37.222,32	37,94%
	<b>CI 02</b>	57.911,16	6,59%	38.934,76	43,37%	36.745,20	42,26%
	<b>CI 03</b>	57.828,88	6,77%	38.559,61	46,37%	36.212,28	47,70%
	<b>CI 04</b>	57.578,51	7,74%	38.195,45	49,41%	35.729,39	51,96%
	<b>CI 05</b>	57.793,00	7,34%	38.208,09	49,31%	35.716,12	52,77%
	<b>CI 06</b>	57.679,84	8,12%	37.890,31	52,13%	35.285,69	56,77%
	<b>CI 07</b>	57.683,73	7,76%	37.711,68	52,32%	35.248,56	55,38%

	<b>CI 08</b>	57.754,69	8,14%	37.536,25	54,08%	35.033,66	57,89%
	<b>CI 09</b>	57.438,23	8,51%	37.230,78	56,21%	34.721,14	61,10%
	<b>CI 10</b>	57.508,78	8,86%	37.106,10	57,31%	34.553,71	62,94%
	<b>CI 11</b>	57.427,60	8,71%	37.020,76	57,64%	34.450,30	64,54%
	<b>CI 12</b>	57.486,19	9,10%	36.914,99	58,73%	34.287,24	66,20%

Fonte: O autor (2025)

TABELA 23 - Consumo para as combinações de componentes construtivos sob estratégia VMMF com taxa de ventilação de 5,0 ACH

		VMMF (5,0 ACH)					
		FOR		SP		CWB	
		Consumo (kWh)	PHFT (%)	Consumo (kWh)	PHFT (%)	Consumo (kWh)	PHFT (%)
<b>Parede ext. 1</b>	<b>CI 01</b>	58.045,29	9,59%	38.881,70	35,55%	36.787,58	31,52%
	<b>CI 02</b>	57.855,44	10,93%	38.356,26	39,40%	36.194,85	35,11%
	<b>CI 03</b>	57.653,43	11,06%	37.745,90	43,52%	35.479,95	39,68%
	<b>CI 04</b>	57.538,32	11,96%	37.275,69	47,11%	35.034,05	42,89%
	<b>CI 05</b>	57.617,40	11,30%	37.197,62	47,56%	34.904,64	43,43%
	<b>CI 06</b>	57.484,63	12,20%	36.863,87	49,97%	34.560,46	46,16%
	<b>CI 07</b>	57.374,83	11,96%	36.626,91	50,79%	34.371,42	46,65%
	<b>CI 08</b>	57.413,69	12,51%	36.390,55	53,00%	34.109,10	48,77%
	<b>CI 09</b>	57.015,38	13,03%	36.010,15	55,89%	33.722,99	51,73%
	<b>CI 10</b>	57.069,29	13,49%	35.703,62	58,35%	33.491,07	53,70%
	<b>CI 11</b>	57.134,48	13,24%	35.610,16	58,95%	33.374,41	54,39%
	<b>CI 12</b>	57.144,92	13,78%	35.333,44	61,50%	33.177,57	56,31%
<b>Parede ext. 2</b>	<b>CI 01</b>	57.703,32	8,94%	38.501,98	39,12%	36.459,79	34,91%
	<b>CI 02</b>	57.514,56	10,21%	37.931,49	43,43%	35.880,96	39,01%
	<b>CI 03</b>	57.299,41	10,46%	37.516,94	46,23%	35.268,89	42,91%
	<b>CI 04</b>	57.173,89	11,39%	37.104,32	49,29%	34.820,49	46,29%
	<b>CI 05</b>	57.367,90	10,81%	36.948,52	50,77%	34.694,51	47,04%
	<b>CI 06</b>	57.183,40	11,79%	36.564,20	53,99%	34.335,65	49,75%
	<b>CI 07</b>	57.158,77	11,44%	36.466,28	53,37%	34.215,06	49,74%
	<b>CI 08</b>	57.051,84	11,93%	36.219,52	55,85%	33.953,98	52,33%
	<b>CI 09</b>	56.820,41	12,52%	35.856,95	58,53%	33.628,50	54,75%
	<b>CI 10</b>	56.725,36	12,80%	35.629,62	60,62%	33.469,41	56,50%
	<b>CI 11</b>	56.820,80	12,70%	35.497,03	61,44%	33.330,85	56,97%
	<b>CI 12</b>	56.868,16	13,04%	35.324,31	63,11%	33.179,67	58,87%
<b>Parede ext. 3</b>	<b>CI 01</b>	57.524,92	7,97%	38.278,39	41,72%	36.211,72	38,41%
	<b>CI 02</b>	57.243,53	9,27%	37.811,32	45,12%	35.600,24	42,83%
	<b>CI 03</b>	57.096,08	9,77%	37.226,83	49,95%	35.096,82	46,30%
	<b>CI 04</b>	56.860,02	10,58%	36.831,03	53,15%	34.622,57	50,03%
	<b>CI 05</b>	57.075,56	10,21%	36.703,41	54,23%	34.594,09	50,67%

	<b>CI 06</b>	56.915,10	11,12%	36.405,81	56,89%	34.208,00	53,44%
	<b>CI 07</b>	56.964,15	10,52%	36.312,47	56,14%	34.153,01	52,84%
	<b>CI 08</b>	56.980,52	11,08%	36.128,38	58,04%	33.957,03	54,41%
	<b>CI 09</b>	56.630,85	11,56%	35.812,53	60,20%	33.602,79	57,39%
	<b>CI 10</b>	56.627,96	12,16%	35.629,31	62,07%	33.406,46	59,26%
	<b>CI 11</b>	56.579,45	11,89%	35.479,52	63,14%	33.315,27	60,13%
	<b>CI 12</b>	56.631,71	12,26%	35.288,57	65,22%	32.995,80	63,31%

TABELA 24 - Consumo para as combinações de componentes construtivos sob estratégia VMMF com taxa de ventilação de 10,0 ACH

		VMMF (10,0 ACH)					
		FOR		SP		CWB	
		Consumo (kWh)	PHFT (%)	Consumo (kWh)	PHFT (%)	Consumo (kWh)	PHFT (%)
<b>Parede ext. 1</b>	<b>CI 01</b>	58.123,33	13,74%	38.774,57	33,08%	37.260,32	25,39%
	<b>CI 02</b>	57.959,78	15,02%	38.220,86	36,53%	36.650,27	29,03%
	<b>CI 03</b>	57.773,30	15,32%	37.566,42	40,46%	36.030,60	31,84%
	<b>CI 04</b>	57.630,62	16,42%	37.097,47	43,01%	35.316,74	36,37%
	<b>CI 05</b>	57.721,69	15,67%	37.003,63	43,99%	35.223,86	36,90%
	<b>CI 06</b>	57.554,85	16,80%	36.446,33	47,63%	34.673,05	40,31%
	<b>CI 07</b>	57.624,75	16,06%	36.294,63	47,31%	34.535,25	39,60%
	<b>CI 08</b>	57.712,39	16,59%	35.913,32	50,16%	34.107,80	43,13%
	<b>CI 09</b>	58.099,92	17,23%	35.454,57	52,96%	33.751,03	45,58%
	<b>CI 10</b>	58.177,18	17,86%	35.238,10	54,82%	33.372,25	48,21%
	<b>CI 11</b>	58.190,75	17,58%	35.172,37	54,90%	33.313,34	48,96%
	<b>CI 12</b>	58.281,37	18,13%	34.873,64	57,21%	33.042,05	50,73%
<b>Parede ext. 2</b>	<b>CI 01</b>	57.908,22	13,02%	38.415,72	35,92%	36.876,31	29,25%
	<b>CI 02</b>	57.546,83	14,44%	37.725,81	40,40%	36.217,10	32,89%
	<b>CI 03</b>	57.420,10	14,81%	37.269,77	43,01%	35.579,78	36,38%
	<b>CI 04</b>	57.300,38	15,83%	36.610,99	47,50%	34.948,45	40,30%
	<b>CI 05</b>	58.066,14	15,22%	36.550,34	47,87%	34.833,19	40,83%
	<b>CI 06</b>	57.909,51	16,32%	36.111,19	50,64%	34.294,50	44,25%
	<b>CI 07</b>	58.143,92	15,50%	35.999,20	50,31%	34.340,26	43,50%
	<b>CI 08</b>	58.227,47	16,07%	35.625,77	53,23%	33.820,58	46,87%
	<b>CI 09</b>	57.942,32	16,83%	35.234,65	55,49%	33.568,08	48,91%
	<b>CI 10</b>	58.025,20	17,41%	34.987,99	57,60%	33.183,84	51,50%
	<b>CI 11</b>	57.977,48	17,35%	34.862,95	58,13%	33.211,82	51,20%
	<b>CI 12</b>	58.071,16	17,86%	34.690,82	59,78%	32.797,18	54,08%
<b>Parede ext. 3</b>	<b>CI 01</b>	57.755,46	11,94%	37.947,79	39,55%	36.336,70	34,03%
	<b>CI 02</b>	57.480,76	13,34%	37.346,92	43,71%	35.682,67	38,09%
	<b>CI 03</b>	57.395,42	13,78%	36.791,58	46,98%	35.141,33	40,94%
	<b>CI 04</b>	57.157,77	14,94%	36.288,87	50,53%	34.574,82	44,31%
	<b>CI 05</b>	58.048,06	14,45%	36.206,10	50,81%	34.594,69	44,61%

	<b>CI 06</b>	57.902,51	15,56%	35.690,53	54,75%	34.114,29	47,45%
	<b>CI 07</b>	58.112,49	14,50%	35.678,93	53,71%	34.167,64	46,91%
	<b>CI 08</b>	58.185,63	15,09%	35.364,73	56,13%	33.643,69	50,41%
	<b>CI 09</b>	57.860,12	15,92%	34.967,69	58,35%	33.345,93	52,11%
	<b>CI 10</b>	57.955,38	16,49%	34.739,91	60,25%	32.988,40	54,80%
	<b>CI 11</b>	58.539,16	16,53%	34.680,28	60,42%	32.914,66	55,02%
	<b>CI 12</b>	58.637,53	17,09%	34.454,15	62,75%	32.598,34	57,62%

Fonte: O autor (2025)

## APÊNDICE B – RESULTADOS DO TESTE TUKEY QUANTO AOS COMPONENTES CONSTRUTIVOS

TABELA 25 - Teste tukey para as composições de componentes construtivos sob os modos de VMM para Fortaleza

Combinações dos componentes construtivos	N	Média	Grupo
Ext.1-CI 01	4	59057,1	A
Ext.1-CI 02	4	58808,8	A B
Ext.2-CI 01	4	58787,3	A B
Ext.3-CI 01	4	58588,7	A B C
Ext.1-CI 03	4	58584,6	A B C
Ext.1-CI 05	4	58499,6	A B C
Ext.1-CI 04	4	58458,7	A B C
Ext.2-CI 02	4	58451,2	A B C
Ext.1-CI 08	4	58358,2	A B C
Ext.1-CI 06	4	58356,1	A B C
Ext.2-CI 05	4	58341,5	A B C
Ext.1-CI 12	4	58316,7	A B C
Ext.3-CI 02	4	58314,4	A B C
Ext.2-CI 03	4	58272,0	A B C
Ext.1-CI 07	4	58248,9	A B C
Ext.2-CI 08	4	58229,5	A B C
Ext.2-CI 06	4	58192,1	A B C
Ext.1-CI 11	4	58162,1	A B C
Ext.1-CI 10	4	58144,4	A B C
Ext.2-CI 07	4	58142,9	A B C
Ext.3-CI 05	4	58118,2	A B C
Ext.3-CI 08	4	58095,9	A B C
Ext.2-CI 04	4	58070,3	A B C
Ext.1-CI 09	4	58062,0	A B C
Ext.3-CI 12	4	58043,3	A B C
Ext.3-CI 07	4	58031,2	A B C
Ext.3-CI 03	4	58023,3	A B C
Ext.2-CI 12	4	57972,8	B C
Ext.3-CI 06	4	57908,9	B C
Ext.2-CI 11	4	57877,7	B C
Ext.2-CI 09	4	57868,3	B C
Ext.3-CI 11	4	57857,5	B C
Ext.2-CI 10	4	57850,9	B C
Ext.3-CI 04	4	57837,6	B C
Ext.3-CI 10	4	57788,5	B C
Ext.3-CI 09	4	57726,2	C

Fonte: O autor (2025)

TABELA 26 - Teste tukey para as composições de componentes construtivos sob os modos de VMM para São Paulo

<b>Combinações dos componentes construtivos</b>	<b>N</b>	<b>Média</b>	<b>Grupo</b>
Ext.1-CI 01	4	39404,5	A
Ext.2-CI 01	4	39021,4	AB
Ext.1-CI 02	4	38846,1	ABC
Ext.3-CI 01	4	38707,8	ABC
Ext.2-CI 02	4	38434,2	BCD
Ext.1-CI 03	4	38222,8	CDE
Ext.3-CI 02	4	38133,2	CDE
Ext.2-CI 03	4	37912,9	DEF
Ext.1-CI 04	4	37721,2	DEFG
Ext.3-CI 03	4	37609,3	EFGH
Ext.1-CI 05	4	37599,5	EFGH
Ext.2-CI 04	4	37390,9	FGHI
Ext.2-CI 05	4	37284,8	FGHIJ
Ext.3-CI 04	4	37172,8	FGHIJK
Ext.1-CI 06	4	37127,9	GHIJK
Ext.3-CI 05	4	37109,4	GHIJK
Ext.1-CI 07	4	36943,9	HIJKL
Ext.2-CI 06	4	36879,6	HIJKL
Ext.2-CI 07	4	36746,9	IJKLM
Ext.3-CI 06	4	36684,2	IJKLMN
Ext.1-CI 08	4	36642,4	JKLMN
Ext.3-CI 07	4	36576,0	JKLMNO
Ext.2-CI 08	4	36457,6	KLMNOP
Ext.3-CI 08	4	36333,9	LMNOPQ
Ext.1-CI 09	4	36251,7	LMNOPQR
Ext.2-CI 09	4	36101,4	MNOPQRS
Ext.1-CI 10	4	35978,2	NOPQRS
Ext.3-CI 09	4	35964,3	NOPQRS
Ext.1-CI 11	4	35864,5	OPQRS
Ext.2-CI 10	4	35825,8	PQRS
Ext.3-CI 10	4	35756,0	PQRS
Ext.2-CI 11	4	35698,4	QRS
Ext.3-CI 11	4	35630,0	QRS
Ext.1-CI 12	4	35586,2	RS
Ext.2-CI 12	4	35494,4	S

Fonte: O autor (2025)

TABELA 27 - Teste tukey para as composições de componentes construtivos sob os modos de VMM para Curitiba

<b>Combinações dos componentes construtivos</b>	<b>N</b>	<b>Média</b>	<b>Grupo</b>
Ext.1-CI 01	4	37665,5	A
Ext.2-CI 01	4	37339,3	AB
Ext.1-CI 02	4	37091,9	ABC
Ext.3-CI 01	4	37039,2	BC
Ext.2-CI 02	4	36757,9	CD
Ext.1-CI 03	4	36423,1	DE
Ext.3-CI 02	4	36417,3	DE
Ext.2-CI 03	4	36163,5	EF
Ext.3-CI 03	4	35889,6	EFG
Ext.1-CI 04	4	35885,9	EFG
Ext.1-CI 05	4	35778,8	FG
Ext.2-CI 04	4	35625,5	FGH
Ext.2-CI 05	4	35518,3	GHI
Ext.3-CI 04	4	35357,9	GHIJ
Ext.3-CI 05	4	35346,4	GHIJ
Ext.1-CI 06	4	35327,1	GHIJ
Ext.1-CI 07	4	35186,3	HIJK
Ext.2-CI 06	4	35035,1	IJKL
Ext.2-CI 07	4	34990,6	IJKL
Ext.3-CI 06	4	34861,1	JKLM
Ext.3-CI 07	4	34860,4	JKLM
Ext.1-CI 08	4	34818,0	JKLM
Ext.2-CI 08	4	34610,5	KLMN
Ext.3-CI 08	4	34499,8	LMNO
Ext.1-CI 09	4	34475,1	LMNO
Ext.2-CI 09	4	34291,4	MNOP
Ext.3-CI 09	4	34162,0	NOPQ
Ext.1-CI 10	4	34118,7	NOPQ
Ext.1-CI 11	4	34023,9	OPQR
Ext.2-CI 10	4	33991,2	OPQR
Ext.2-CI 11	4	33924,1	OPQR
Ext.3-CI 10	4	33895,6	PQR
Ext.3-CI 11	4	33830,6	PQR
Ext.1-CI 12	4	33773,8	PQR
Ext.2-CI 12	4	33643,0	QR

Fonte: O autor (2025)