

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS  
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL  
NÍVEL MESTRADO**

**PAULO EDUARDO MEZZOMO DA SILVA**

**Desempenho térmico de edificações residenciais: análise da influência de sistemas de parede, padrões de uso e operação e métodos de modelagem para simulação**

**São Leopoldo**

**2021**

PAULO EDUARDO MEZZOMO DA SILVA

**Desempenho térmico de edificações residenciais: análise da influência de sistemas de parede, padrões de uso e operação e métodos de modelagem para simulação**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS

Orientadora: Profa. Dra. Andrea Parisi Kern

Coorientadora: Profa. Dra. Maria Fernanda de Oliveira

São Leopoldo

2021

S586d Silva, Paulo Eduardo Mezzomo da.

Desempenho térmico de edificações residenciais :  
análise da influência de sistemas de paredes, padrões de  
uso e operação e métodos de modelagem para simulação /  
Paulo Eduardo Mezzomo da Silva. – 2021.

112 f. : il. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) – Universidade do Vale do Rio  
dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia  
Civil, 2021.

“Orientadora: Profa. Dra. Andrea Parisi kern

Coorientadora: Profa. Dra. Maria Fernanda de Oliveira”

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
(Bibliotecária: Silvana Dornelles Studzinski – CRB 10/2524)

PAULO EDUARDO MEZZOMO DA SILVA

**Desempenho térmico de edificações residenciais: análise da influência de sistemas de parede, padrões de uso e operação e métodos de modelagem para simulação**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS

Aprovado em 28 de setembro de 2021

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Mauricio Mancio – UNISINOS

---

Prof. Dr. Roberto Lamberts – UFSC

## **AGRADECIMENTOS À CAPES**

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

Dedico este trabalho a todos que me apoiaram nessa importante etapa acadêmica e profissional.

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais, Adelar e Lourdes, pela constante importância que dão à educação de seus filhos e por serem a minha base de tudo.

À minha companheira, Victória, pela paciência em dividir a rotina durante meu mestrado e por dar todo o apoio necessário em mais essa importante jornada.

Aos meus demais familiares, por acreditarem na minha capacidade e pelo interesse no meu futuro.

Aos amigos Vanessa, Mateus, Vitória, Stefania e Monique, pela parceria, bom humor e inteligência nesses anos de mestrado, que sempre serão lembrados.

Aos demais amigos da universidade e de tempos passados por continuarem presentes de forma próxima, mesmo quando estiveram fisicamente distantes.

Às professoras Andrea e Maria Fernanda pela disposição, apoio, paciência e compreensão ao longo desse período de grandes desafios.

## RESUMO

O desempenho térmico de uma edificação depende de fatores como o clima, a composição construtiva, a forma, o uso e operação da unidade habitacional e seus sistemas, método de análise, entre outros. Esse trabalho analisou a influência de sistemas de parede, de padrões de uso e operação e de métodos de modelagem no desempenho térmico de edificações residenciais no Brasil através de simulações. Foram adotados três sistemas de parede, sendo alvenaria de blocos cerâmicos, parede de concreto e sistema leve. No que tange aos tipos de uso, analisou-se uso padrão, uso intensificado e uso reduzido das unidades habitacionais. Quanto à operação das unidades, analisou-se a influência de ventilação seletiva e ventilação diurna. Por fim, cinco métodos de modelagem de edifícios multifamiliares foram analisados, sendo modelo completo, pavimentos térreo, intermediário e cobertura, dois últimos pavimentos, último pavimento e unidades habitacionais de condições térmicas mais desfavoráveis. Todas as simulações foram feitas para quatro cidades, representativas da ZB1, ZB3, ZB7 e ZB8. Ainda, foram analisados modelos de casa e de prédio, com e sem ventilação natural. Os resultados das análises dos sistemas de parede apresentaram variações conforme o clima, sendo o sistema leve o de melhor desempenho em cidades frias e em cidades quentes quando não há o uso de ventilação natural; o sistema com paredes de concreto apresentou os melhores resultados em cidades quentes quando com ventilação natural; o sistema com paredes com blocos cerâmicos apresentou resultados medianos entre os demais. Os resultados dos tipos de uso indicaram que o uso intensificado tende a aumentar as temperaturas internas, o que se mostra favorável em climas mais frios, mas pode trazer desconforto térmico em climas mais quentes; o uso reduzido ocasiona o efeito oposto. A ventilação natural diurna tende a proporcionar desconforto térmico nas cidades frias, mas pode ser uma alternativa em climas mais quentes, em especial quando combinada a cenários de uso reduzido noturno. Por fim, a análise dos métodos de modelagem identificou resultados satisfatórios no modelo com pavimento térreo, intermediário e cobertura e no modelo com os dois últimos pavimentos; os demais apresentaram quedas consideráveis na similaridade em relação ao modelo de referência, não sendo recomendáveis.

**Palavras-chave:** Simulação de edifícios. Desempenho térmico. Eficiência energética.

## ABSTRACT

The thermal performance of a building depends on factors such as climate, construction, form, use, operation and method of analysis. This work analyzed the influence of wall systems, use and operation schedules and modeling methods on the thermal performance of residential buildings in Brazil with simulations. Three wall systems were adopted, which are ceramic brick masonry, concrete wall and light steel/wood framing. Regarding the types of use, a standard use, an intensified use and a reduced use of housing units were analyzed. Regarding the operation of the units, the influence of selective ventilation and daytime ventilation was analyzed. Also, five modeling methods were analyzed, which are complete model, ground, intermediate and top floor model, top two floors model, top floor model and critical housing units model. The results of the analysis of wall systems presented variations depending on the climate. The light framing system was the system with the best thermal performance in cold cities and in hot cities when there is no use of natural ventilation; concrete wall presented the best results in hot cities in scenarios with natural ventilation; ceramic brick masonry presented average results among the other systems. The results regarding the usage indicated that intensified use tends to increase indoor temperatures, which is good in colder climates, but will cause thermal discomfort in warmer climates; reduced use has the opposite effect. Daytime natural ventilation tends to cause thermal discomfort in cold cities, but it can be an alternative in warmer climates, especially when combined with scenarios of reduced use at the night period. Finally, the analysis of the modeling methods presented good results in the ground, intermediate and top floor model and the top two floors model, which are indicated for model simplifications; the other models showed considerable losses in similarity results in relation to the reference model, which means they are not recommended.

**Key-words:** Building simulation. Thermal performance. Energy consumption.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Interações dinâmicas em edificações.....	21
Figura 2 – Interações entre o clima, o uso e o projeto .....	22
Figura 3 – Relação entre áreas territoriais e zonas climáticas .....	25
Figura 4 – Zoneamento bioclimático brasileiro .....	25
Figura 5 – Ventilação natural no sentido horizontal (ventilação cruzada) .....	29
Figura 6 – Ventilação natural no sentido vertical (efeito chaminé) .....	29
Figura 7 – Exemplos de padrão de uso em diferentes ambientes.....	31
Figura 8 – Processo de otimização em três fases.....	38
Figura 9 – Modelo de residência unifamiliar adotado, denominado “casa”: (a) planta baixa e (b) modelo de simulação.....	44
Figura 10 – Modelo de edifício residencial multifamiliar adotado, denominado “prédio”: (a) planta baixa e (b) modelo de simulação .....	44
Figura 11 – Sistemas de paredes.....	45
Figura 12 – Padrões de uso alternativos analisados.....	47
Figura 13 – Padrões de ocupação e uso dos dormitórios .....	53
Figura 14 – Padrões de ocupação e uso das salas.....	53
Figura 15 – PHFT (%), GHc, GHf e GHt (°C) de casa com ventilação natural, com diferentes sistemas de paredes e em diferentes zonas bioclimáticas.....	61
Figura 16 – CgTR, CgTA e CgTT (kWh/m <sup>2</sup> ) de casa sem ventilação natural, com diferentes sistemas de paredes e em diferentes zonas bioclimáticas.....	66
Figura 17 – PHFT (%), GHc, GHf e GHt (°C) de prédio com ventilação natural, com diferentes sistemas de paredes e em diferentes zonas bioclimáticas.....	68
Figura 18 – CgTR, CgTA e CgTT (kWh/m <sup>2</sup> ) de prédio sem ventilação natural, com diferentes sistemas de paredes e em diferentes zonas bioclimáticas.....	71
Figura 19 – PHFT (%), GHc, GHf e GHt (°C) de casa com ventilação natural seletiva, com diferentes tipos de uso e em diferentes zonas bioclimáticas .....	75
Figura 20 – PHFT (%), GHc, GHf e GHt (°C) de casa com ventilação natural diurna, com diferentes tipos de uso e em diferentes zonas bioclimáticas .....	78
Figura 21 – PHFT (%), GHc, GHf e GHt (°C) de prédio com ventilação natural seletiva, com diferentes tipos de uso e em diferentes zonas bioclimáticas .....	80
Figura 22 – PHFT (%), GHc, GHf e GHt (°C) de prédio com ventilação natural diurna, com diferentes tipos de uso e em diferentes zonas bioclimáticas .....	83

Figura 23 – PHFT (%), GHc, GHf e GHt (°C) de prédio com ventilação natural, com diferentes métodos de modelagem e em diferentes zonas bioclimáticas.....	86
Figura 24 – Similaridade (%) individual dos indicadores em modelos simplificados de prédio com ventilação natural em relação ao M1-COMP em cada zona bioclimática .....	87
Figura 25 – Similaridade (%) agrupada dos indicadores em modelos simplificados de prédio com ventilação natural em relação ao M1-COMP em cada zona bioclimática .....	88
Figura 26 – Similaridade (%) média final dos métodos de modelagem nos cenários de prédio com ventilação natural.....	88
Figura 27 – CgTR e CgTA (kWh/m <sup>2</sup> ) de prédio sem ventilação natural, com diferentes métodos de modelagem e em diferentes zonas bioclimáticas .....	90
Figura 28 – Similaridade (%) individual dos indicadores em modelos simplificados de prédio sem ventilação natural em relação ao M1-COMP em cada zona bioclimática .....	92
Figura 29 – Similaridade (%) agrupada dos indicadores em modelos simplificados de prédio sem ventilação natural em relação ao M1-COMP em cada zona bioclimática .....	92
Figura 30 – Similaridade (%) média final dos métodos de modelagem nos cenários de prédio sem ventilação natural.....	93
Figura 31 – Padrões de uso dos dormitórios nos cenários de uso intensificado.....	109
Figura 32 – Padrões de uso das salas nos cenários de uso intensificado .....	110
Figura 33 – Padrões de uso dos dormitórios nos cenários de uso reduzido .....	110
Figura 34 – Padrões de uso das salas nos cenários de uso reduzido .....	111
Figura 35 – Padrão de ventilação nos cenários de ventilação natural diurna .....	111

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Cidades analisadas na pesquisa .....	45
Tabela 2 – Sistemas construtivos analisados.....	45
Tabela 3 – Características térmicas dos sistemas construtivos .....	46
Tabela 4 – Métodos de modelagem analisados .....	48
Tabela 5 – Descrição e quantificação dos cenários analisados por simulação .....	49
Tabela 6 – Intervalos de temperaturas externas de bulbo seco e limites do PHFT...	50
Tabela 7 – Intervalos de temperaturas externas de bulbo seco e limites do CgTR e do CgTA .....	52
Tabela 8 – Taxas metabólicas dos usuários e potências instaladas de iluminação e equipamentos.....	54
Tabela 9 – Sistemas construtivos adotados .....	55
Tabela 10 – Propriedades térmicas e físicas dos materiais empregados .....	56
Tabela 11 – Propriedades térmicas e físicas dos vidros empregados .....	56
Tabela 12 – Intervalos de temperatura obtidos para cada cidade.....	57
Tabela 13 – Análise qualitativa do desempenho proporcionado por cada sistema na primeira etapa do trabalho.....	95
Tabela 14 – Análise qualitativa do desempenho proporcionado por cada sistema na segunda etapa do trabalho.....	97

## LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
APP	Ambiente de Permanência Prolongada
AQUA	Alta Qualidade Ambiental
ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers</i>
c	Calor específico
CgTA	Carga Térmica Integrada Anual de Aquecimento
CgTR	Carga Térmica Integrada Anual de Refrigeração
CgTT	Carga Térmica Integrada Anual Total
CT	Capacidade térmica
EPW	<i>EnergyPlus Weather Data</i>
HVAC	Aquecimento, Ventilação e Ar-Condicionado
K	Condutividade térmica do vidro
LEED	<i>Leadership in Energy and Environmental Design</i>
M1-COMP	Modelo completo
M2-INT	Modelo com pavimento intermediário
M3-2PAV	Modelo com somente os dois últimos pavimentos
M4-1PAV	Modelo com somente o último pavimento
M5-UH	Modelo com somente as unidades habitacionais representativas
NBR	Norma Técnica Brasileira
P1-CER	Parede de alvenaria de blocos cerâmicos
P2-CON	Parede de concreto
P3-SL	Parede de sistema leve
PHFT	Percentual de Horas Ocupadas na Faixa de Temperatura
$R_{bs}$	Refletância solar interna
$R_{bv}$	Refletância visível interna
$R_{fs}$	Refletância solar externa
$R_{fv}$	Refletância visível externa
RTQ-C	Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas

RTQ-R	Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais
$T_{ir}$	Transmitância de infravermelho
TMY	<i>Typical Meteorological Year</i>
TMY3	<i>Typical Meteorological Year 3</i>
TRY	<i>Test Reference Year</i>
$T_s$	Transmitância solar
$T_v$	Transmitância visível
U	Transmitância térmica
UH	Unidade habitacional
UI	Uso intensificado
UP	Uso padrão
UR	Uso reduzido
VD	Ventilação diurna
VS	Ventilação seletiva
$\alpha$	Absortância solar
$\varphi$	Atraso térmico
$\lambda$	Condutividade térmica
$\rho$	Densidade de massa aparente
$\varepsilon$	Emissividade de onda longa
$\varepsilon_b$	Emissividade hemisférica interna de infravermelho
$\varepsilon_f$	Emissividade hemisférica externa de infravermelho

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>16</b>
1.1 TEMA .....	16
1.2 OBJETIVOS .....	17
<b>1.2.1 Objetivo Geral</b> .....	<b>17</b>
<b>1.2.2 Objetivos Específicos</b> .....	<b>18</b>
1.3 JUSTIFICATIVA .....	18
<b>2 DESEMPENHO TÉRMICO DE EDIFÍCIOS</b> .....	<b>20</b>
2.1 PRINCIPAIS CONDICIONANTES DO DESEMPENHO TÉRMICO .....	22
<b>2.1.1 Clima</b> .....	<b>23</b>
<b>2.1.2 Edificação e envelope construtivo</b> .....	<b>25</b>
<b>2.1.3 Uso e operação</b> .....	<b>30</b>
2.2 REFERÊNCIAS NORMATIVAS E CERTIFICAÇÕES .....	33
2.3 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL .....	37
<b>3 MÉTODO DE PESQUISA</b> .....	<b>43</b>
3.1 VARIÁVEIS INVESTIGADAS .....	43
<b>3.1.1 Modelos da edificação</b> .....	<b>43</b>
<b>3.1.2 Zonas bioclimáticas</b> .....	<b>44</b>
<b>3.1.3 Sistemas de parede</b> .....	<b>45</b>
<b>3.1.4 Uso e operação</b> .....	<b>46</b>
<b>3.1.5 Modelagem da edificação multifamiliar</b> .....	<b>47</b>
3.2 CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO .....	49
3.3 PARÂMETROS DE BASE E MÉTODOS ADOTADOS NAS SIMULAÇÕES .....	50
<b>3.3.1 Indicadores adotados</b> .....	<b>50</b>
<b>3.3.2 Dados dos sistemas construtivos</b> .....	<b>55</b>
<b>3.3.3 Dados referente aos climas</b> .....	<b>56</b>
<b>4 ANÁLISE DOS RESULTADOS</b> .....	<b>59</b>
4.1 ETAPA 1: SISTEMAS DE PAREDE .....	60
<b>4.1.1 Sistemas de parede em casa com ventilação natural</b> .....	<b>60</b>
<b>4.1.2 Sistemas de parede em casa sem ventilação natural</b> .....	<b>65</b>
<b>4.1.3 Sistemas de parede em prédio com ventilação natural</b> .....	<b>67</b>
<b>4.1.4 Sistemas de parede em prédio sem ventilação natural</b> .....	<b>70</b>
4.2 ETAPA 2: USO E OPERAÇÃO .....	73

<b>4.2.1</b>	<b>Uso e operação em casa com ventilação seletiva.....</b>	<b>74</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Uso e operação em casa com ventilação diurna.....</b>	<b>77</b>
<b>4.2.3</b>	<b>Uso e operação em prédio com ventilação seletiva.....</b>	<b>79</b>
<b>4.2.4</b>	<b>Uso e operação em prédio com ventilação diurna.....</b>	<b>82</b>
<b>4.3</b>	<b>ETAPA 3: MÉTODOS DE MODELAGEM.....</b>	<b>85</b>
<b>4.3.1</b>	<b>Modelos com ventilação natural.....</b>	<b>85</b>
<b>4.3.2</b>	<b>Modelos sem ventilação natural.....</b>	<b>90</b>
<b>5</b>	<b>DISCUSSÃO.....</b>	<b>95</b>
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>101</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>104</b>
	<b>APÊNDICE A – PADRÕES DE USO ALTERNATIVOS.....</b>	<b>109</b>

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 TEMA

A construção civil brasileira tem passado por várias mudanças, decorrentes de novos requisitos normativos e do processo de evolução das técnicas e sistemas construtivos. Entre os requisitos impostos pela NBR 15575 (ABNT, 2013), há o desempenho térmico das edificações, caracterizado por Lamberts e Triana (2007) como um conjunto de características da edificação que se relaciona com o conforto térmico do usuário e com uso racional da energia para condicionamento dos ambientes. Segundo os autores, alguns fatores altamente ligados ao desempenho térmico da edificação são os materiais do envelope construtivo, as cores empregadas nas superfícies externas, características das aberturas, como portas e janelas, as cargas térmicas internas provenientes do uso e, principalmente, a adoção ou não de estratégias de projeto levando em consideração o clima onde a edificação está inserida (LAMBERTS; TRIANA, 2007).

As normas NBR 15220 (ABNT, 2005) e NBR 15575 (ABNT, 2013), junto ao Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (RTQ-R, 2010), representam a primeira iniciativa nacional para estabelecer critérios que garantissem o adequado desempenho térmico das habitações (CHVATAL, 2014). No entanto, diversos trabalhos evidenciam que há espaço e necessidade de atualização dos métodos vigentes no Brasil. Pesquisadores afirmam que, apesar de haver grande relevância das normas supracitadas no cenário nacional, os métodos de análise apresentado em suas primeiras versões não permitem representar adequadamente o comportamento térmico das edificações dentro do seu contexto climático, levando a uma necessidade de profunda revisão. (FERREIRA; SOUZA; ASSIS, 2017; OLIVEIRA; SOUZA; DA SILVA, 2017; SORGATO; MELO; LAMBERTS, 2014).

Entre as principais deficiências constatadas inicialmente, teve-se incompatibilidades entre as normas NBR 15220/2005 e NBR 15575/2013, necessidade de atualização do zoneamento bioclimático brasileiro e limitações no método de simulação computacional trazido pela primeira versão da Norma de Desempenho. Em especial no que se refere às simulações, observou-se ausência de parâmetros de simulação e de variáveis de uso e operação, os quais possuem elevada

influência nas análises. Essas questões apontaram a necessidade de uma revisão integrada de ambas as normas e de regulamentos de certificações sustentáveis no Brasil, estabelecendo métodos consistentes e alinhando esses documentos para que tenham uma maior coesão. (CHVATAL, 2014; FERREIRA; SOUZA; ASSIS, 2017; MAZZAFERRO et al., 2020; SORGATO et al., 2014).

Embora a maioria das normas para avaliação de desempenho térmico adote simulação computacional com ferramentas semelhantes, como o EnergyPlus, percebe-se que não há uma metodologia global estabelecida para este tipo de análise (GRIGOLETTI; SATTLER, 2010; TIAN et al., 2018). Ainda, metodologias de simulação computacional podem gerar elevadas incertezas, as quais levantam à necessidade de delimitar variáveis relacionadas às simulações (OLIVEIRA; SOUZA; DA SILVA, 2017; SILVA et al., 2014). Dessa forma, torna-se necessário realizar análises críticas de novas metodologias. Assim, para que um novo método de análise de desempenho térmico tenha sua aplicação adequada, estudos que abordem parâmetros e critérios de desempenho térmico se fazem necessários.

Nesse contexto, este trabalho visa analisar condicionantes relacionados à caracterização e simulação de desempenho térmico de edifícios residenciais no Brasil. Para tal, simulações computacionais foram exploradas de forma a analisar a influência de características de edificações, variações de uso e operação de unidades habitacionais e métodos de modelagem para simulação computacional. Assim, espera-se que os resultados dessa Dissertação possam contribuir para avanços na área de desempenho térmico de edifícios no âmbito nacional.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é analisar a influência de sistemas de parede, uso e operação de unidades habitacionais e métodos de modelagem em análises de desempenho térmico de edifícios residenciais no contexto climático brasileiro.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- a) analisar o impacto de diferentes sistemas de parede no desempenho térmico de edificações no contexto brasileiro;
- b) determinar a influência dos padrões de uso e operação de unidades habitacionais no seu desempenho térmico;
- c) realizar análise de métodos de modelagem para simulação.

### 1.3 JUSTIFICATIVA

O desempenho de uma edificação é inerente ao seu projeto, o que traz a necessidade de incorporar práticas e conhecimentos específicos nas etapas de concepção de uma edificação. Entre as ferramentas que permitem analisar e otimizar um projeto com base no seu desempenho, simulações computacionais ganham destaque como alternativa promissora, sendo utilizadas globalmente (DEKAY; BROWN, 2014; TIAN et al., 2018).

De forma a obter simulações de desempenho coerentes, é importante estabelecer metodologias que permitam a elaboração de modelos que se aproximem do comportamento real dos edifícios, possibilitando avaliar e classificar o desempenho com parâmetros adequados. Analisando-se simulações de desempenho térmico com base na sua incerteza, Silva et al. (2014) afirmaram que podem haver grandes discrepâncias de resultados quando utiliza-se metodologias que não demarcam variáveis importantes. Sendo assim, podem ser atingidos diferentes níveis de desempenho conforme são consideradas variáveis que não são delimitadas pela metodologia.

Outros trabalhos como o de Silva, Almeida e Ghisi (2017) mostraram que em análises de desempenho por simulação é possível atingir altos índices de confiabilidade dos resultados, quando utilizados métodos mais embasados e delimitados. Isto evidencia que as ferramentas de simulação como o EnergyPlus permitem colaborar para a otimização de projetos visando um desempenho adequado – para usufruir desta capacidade, porém, é necessário possuir métodos normativos

precisos e suficientemente detalhados (SILVA; ALMEIDA; GHISI, 2017; TIAN et al., 2018).

Entre as variáveis de alta influência no desempenho térmico de edificações, tem-se a envoltória das edificações. No que tange à sua composição construtiva, ganham destaque os sistemas de parede e cobertura empregados. Nos sistemas disponíveis atualmente, há distintas características térmicas e físicas, proporcionando desempenho térmico à edificação que varia conforme o sistema construtivo empregado. Ainda, é necessário analisar como cada sistema se comporta frente às características climáticas de cada local, podendo haver diferenças significativas. (ELI, 2020; SILVEIRA, 2014; SORGATO; MELO; LAMBERTS, 2016).

Estudos recentes evidenciam a relevância tomada pelos usuários no desempenho térmico de edificações. O uso e a operação de unidades habitacionais e seus sistemas têm influência direta na sensação de conforto térmico das próprias pessoas que utilizam determinado espaço. Dessa forma, com os diversos tipos de uso existentes atualmente, análises que consideram variações de uso tendem a ser cada vez mais necessárias. (BALVEDI; GHISI; LAMBERTS, 2018; ELI, 2020).

O desenvolvimento de metamodelos para estimar o desempenho térmico de edificações é explorado no trabalho de Veiga (2021). Com essa técnica, é possível traçar as principais variáveis e como essas se relacionam com os resultados obtidos, através de análises estatísticas. Um dos pontos analisados no trabalho é o fator de forma e o impacto da modelagem e simplificação de modelos nos resultados obtidos. Para permitir a correta representação geométrica de edificações, é necessário conhecer os possíveis impactos de simplificações de modelos e o melhor método baseado em análise prévia de cada projeto. (VEIGA, 2021).

A motivação deste trabalho surgiu no atual cenário de atualização dos documentos técnicos e normativos relacionados ao desempenho térmico de edifícios residenciais no Brasil. Nesse processo, tornam-se relevantes estudos que abordem os atuais focos de discussão relacionados às análises de desempenho térmico, o que foi explorado neste trabalho.

## 2 DESEMPENHO TÉRMICO DE EDIFÍCIOS

No cenário mundial, é crescente a preocupação com a redução do consumo de energia e recursos. Principalmente em países desenvolvidos, é possível observar metas de diminuição de impactos ambientais e programas governamentais de conservação de energia, envolvendo energias mais limpas, medidas de incentivo à adoção de práticas sustentáveis, planejamento urbano visando mitigar os efeitos de ilhas de calor, entre outras. (ASSIS; PEREIRA, 2013; LING-CHIN et al., 2019; QIAO; LIU, 2020; SAILOR, 2014).

O desempenho térmico de um edifício se relaciona com o conforto térmico e eficiência energética, porém os conceitos são, em parte, distintos. Segundo Lamberts, Dutra e Pereira (2014), conforto térmico consiste na satisfação do usuário no ambiente térmico em que se encontra, tendo influência de variáveis ambientais e humanas. Já o desempenho térmico, de acordo com Bogo (2008), foca no comportamento das edificações e/ou seus componentes, visando condições adequadas de conforto e uma eficiência energética satisfatória.

A sustentabilidade na construção civil visa otimizar o ambiente construído através da integração de soluções de materiais, tecnologias e conscientização. O desempenho e a eficiência energética de um edifício conversam de forma próxima, afetando diretamente o consumo de energia e recursos. Por esse motivo, a entrada do conceito e a aplicação da sustentabilidade na construção civil possui um grande papel, visto que se trata de um setor ainda visto como contraditório ao desenvolvimento sustentável, tendo em vista o alto consumo de recursos naturais e geração de resíduos. No Brasil, políticas públicas e programas nacionais implementados no início dos anos 2000 visaram alinhar a construção civil aos princípios de sustentabilidade, trazendo inovação e eficiência energética ao setor como um todo. (AGOPYAN; JOHN, 2011).

Nesse contexto, o desempenho térmico e a eficiência energética das edificações possuem alta relevância no eixo da sustentabilidade como um todo. A relação da eficiência energética com o desempenho térmico deve ser cada vez mais abordada na fase de projeto, visando à diminuição da carga térmica e, conseqüentemente, do consumo de energia. Também é de alta relevância o comportamento do usuário e sua relação com os equipamentos, com destaque ao ar condicionado. Ao considerar essas variáveis, aproximam-se os modelos de análise de

desempenho térmico e eficiência energética à realidade, possibilitando grandes avanços futuros. (AGOPYAN; JOHN, 2011; BALVEDI; GHISI; LAMBERTS, 2018; DEKAY; BROWN, 2014).

Hensen e Lamberts (2011) apontam que projetar edificações sustentáveis atualmente é desafiador, visto que há uma grande quantidade de requisitos operacionais. Segundo os autores, o sistema de equilíbrio de um edifício é extremamente dinâmico e está ligado a diversas variáveis, havendo trocas constantes de calor entre o edifício, os ocupantes, os equipamentos, o sistema de ar-condicionado, o clima, entre outros, o que confere ao sistema características consideravelmente complexas (Figura 1).

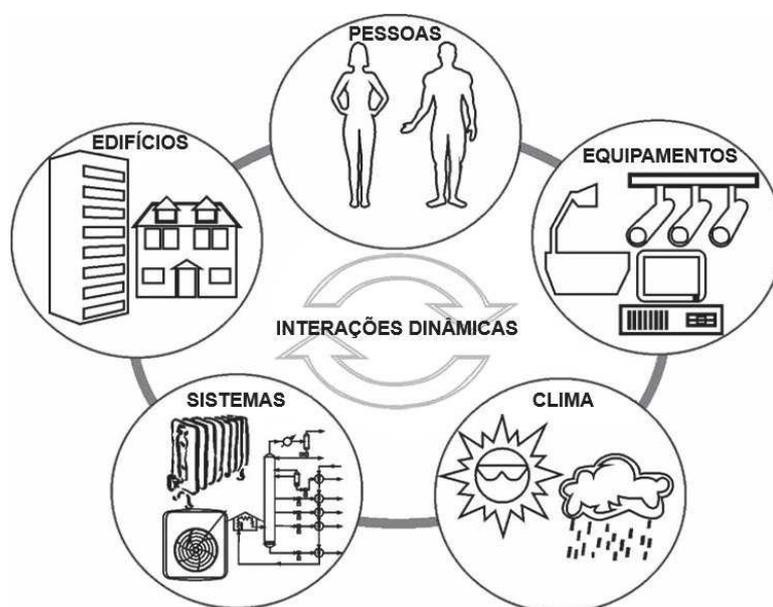


Figura 1 – Interações dinâmicas em edificações

Fonte: adaptado de Hensen e Lamberts (2011).

Com isso, tem-se um sistema de interações dinâmicas com forte influência de cada um de seus elementos – pessoas, edifícios, equipamentos e sistemas, relacionados ao clima onde se inserem. Os itens a seguir tratam dos principais condicionantes do desempenho térmico de edificações, seguidos de referências normativas, certificações e uma abordagem da simulação computacional como ferramenta para análises de desempenho.

## 2.1 PRINCIPAIS CONDICIONANTES DO DESEMPENHO TÉRMICO

O desempenho térmico de uma edificação depende de diversos fatores, entre os quais se destacam: o contexto climático, ou seja, o ambiente onde a edificação se insere; o envelope construtivo, composto pelas paredes externas, cobertura, aberturas, elementos de sombreamento, entre outros; e o uso e operação, os quais estão relacionados aos hábitos dos usuários, e que influenciam no comportamento da edificação frente aos agentes externos (DEKAY; BROWN, 2014; LAMBERTS; TRIANA, 2007; RIVERO, 1985). Os autores DeKay e Brown (2014) ilustram essas relações e inserem as variáveis relativas ao consumo de energia, conforme pode ser observado na Figura 2.

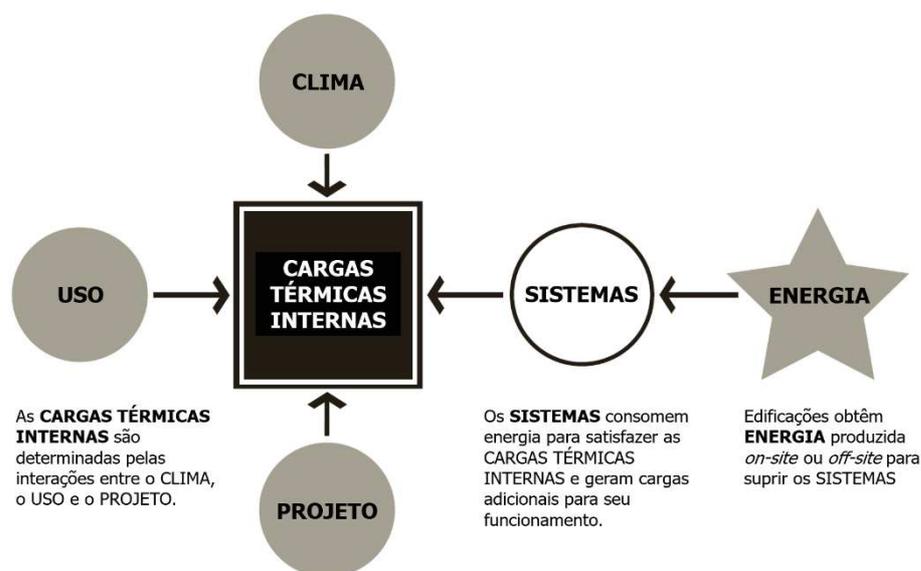


Figura 2 – Interações entre o clima, o uso e o projeto

Fonte: adaptado de DeKay e Brown (2014).

Nesse cenário, há um conjunto de fatores internos e externos que influenciam o desempenho térmico e a eficiência energética. É possível tratar essas interações como um grande sistema, onde existem relações dinâmicas que se alteram a cada instante (HENSEN; LAMBERTS, 2011). Esse item visa realizar uma revisão multidisciplinar do assunto de desempenho térmico, abordando as principais variáveis, conceitos de projeto, propriedades de materiais e sistemas, entre outros. Sendo assim, a temática é estruturada em três pilares, abordados a seguir: clima, edificação e uso.

### 2.1.1 Clima

O clima consiste no conjunto de fenômenos meteorológicos que definem a atmosfera de um determinado local. As classificações do clima brasileiro, de forma geral, consideram as regiões no mapa nacional e distinguem os climas em tropical úmido, tropical seco, subtropical, temperado, entre outros. No meio urbano, tem-se diversas variações em espaços menores, as quais denominam-se microclima. (RIVERO, 1985).

Para DeKay e Brown (2014, p. 53), do ponto de vista dos edifícios, o clima é o conjunto de fatores externos que afetam suas cargas térmicas. Nestes fatores, se inserem temperatura, umidade, radiação, ventos, entre outros, os quais podem ser utilizados como estratégias de condicionamento passivo. Portanto, o meio onde a edificação se insere possui ampla influência sobre o seu comportamento térmico. Por outro lado, Assis e Pereira (2013) e Frota e Schiffer (2003) afirmam que as edificações e instalações urbanas também influenciam o clima ao seu redor, gerando o efeito de ilhas de calor, além de diferenças de umidade localizadas no meio urbano, em níveis de microclima e mesoclima.

De forma semelhante, Koenigsberger et al. (1977) expõem que os elementos não naturais de uma cidade geram microclimas que podem apresentar desvios consideráveis. Segundo os autores, estas intervenções, de origem humana, ocorrem principalmente em grandes cidades e metrópoles. Assim, entende-se que o clima urbano possui características peculiares, o que justifica que, na climatologia, seja tratado e estudado como um cenário particular. (KOENIGSBERGER et al., 1977).

Estudos indicam que o efeito de ilhas de calor no meio urbano, quando não é mitigado, tende a gerar um processo cíclico de aquecimento urbano localizado. Além disso, trabalhos que abordam a interpolação de dados climáticos para climas futuros atentam para este crescimento global de temperatura e reforçam a necessidade de um planejamento urbano para uma otimização da demanda energética. (QIAO; LIU, 2020; SAILOR, 2014; TRIANA; LAMBERTS; SASSI, 2018).

Do ponto de vista dos efeitos do clima nos edifícios e em suas cargas térmicas, DeKay e Brown (2014) defendem que o clima seja visto como um recurso. Com isso, tem-se estratégias de ventilação natural no período diurno em climas quentes, entrada de radiação solar nos períodos frios, entre outras medidas para condicionamento passivo. (DEKAY; BROWN, 2014).

A orientação solar é um importante parâmetro de projeto, podendo ser utilizada como uma estratégia bioclimática. Quando corretamente empregada, possui extrema importância no desempenho térmico e na eficiência energética de um edifício. Com a utilização deste parâmetro é possível ajustar os ganhos ou perdas de calor nos ambientes conforme a necessidade da edificação, através da disposição estratégica dos ambientes e das aberturas (HASTINGS; WALL, 2007). Segundo Frota e Schiffer (2006), a posição adequada do ponto de vista do conforto térmico pode contribuir para a qualificação do condicionamento natural dos ambientes, definindo-se, ainda na fase de projeto, quando há maiores e menores incidência da radiação solar.

A interação térmica entre o ambiente construído e o clima é constante, com diferentes situações da transmissão do calor. Para levantar os principais fatores do clima que influenciam nessas trocas, devem ser obtidos os seguintes dados: temperatura e umidade relativa do ar (médias, máximas e mínimas mensais), radiação solar direta para cada orientação, nebulosidade média, direção e velocidade dos ventos, caracterização do clima local, latitude e altitude. (FROTA; SCHIFFER, 2003).

De forma a classificar e categorizar os climas, tem-se mapeamentos e zoneamentos climáticos. No entanto, não há consenso sobre a metodologia mais adequada para o seu desenvolvimento, o que resulta em índices e relações distintas entre países no que tange à área territorial e ao número de zonas climáticas, conforme apresenta a Figura 3. Trabalhos recentes sugerem a adoção de metodologias baseadas no uso de arquétipos, simulações e sistemas de informação geográfica e propõem que o zoneamento não somente seja feito com base nas características climáticas, mas na semelhança do desempenho das edificações de cada localidade. (MAZZAFERRO et al., 2020; WALSH, 2017).

O zoneamento atual do Brasil apresenta 8 zonas bioclimáticas (Figura 4), contudo, há propostas de revisão desse zoneamento com novas metodologias, resultando em números maiores de zonas. Trabalhos mais recentes ressaltam a necessidade de rever a metodologia adotada para o zoneamento, o que pode trazer alterações significativas nas próximas versões do mapa. (MAZZAFERRO et al., 2020; RORIZ, 2014; WALSH, 2017).

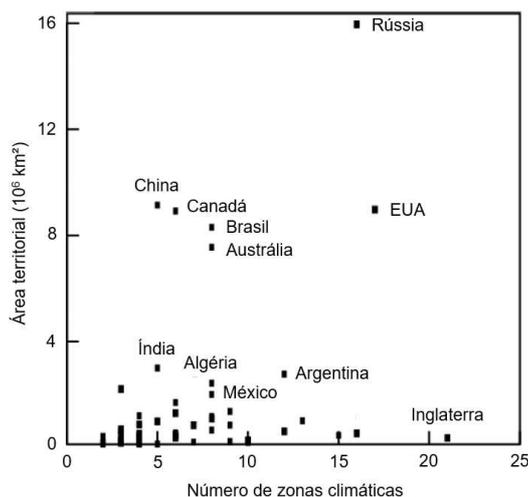


Figura 3 – Relação entre áreas territoriais e zonas climáticas

Fonte: adaptado de Walsh (2017).

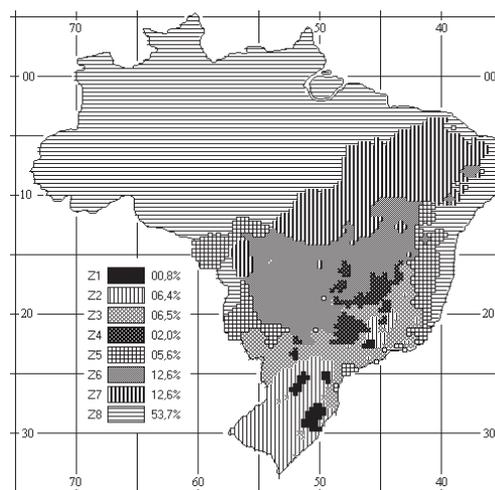


Figura 4 – Zoneamento bioclimático brasileiro

Fonte: NBR 15220 (ABNT, 2005).

Nesse cenário, é de alta relevância o conhecimento sobre o clima para análises de desempenho térmico. Os estudos climáticos possibilitam a obtenção das informações necessárias para cada local. Em escalas maiores, porém, ainda não há consenso sobre as metodologias mais adequadas para zoneamentos climáticos. O zoneamento bioclimático brasileiro ainda está em sua primeira versão e há diversas evidências que sugerem a necessidade de revisá-lo, tornando esse assunto um relevante objeto de discussão.

### 2.1.2 Edificação e envelope construtivo

Para DeKay e Brown (2014), o papel da edificação em si e sua capacidade de gerar condicionamento térmico passivo possui bastante proximidade com o projetista, que assume responsabilidade frente à forma, à distribuição dos espaços e aos materiais empregados. Com isso, cabe ao profissional fazer o melhor uso das estratégias de projeto, ou estratégias bioclimáticas, visando ao condicionamento passivo. (DEKAY; BROWN, 2014; LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014).

Uma envoltória termicamente eficiente está relacionada à capacidade do envelope construtivo de ser responsivo ao clima onde a edificação está inserida, sendo capaz de manter os ambientes internos em condições de conforto. Nesse cenário, a edificação regula conforto e energia, adaptando-se a constantes alterações de sol, luz e movimentos do ar. Assim, o projetista deve considerar o clima para

aplicação das estratégias mais eficientes, as quais envolverão paredes externas, cobertura, aberturas para iluminação e ventilação, elementos de sombreamento, massa térmica, definição de materiais, definição de sistemas de aquecimento e refrigeração, entre outros. (DEKAY; BROWN, 2014).

No que diz respeito ao envelope construtivo, os materiais empregados e suas espessuras ganham relevância. Dependendo do clima, podem ser indicadas espessuras distintas, visando a uma otimização da carga térmica com o nível de isolamento térmico mais adequado. Segundo Rivero (1985), o objetivo principal de um isolamento térmico é controlar as condições térmicas internas frente à ação de agentes térmicos externos. O autor expõe que é comum considerar a resistência térmica de elementos como o único indicador de isolamento, porém alega que a capacidade térmica tem uma participação significativa no comportamento térmico dos elementos. Ainda, dá destaque ao uso racional de materiais de construção visando boa relação custo-benefício e os indicadores de isolamento térmico, visto que, com uma mesma quantidade de materiais, pode-se obter indicadores bastante distintos. (RIVERO, 1985).

Segundo Lamberts, Dutra e Pereira (2014), o isolamento térmico dos elementos de vedação compreende no uso destes como estratégia de inércia térmica. Os autores explicam que esta estratégia está relacionada à utilização de sistemas construtivos mais espessos, os quais permitirão bloquear a entrada de parcela do calor no verão e diminuir a perda de calor ao ambiente externo no inverno. (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014).

Diversos outros autores destacam a importância da inércia térmica como estratégia bioclimática. Seja em relação à robustez dos sistemas construtivos ou especificação dos materiais corretos, os resultados de trabalhos neste tema justificam a alta influência do envelope construtivo, pois os valores observados são bastante consideráveis. (ASCIONE et al., 2015; GALLARDO et al., 2016; MORENO; MORAIS; SOUZA, 2017).

Para a adoção da melhor estratégia do ponto de vista da inércia térmica, deve ser considerada uma combinação da envoltória entre paredes externas e cobertura. Ainda, as propriedades de transmitância e capacidade térmica desses sistemas deve ser balanceada de forma a obter o melhor desempenho para cada clima. Segundo Eli (2020), envoltórias com inércia térmica mais elevada são recomendáveis principalmente em climas de maior amplitude térmica diária, visto que nesses casos a

capacidade térmica auxilia na mitigação de picos internos de temperatura. Sendo assim, destaca-se a necessidade de considerar a inércia térmica dos sistemas, integrando as características térmicas de cada envoltória. (ELI, 2020).

No que diz respeito ao consumo de energia, as coberturas podem ser um dos elementos mais importantes do envelope construtivo, a depender do fator de forma, especialmente em climas quentes. Sua influência na carga térmica para refrigeração e aquecimento interno pode chegar até cerca de 50%, e algumas bibliografias ainda afirmam que este limite pode ser de até 75% em alguns tipos de edificação. (JONES, 2010).

Nos ganhos de calor através do sol, a cor externa dos elementos da edificação possui alta influência. Isso ocorre porque a cor está associada à absorvância solar, propriedade superficial dos revestimentos externos que fornece a relação entre a quantidade de energia radiante absorvida pela radiação solar. Portanto, o controle da absorvância solar é uma estratégia altamente relevante no âmbito do desempenho térmico, pois esta propriedade determina o efeito térmico da radiação solar sobre as superfícies externas da edificação. (DORNELLES, 2008; MULHALL; AYNLEY, 1999).

É necessário considerar também que a especificação da tonalidade de tintas e revestimentos muitas vezes possui viés estético. Desta forma, há pesquisas que visam desenvolver materiais de diferentes tonalidades com absorvância reduzida em relação aos acabamentos convencionais. Com isso, expande-se o estudo de forma a possibilitar mais possibilidades de cores externas sem prejudicar significativamente o desempenho térmico. (DORNELLES; CARAM; SICHIERI, 2014).

A absorvância tem relevância em todo os elementos do envelope construtivo que estejam expostos à radiação solar, sendo os principais as paredes externas e as coberturas. Destaca-se, porém, a alta relevância da absorvância e da emissividade na cobertura, devido ao ângulo de incidência do sol nesses elementos (DORNELLES, 2008; DORNELLES; CARAM; SICHIERI, 2014). Alguns trabalhos demonstram essa importância, apresentando a influência da absorvância solar e do albedo de coberturas no desempenho térmico e na eficiência energética de edificações. (BANIASSADI et al., 2018; COELHO; GOMES; DORNELLES, 2017; TALEGHANI et al., 2014).

Nesse contexto, a absorvância solar das superfícies opacas expostas ao ambiente externo pode ser amplamente explorada para obter o desempenho térmico desejado na envoltória e, conseqüentemente, na edificação. Deve ser considerado

também que, ao longo da vida útil do edifício, os materiais passarão por processos de degradação relacionados a efeitos químico-físicos da exposição, carbonatação, deposição de poeira e sujidades, entre outros, afetando as propriedades térmicas de suas superfícies. Alguns estudos avaliam como esse fator pode afetar o desempenho térmico, de forma a disseminar o assunto e considerar a utilização desses dados na especificação de revestimentos e acabamentos. (COELHO; GOMES; DORNELLES, 2017; DORNELLES; CARAM; SICHIERI, 2015).

Em relação às aberturas, também podem ser exploradas como estratégia de projeto, sendo que sua correta aplicação está relacionada às variáveis climáticas. Para climas quentes, recomenda-se que as janelas sejam posicionadas de forma a receber o mínimo de radiação solar possível, porém necessitam permitir boa ventilação natural para a renovação e resfriamento do ar interno; para locais frios, esta estratégia se inverte, necessitando de aquecimento com a entrada de luz solar e fechamento hermético. (FROTA; SCHIFFER, 2003; LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014).

Há de se considerar, porém, que em climas temperados é necessário combinar estratégias, visando possibilitar ganhos de desempenho em ambos os períodos quentes e frios. Frota e Schiffer (2003, p. 74) defendem que sejam buscadas alternativas que ofereçam opções ao usuário, como aberturas que permitam ventilação cruzada combinada ao sombreamento, em períodos quentes, e fechamento hermético associado a ganhos de calor através do sol em períodos frios. Com isso, este sistema da edificação pode operar em locais cujo clima possui elevada amplitude térmica, de forma a melhorar as condições de conforto.

No âmbito do desempenho térmico, portanto, as janelas possuem duas principais funções que podem ser exploradas para obter condicionamento passivo: permitir a entrada de luz e calor do sol e possibilitar ventilação natural por ação dos ventos. Sendo assim, seu posicionamento e sua especificação são estratégicos e visam à integração destes fenômenos do clima ao comportamento da edificação, abordando-os como recursos para um melhor desempenho térmico da edificação. (DEKAY; BROWN, 2014; FROTA; SCHIFFER, 2003).

Para uma adequada ventilação natural, é importante que as aberturas façam parte de um sistema integrado da edificação, com áreas de entrada e saída de ar dispostas estrategicamente. Sendo assim, a ventilação pode ocorrer por ação dos ventos, no sentido horizontal (Figura 5), ou por efeito chaminé (Figura 6), quando o

projeto indica aberturas específicas para ventilação na base e no topo. Ainda, ambos os sistemas podem trabalhar em conjunto, devendo ser previstos como tal, pois em alguns cenários os dois fenômenos podem agir de forma oposta. (DEKAY; BROWN, 2014; FROTA; SCHIFFER, 2003).

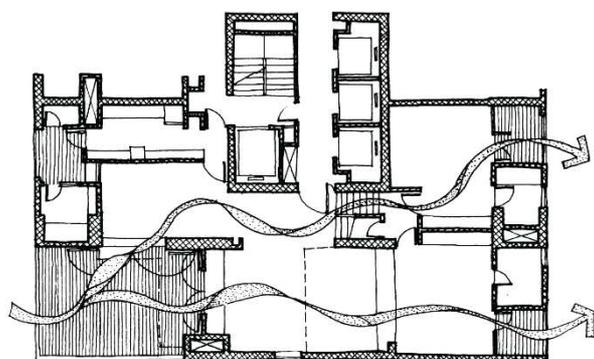


Figura 5 – Ventilação natural no sentido horizontal (ventilação cruzada)

Fonte: DEKAY; BROWN, 2014.

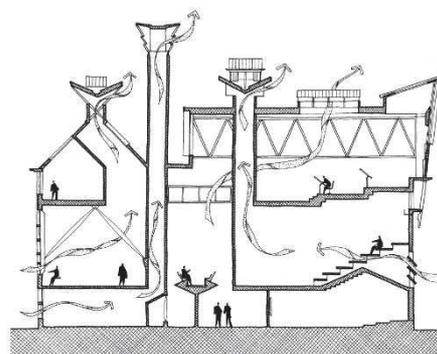


Figura 6 – Ventilação natural no sentido vertical (efeito chaminé)

Fonte: DEKAY; BROWN, 2014.

Além desses componentes, alguns elementos externos à edificação também podem auxiliar em ganhos de desempenho térmico, como sombreamentos, massas térmicas, vegetações, corpos d'água, entre outros. Assim, a edificação e seus elementos de entorno não somente são afetados pelas condições climáticas externas, mas fazem parte desse conjunto urbanístico. As principais características que afetam esse sistema são a permeabilidade à água e ao ar dos materiais externos, a capacidade térmica dos elementos, as áreas de vegetação e corpos d'água e a taxa de ocupação do solo. (ASSIS; PEREIRA, 2013; DEKAY; BROWN, 2014; TALEGHANI et al., 2014).

Considerando o exposto, é possível verificar o importante papel da edificação e seus elementos no desempenho térmico. Nesse grande sistema, há diversos fenômenos de trocas térmicas entre o edifício e o ambiente, os quais podem ser explorados para obter condicionamento térmico passivo, visando ao atendimento dos parâmetros de conforto com minimização do consumo de energia.

### 2.1.3 Uso e operação

O uso de uma edificação compreende as características operacionais associadas aos ocupantes, envolvendo sua rotina e planejamento. A forma de uso de um edifício é de alta relevância, pois a demanda de equipamentos e o consumo de energia tendem a seguir as atividades das pessoas que usam determinado espaço. (DEKAY; BROWN, 2014).

Segundo Mahdavi (2011), o impacto dos ocupantes no desempenho de edifícios é frequentemente subestimado. De acordo com Sorgato, Melo e Lamberts (2016), a definição das propriedades térmicas dos componentes do edifício devem considerar a ocupação e o comportamento do usuário. Nesse cenário, o desempenho térmico e energético é afetado não somente pela presença das pessoas – cuja ocupação gera calor sensível e latente –, mas também pelas suas ações, incluindo uso de água, operação de equipamentos e manipulação dos sistemas da edificação. (MAHDAVI, 2011; SORGATO; MELO; LAMBERTS, 2016).

O calor gerado por uma pessoa em um ambiente possui relação com diversas variáveis, entre as quais há idade, gênero, estação do ano, tipo de atividade exercida, vestimenta, entre outros. Nos ambientes residenciais predominam as atividades de menor liberação de calor. Junto a este fator há a vestimenta, que cria uma resistência térmica entre o corpo e o ambiente, influenciando na liberação de calor ao ambiente e na sensação de conforto. (FROTA; SCHIFFER, 2003; RIVERO, 1985).

O nível de atividade e o calor liberado também possuem relação com o tipo de edificação, visto que as variações de uso podem alterar a percepção do usuário conforme o horário de ocupação. Conforme o tipo de edificação ou ambiente a ser analisado, são adotados padrões de uso (Figura 7) e suas cargas geradas, obtidas a partir de medições. A partir destes dados, tem-se a distribuição temporal e espacial da ocupação. (MAHDAVI, 2011).

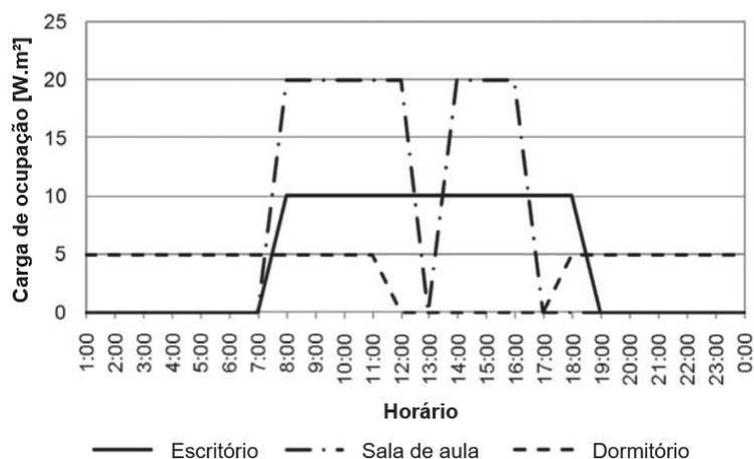


Figura 7 – Exemplos de padrão de uso em diferentes ambientes

Fonte: adaptado de Mahdavi (2011).

A adoção da ocupação, portanto, tende a seguir modelos estáticos, adotando configurações de uso padronizadas conforme cultura e hábitos locais. No entanto, o uso real segue modelos estocásticos, visto que frequentemente a ocupação e as ações se desenvolvem ao longo do tempo sem apresentar um padrão repetitivo. Com isso, o uso toma complexidade, podendo ser previsto com maior exatidão em edifícios comerciais e possuindo maiores incertezas em ambientes residenciais, os quais envolvem maior diversidade de uso. (BALVEDI; GHISI; LAMBERTS, 2018).

Nesse cenário, o usuário desempenha um papel que interfere no funcionamento da edificação e de seus sistemas, muitas vezes com um padrão aleatório ou imprevisível. Assim, toma as decisões, por exemplo, de abrir ou fechar janelas, conforme sua necessidade de ventilação natural e sombra, de ligar equipamentos para exercer uma atividade específica, liberando calor ao ambiente, ou de ligar o ar-condicionado, gerando consumo de energia ao acionar o sistema de condicionamento ativo. Somado a isso, tem-se o crescimento da quantidade de equipamentos e de condicionadores de ar nas residências, devido ao maior poder de compra da população, à redução de custos e preços de venda e ao aumento da pretensão pessoal pelo conforto. Estudos comprovam que os hábitos do usuário, oriundos principalmente de fatores culturais, podem gerar operações incorretas da edificação, gerando consumo excessivo de energia. (BALVEDI; GHISI; LAMBERTS, 2018; SORGATO; MELO; LAMBERTS, 2016).

Segundo Eli (2020), o padrão de uso de uma unidade habitacional influencia diretamente no desempenho térmico da edificação. O comportamento das pessoas

que ocupam as residências, ainda que tenha padrões normativos, dificilmente é representado na realidade, pois há uma alta variação observada. Através de resultados obtidos por simulações, verifica-se que é possível reduzir de 60% a 85% da carga térmica da residência dependendo do comportamento dos usuários. Ainda, em climas mais amenos essa influência tende a ser maior do que em climas mais quentes. (ELI, 2020).

Em relação aos hábitos de uso e seu impacto no desempenho, Sorgato, Melo e Lamberts (2016) abordam a questão da ventilação natural relacionada a hábitos culturais no Brasil que levam usuários a acionar ventilação natural através da abertura de janelas em períodos desfavoráveis ao desempenho térmico. Ou seja, embora o sistema seja projetado visando o correto uso e empregando a estratégia de ventilação natural, pode gerar adversidades conforme a preferência do usuário. Através de análises por simulação, os autores observaram que a demanda de energia do sistema de ar-condicionado pode atingir valores três vezes maiores quando não há critérios de ventilação natural que visam o desempenho térmico e energético. (SORGATO; MELO; LAMBERTS, 2016).

Ainda em relação aos hábitos, há indícios de que o aumento do consumo de energia decorrente do uso de equipamentos de ar-condicionado nas edificações pode tornar os usuários mais dependentes desses equipamentos, mesmo quando as condições de ventilação natural são suficientes para manter os ambientes internos em faixas de conforto térmico. Especialmente em climas quentes úmidos, percebe-se que a utilização ou não de condicionadores de ar está mais relacionada à preferência do usuário do que de fato a obter maior conforto térmico. Esse “vício” por ambientes estáticos, com temperatura constante, pode alterar significativamente o uso final de energia em relação à carga térmica prevista em projeto, devido ao acionamento do sistema sem uma real necessidade. (CÂNDIDO et al., 2010).

Entende-se, portanto, que o usuário possui considerável influência no desempenho térmico de edifícios, pois é quem opera os sistemas da edificação. É também quem habita os ambientes da edificação e estará, portanto, sujeito às variáveis de conforto térmico. De forma a simplificar essa variável em análises de desempenho, padrões de uso e ocupação são adotados. No entanto, tem-se como objetivo final proporcionar conforto ao usuário – desta forma, as variáveis de conforto térmico podem exercer um importante papel em parâmetros para determinar o desempenho térmico de edifícios.

## 2.2 REFERÊNCIAS NORMATIVAS E CERTIFICAÇÕES

Com base nos principais condicionantes de desempenho térmico de uma edificação, tem-se um conjunto de documentos e procedimentos, incluindo normas, regulamentos e certificações, que visam estabelecer métodos e critérios para análise de desempenho térmico e eficiência energética de edifícios. Seguindo essas metodologias é possível classificar os empreendimentos, tanto para enquadramento em requisitos normativos quanto para obtenção de certificações.

No contexto brasileiro, há duas normas que tratam do assunto, a NBR 15220 (ABNT, 2005) e a NBR 15575 (ABNT, 2013). Estas normas alinham-se às premissas da inclusão de sustentabilidade no setor da construção no Brasil. Ainda, tem-se certificações e programas de etiquetagem de empreendimentos, de determinações predominantemente públicas. Um importante exemplo nacional trata-se do Selo Procel Edifica, que traz dois regulamentos para a certificação: o Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (RTQ-R, 2010) e o Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas (RTQ-C, 2010). Estes, junto às normas nacionais, compreendem os primeiros grandes passos no Brasil para incentivo e estímulo de edificações com adequado desempenho térmico e eficiência energética. (AGOPYAN; JOHN, 2011; CHVATAL, 2014).

Em relação às normas nacionais, ambas conversam de forma próxima, visto que definições da NBR 15220/2005 são utilizadas na NBR 15575/2013, tais como o zoneamento bioclimático brasileiro e as metodologias de cálculo. Uma diferença entre ambas é que a NBR 15220/2005 teve sua iniciativa voltada a projetos de habitações de interesse social, e a NBR 15575/2013 traz critérios e requisitos para todas as tipologias de edificações residenciais. (ABNT, 2005, 2013; CHVATAL, 2014).

A norma brasileira de desempenho não especifica materiais e sistemas construtivos a serem adotados nas edificações, mas trata de sistemas construtivos com base no seu desempenho, estabelecendo requisitos que estes devem atender, independentemente dos materiais empregados. Nesse cenário, Campos (2013, p. 52) explica que a NBR 15575 (ABNT, 2013) “tem como foco os requisitos dos usuários para o edifício habitacional e seus sistemas, quanto ao seu comportamento em uso, e não na prescrição de como os sistemas são construídos”. Portanto, a norma define

os requisitos (qualitativos), critérios (quantitativos ou premissas) e métodos de avaliação (ensaios), levando à determinação final de desempenho.

Apesar de ambas as normas NBR 15220/2005 e NBR 15575/2013 tratarem de desempenho térmico de edificações, Ferreira, Souza e Assis (2017) chamam a atenção para o fato de que existem discrepâncias nos valores limites de inércia térmica de paredes e coberturas, além de questões relacionadas às recomendações e requisitos entre zonas bioclimáticas distintas. Além disso, percebe-se que os valores trazidos pela NBR 15220/2005 são mais restritivos que os valores da NBR 15575/2013 (ABNT, 2005; ABNT, 2013), ainda que a primeira se restrinja a habitações de interesse social e a Norma de Desempenho seja aplicável a todos os padrões de edifícios. Ainda, há trabalhos que apresentam diferenças entre os requisitos das normas brasileiras e argentinas, mesmo entre regiões de clima relativamente semelhantes. (FERREIRA; SOUZA; ASSIS, 2017; NETTO; CZAJKOWSKI, 2016). Destaca-se que os trabalhos citados não levam em consideração as alterações da NBR 15575/Em1 (ABNT, 2021) em relação à NBR 15575 (ABNT, 2013) – porém, grande parte dos valores de norma citados nesses trabalhos se mantiveram inalterados na emenda, mantendo válidas e atuais essas análises.

Essas duas normas representam, portanto, o *status quo* do cenário normativo do desempenho térmico de edifícios no Brasil. Por serem as primeiras normas nacionais a tratar do assunto, possuem alta relevância, reconhecimento e aplicação. No entanto, diversos trabalhos evidenciam a necessidade de revisão de ambas as normas. Com destaque à NBR 15575 (ABNT, 2013), as críticas se direcionam principalmente aos valores limites das propriedades térmicas de paredes e coberturas e à metodologia de simulação. (FERREIRA; SOUZA; ASSIS, 2017; OLIVEIRA; SOUZA; DA SILVA, 2017; SORGATO; MELO; LAMBERTS, 2014).

O desenvolvimento de um consistente corpo de normas técnicas possui alta relevância para o desenvolvimento do desempenho térmico e da eficiência energética dos edifícios. No entanto, apesar de diversas normas citarem a simulação computacional como o método mais indicado para esse tipo de análise, percebe-se que não há metodologias e parâmetros estabelecidos no âmbito global. Essa questão está relacionada, inclusive, com a difusão do uso de simulação computacional como ferramenta de análise e otimização de projetos entre arquitetos e engenheiros. (GRIGOLETTI; SATTTLER, 2010; TIAN et al., 2018).

No cenário internacional, as normas ASHRAE ganham destaque. Sua relevância também se dá pelo fato de que algumas dessas normas possuem seu atendimento vinculado a certificações ambientais relevantes no âmbito da construção sustentável. A ASHRAE 55 (ASHRAE, 2017) trata de conforto térmico com foco nos usuários, trazendo as condições ambientais necessárias para ocupação de ambientes. Suas cartas psicrométricas e seu gráfico de zona de conforto são amplamente utilizados para análise de conforto térmico e projeto de sistemas de condicionamento de ar. A ASHRAE 90.1 (ASHRAE, 2019a) trata de eficiência energética, relacionando todos os fatores como envelope do edifício, sistemas de ar-condicionado, sistemas de aquecimento de água, consumo de energia, iluminação, entre outros. Por sua vez, a ASHRAE 62.1 (ASHRAE, 2019b) determina as condições aceitáveis de ventilação e qualidade do ar interno, associando essas questões ao projeto e operação de sistemas de ventilação. Esse conjunto de normas contribui para os três principais tópicos da ASHRAE em termos de influência na indústria de equipamentos voltados a edifícios eficientes – energia, qualidade do ar interno e conforto térmico. (ASHRAE, 2017, 2018, 2019a, 2019b, 2019c; LIU, 2019; MELO; SORGATO; LAMBERTS, 2014).

O trabalho de Silveira (2014) realizou análises de conforto e desempenho térmico utilizando as normas NBR 15575 (ABNT, 2013) e ASHRAE 55 (ASHRAE, 2017). Na pesquisa, o autor utiliza as principais qualidades dessas normas para uma análise integrada e aplicação em uma situação de uso de uma residência. Ainda, levanta as principais deficiências do método trazido pela norma nacional, citando a ausência da consideração do uso e da ocupação e adotando um modelo para simulação da ventilação natural por *airflow network* (fluxo de ar por aberturas), de forma a desenvolver esse importante aspecto no método empregado. (SILVEIRA, 2014). Destaca-se que ambos os fatores foram alterados na norma, no novo método que consta na NBR 15575-1/Em1 (ABNT, 2021).

No âmbito das certificações para edifícios sustentáveis (*green buildings*), Agopyan e John (2011) destacam que estas consistem, muitas vezes, em ferramentas de *marketing*. No Brasil, esse nicho de mercado conta com duas grandes certificações importadas e adaptadas – o Leadership in Energy and Environmental Design (LEED) e o Alta Qualidade Ambiental (AQUA). Dois relevantes programas de certificação desenvolvidos especialmente para a realidade brasileira são o Selo Procel Edifica, da ELETROBRAS/PROCEL, e o Selo Casa Azul de Construção Sustentável, da Caixa

Econômica Federal, o qual tem também como vantagem a emissão gratuita da certificação para os clientes da instituição. (AGOPYAN; JOHN, 2011).

No que diz respeito à aplicação e eficácia desses selos na construção civil brasileira, Agopyan e John (2011) alegam que as certificações importadas, ainda que passem por adaptação para aplicação no Brasil, têm sua eficácia reduzida por terem sido concebidas em países mais desenvolvidos e de realidade distinta da construção civil brasileira. Isso, junto ao alto custo para certificação, leva esses selos a serem restritos a um estreito mercado de alto padrão, reduzindo seu potencial de efetivamente tornar as edificações do país mais sustentáveis. Como exceção, os autores destacam que os programas nacionais possuem maior alcance para edificações de baixo e médio padrão, por considerarem a realidade brasileira, especialmente quando consistem em iniciativas públicas. (AGOPYAN; JOHN, 2011).

Diversos trabalhos destacam que a existência de uma certificação para uma edificação, por si só, não torna essa sustentável. Uma vez que os selos são emitidos apenas com os dados de projeto e estimativas de consumo de energia e recursos, a realidade no cenário pós-ocupação pode apresentar desvios significativos. Nesses casos, o selo assume papel exclusivamente formal e comercial, não estando relacionado necessariamente, a um menor consumo para uso e operação do edifício. Esses estudos salientam a necessidade de revisão de regulamentos de certificação, incluindo análises do cenário pós-ocupação e fatores que considerem a influência do usuário final. (KERN et al., 2016; NEWSHAM; MANCINI; BIRT, 2009; SCOFIELD, 2009, 2013).

Com isso, entende-se a relevância das normas e dos programas de certificação para a conformidade de edificações no que diz respeito aos parâmetros de sustentabilidade, desempenho térmico e eficiência energética. Há de se considerar, porém, que estes documentos não representam o cenário do assunto como um todo, e por isso estão em constante revisão e evolução. Assim, é necessário que a elaboração e revisão das normas e dos programas de certificação sejam operados de forma próxima à comunidade técnico-científica, colhendo as melhorias levantadas e sugeridas pelos pesquisadores e profissionais do ramo para atingir um processo de melhoria contínua em suas documentações, refletindo os benefícios no mercado da construção.

## 2.3 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

No desenvolvimento de edificações mais sustentáveis, a simulação computacional surgiu através de ferramentas que permitem combinar os fatores que afetam o funcionamento e a eficiência dos edifícios e seus sistemas de forma integrada, possibilitando relacionar o clima, o projeto e parâmetros operacionais. Para que seja possível obter seus benefícios, porém, é necessário desenvolver e integrar conhecimentos relacionados à concepção de cenários de projeto, à modelagem computacional e ao campo de simulação como um todo. Assim, modelos estáticos evoluíram para modelos dinâmicos multidisciplinares, aproximando-os da realidade. Esse trabalho, junto à complexidade dos efeitos que se deseja simular, torna-se um notável desafio e compreende uma área específica para atuação profissional e pesquisa e desenvolvimento científico. (HENSEN; LAMBERTS, 2011).

O potencial e a complexidade de simulações computacionais se devem ao fato de que, por trás dos seus mecanismos, há conhecimentos relacionados a questões de diversas disciplinas, como físicas, matemáticas, biológicas, ciência dos materiais, comportamento humano, climatologia e ciências da computação. Com isso, as ferramentas atuais permitem realizar análises integradas de transferências de calor, ventilação natural e mecânica, iluminação e uma grande variedade de equipamentos e componentes da edificação. Ainda, o surgimento de ferramentas com interface gráfica e recursos mais intuitivos permitem uma maior facilidade para operação por parte do usuário, aumentando o acesso a esse tipo de análise. (HENSEN; LAMBERTS, 2011; NGUYEN; REITER; RIGO, 2014; SPITLER, 2006).

A aplicação de simulações possui um grande potencial de auxiliar engenheiros e arquitetos no desenvolvimento de projetos mais eficientes, especialmente quando ocorre ainda na fase de projeto. Porém, entre algumas dificuldades encontradas no seu uso tem-se o longo tempo para realização das análises, a baixa disseminação entre projetistas e a falta de padronização global de normas e métodos para simulação. Por outro lado, diversos benefícios seguem aproximando novos usuários ao longo do tempo, e entre esses destacam-se a confiabilidade dos algoritmos empregados pelos *softwares* disponíveis, a possibilidade de otimizar projetos de forma integrada conforme os resultados obtidos, o auxílio na tomada de decisões com embasamento técnico, entre outros. Assim, apesar de haver algumas dificuldades para o seu crescimento, o uso da simulação de edifícios como uma ferramenta para

otimização de projetos ainda se mostra promissor. (NGUYEN; REITER; RIGO, 2014; TIAN et al., 2018).

Tem-se no mercado diversos softwares disponíveis para simulação, tanto pagos quanto gratuitos. Entre esses, destacam-se o EnergyPlus (EUA) – o mais utilizado globalmente –, o DesignBuilder (Inglaterra) – com interface mais acessível e uso do mecanismo de cálculo do próprio EnergyPlus –, o WUFI (Alemanha), o eQUEST (EUA), o TRNSYS (EUA), entre outros. Portanto, há diversas opções disponíveis, sendo possível a adoção da ferramenta mais adequada para cada situação ou até mesmo a adoção de um conjunto de ferramentas, de forma a obter os maiores benefícios de cada. (CRAWLEY et al., 2008; NGUYEN; REITER; RIGO, 2014; TIAN et al., 2018).

Com a disponibilidade de ferramentas que permitem análises complexas e de alta confiabilidade, torna-se possível, por parte dos usuários, a obtenção de diversas informações relevantes. Com metodologias específicas de otimização e aplicação da simulação com objetivos pré-definidos, garante-se processos que tragam mais benefícios. Destaca-se o emprego de otimização em três fases, sendo estas pré-processamento, otimização e pós-processamento (Figura 8), além de análises sensíveis, as quais permitem isolar variáveis específicas, e otimização dinâmica (ou multifásica), com aplicação da simulação em diversas etapas distintas. (NGUYEN; REITER; RIGO, 2014; TIAN et al., 2018).

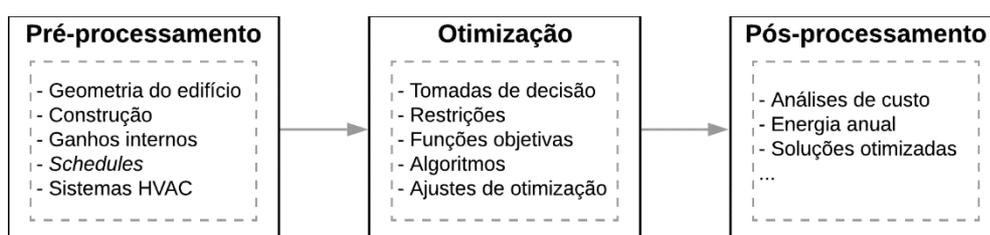


Figura 8 – Processo de otimização em três fases

Fonte: adaptado de Tian et al. (2018).

Assim, um processo de simulação, como um todo, consiste na inserção de variáveis de entrada (*inputs*), entre os quais se tem a geometria, construção e sistemas, elaboração das funções objetivas, algoritmos e configurações adicionais, simulação (*run*) e obtenção das variáveis de saída, ou resultados (*outputs*). Um processo de otimização pode trabalhar com essa sistemática de forma cíclica, com

ajustes na terceira fase e repetição do processo até que os critérios, pré-definidos, sejam satisfeitos. (NGUYEN; REITER; RIGO, 2014; TIAN et al., 2018).

O objetivo principal de uma simulação, portanto, consiste em promover representatividade do edifício real em um modelo computacional, com inclusão dos efeitos dinâmicos e dos processos físicos que se relacionam ao desempenho. A grande variedade de aspectos relacionados aos edifícios e seus sistemas traz a necessidade de estudos aprofundados relacionados a estas questões, possibilitando o desenvolvimento constante dos profissionais e das ferramentas de simulação. (CLARKE; HENSEN, 2015; SPITLER, 2006).

Para essa representação próxima à realidade em modelos computacionais, tem-se um detalhado processo de inserção dos *inputs* e configurações adicionais no arquivo de simulação. A geometria é inserida através da modelagem do edifício, normalmente em *softwares* específicos para este fim, sendo muito utilizados o SketchUp, Autodesk Revit e Rhino. Após, são inseridos os dados referentes à materialidade e construção, ganhos internos de calor (ocupação humana, atividades, equipamentos, iluminação etc., denominados *internal gains*), parâmetros relacionados à ventilação natural e infiltrações de ar (*airflow*), sistemas de Aquecimento, Ventilação e Ar-Condicionado (HVAC), entre outras variáveis específicas que podem ser aprofundadas. Ainda, esses parâmetros são, em muitas situações, operados pelos *schedules*, mecanismos que permitem inserir funções condicionais relacionadas a variáveis horárias, de temperatura, entre outras, de forma a especificar e determinar quando um determinado fenômeno, como os citados acima, ocorrerá. (CLARKE; HENSEN, 2015; HENSEN; LAMBERTS, 2011; NGUYEN; REITER; RIGO, 2014).

O processo de execução da simulação (*run*) realizado pelo *software* desenvolve os cálculos do arquivo elaborado sobre o arquivo climático da localidade para a qual deseja-se realizar a análise. Os dados presentes nesses arquivos – temperaturas, umidade, radiação solar etc. – são obtidos através de medições históricas em estações climáticas. O intervalo das medições é normalmente horário, portanto, é comum que para cada propriedade dos arquivos climáticos tenha-se 8.760 dados para um ano completo. De forma a diminuir distorções nos dados climáticos, que não representam as características típicas de um determinado clima, anos típicos são desenvolvidos através de parâmetros estatísticos. Quanto à disponibilidade, esses dados são reunidos e disponibilizados publicamente pelos organismos responsáveis

em diversos formatos de arquivos climático, os quais passam por atualizações constantes. (BARNABY; CRAWLEY, 2011).

Quanto ao formato desses arquivos, destacam-se o *EnergyPlus Weather Data* (EPW) e o *Typical Meteorological Year 3* (TMY3). Ambos contam com valores separados por vírgulas e incluem metadados relevantes. O formato EPW possui vantagens particulares no seu uso, como condições de projeto e sequências de períodos extremos, por ter sido desenvolvido especificamente para uso em simulações computacionais e por ser compatível com a grande maioria dos *softwares* disponíveis atualmente. (BARNABY; CRAWLEY, 2011).

Os métodos empregados para tratamento dos dados climáticos permitem a obtenção dos aspectos típicos do clima em questão. Para cada clima e finalidade, podem ser aplicados diferentes métodos na análise dos dados históricos, entre os quais destacam-se o TRY (*Test Reference Year*) e o TMY (*Typical Meteorological Year*). O TRY consiste na adoção de um ano completo que seja representativo do clima local, enquanto o TMY seleciona meses representativos que não necessariamente fazem parte do mesmo ano entre si. Esse segundo método, mais comumente utilizado, possui alta precisão e proporciona expectativas seguras para estimar o comportamento térmico e energético de edifícios a longo prazo. (BARNABY; CRAWLEY, 2011).

Para localidades mais afastadas dos grandes centros urbanos, é comum que não se tenha estações climáticas próximas. Nessas situações a escolha de um arquivo climático que apresente características semelhantes ao local de estudo pode se tornar uma tarefa complexa. Segundo Barnaby e Crawley (2011), não há um procedimento padrão estabelecido para esses casos, mas é uma boa prática a seleção de locais com latitude e altitude semelhantes, somada a análise estatística mensal com ferramentas utilitárias específicas, normalmente disponíveis pelos próprios *softwares* de simulação. O zoneamento bioclimático também pode auxiliar nessa tarefa, apesar de haver algumas particularidades que exigem cuidados – segundo Bogo (2016), no Brasil há cidades de altitude significativamente distintas localizadas na mesma zona bioclimática. Assim, os mapas podem fazer parte desse processo, porém a análise comparativa entre cidades deve ser feita de forma crítica e cautelosa, devido à sua relevância na representatividade de cada local. (BARNABY; CRAWLEY, 2011; BOGO, 2016).

Uma importante questão, muitas vezes desconsiderada na elaboração de dados climáticos, é a variação climática ao longo do tempo. Considerando que as simulações são feitas para projeções futuras, considerar o clima do passado pode trazer desvios significativos em relação à realidade. Assim sendo, algumas técnicas foram desenvolvidas para permitir a obtenção de dados climáticos considerando as mudanças climáticas. Com tratamentos estatísticos por interpolação, projeta-se os dados conforme a necessidade de cada projeto, sendo comuns as projeções para 30 e 50 anos. Dessa forma, torna-se possível prever as condições de uso do edifício em evolução com as alterações que ocorrerão no ambiente que o circunda. (BARNABY; CRAWLEY, 2011; SAILOR, 2014; TRIANA; LAMBERTS; SASSI, 2018).

O processo de simulação, assim como qualquer análise experimental, será sempre acompanhado de uma incerteza. Com métodos complexos para sua mensuração, este parâmetro pode indicar numericamente a precisão de uma determinada metodologia ou de um determinado modelo elaborado. Pelo fato de as simulações envolverem um grande número de informações, o usuário deve estar atento para a fonte dos dados coletados e para valores padronizados (*default*) que podem não estar próximos do cenário real. Essas análises, junto a procedimentos de validação do modelo, possuem um grande potencial de aumentar a representatividade dos modelos computacionais. (CLARKE; HENSEN, 2015; NGUYEN; REITER; RIGO, 2014; SILVA; ALMEIDA; GHISI, 2017).

No que diz respeito à representação geométrica das edificações, esta ocorre através da modelagem para o *software* de simulação. Existem diversas formas de representar uma edificação, com diferentes níveis de detalhamento e simplificação. Segundo Veiga (2021), simplificações de modelos que tornam superfícies próximas aos ambientes de análise com a condição de contorno adiabática (sem troca de calor) impede o fluxo de calor, sendo esse vertical, no caso de superfícies como o piso e o teto, e horizontal, no caso de paredes. Ainda, o autor destaca que dentre as variáveis existentes entre simulações de desempenho térmico, a principal é o clima, e as características geométricas possuem maior influência principalmente em relação às propriedades de altura do pavimento da unidade habitacional de análise e percentual de aberturas nos ambientes. Sendo assim, em metamodelos para estimar o desempenho térmico de edificações, a tendência é que esses dados de entrada tomem relevância. (VEIGA, 2021).

As simulações consistem, portanto, em importantes ferramentas para análises de desempenho em situações complexas. Suas características permitem investigar diversos cenários para um determinado projeto e, portanto, devem fazer parte da análise de viabilidade de soluções e das tomadas de decisão que exijam embasamento técnico. O atual contexto sugere que esse tipo de ferramenta integre, cada vez mais, a rotina de projetistas, consultores e pesquisadores. Esse processo, junto ao maior desenvolvimento das normas e metodologias vigentes, trabalhará em prol de uma crescente disseminação dessa tecnologia.

### **3 MÉTODO DE PESQUISA**

Para atingir o objetivo geral do trabalho, que consiste na análise de sistemas de paredes, uso e operação de unidades habitacionais e métodos de modelagem de edificações, a estratégia de pesquisa utilizada consistiu no estudo de casos através de simulações computacionais. Foram adotados projetos residenciais de habitação popular, tendo como variáveis: o modelo da edificação, a zona bioclimática, sistema de parede, variações de uso e métodos de modelagem computacional, a seguir descritas.

O método de simulação computacional, de forma geral, seguiu o disposto na NBR 15575-1/Em1 (ABNT, 2021). Algumas características das simulações, porém, foram alteradas por personalizações específicas relacionadas aos objetivos desse trabalho, sendo identificadas ao longo da descrição do método. Uma das principais diferenças é que nesse trabalho os resultados das simulações foram comparados entre si, sem o uso de uma edificação de referência, pois não foram determinados níveis de desempenho. Destaca-se que não foi analisada a influência de sistemas de cobertura e aberturas para ventilação, que são mantidas fixas nesse estudo, sendo dada a ênfase para as variáveis citadas no parágrafo anterior.

#### **3.1 VARIÁVEIS INVESTIGADAS**

##### **3.1.1 Modelos da edificação**

Para a realização do estudo, foram adotados dois modelos de edificações, sendo uma residência unifamiliar, denominada “casa” (Figura 9) e um edifício residencial vertical multifamiliar de cinco pavimentos, denominado “prédio” (Figura 10), ambos de habitação popular e com pé-direito de 2,60 m. O modelo de residência unifamiliar trata-se de um projeto padrão de habitação popular da Caixa Econômica Federal, enquanto o edifício multifamiliar foi fornecido por uma empresa de incorporações atuante em programas nacionais de habitação.

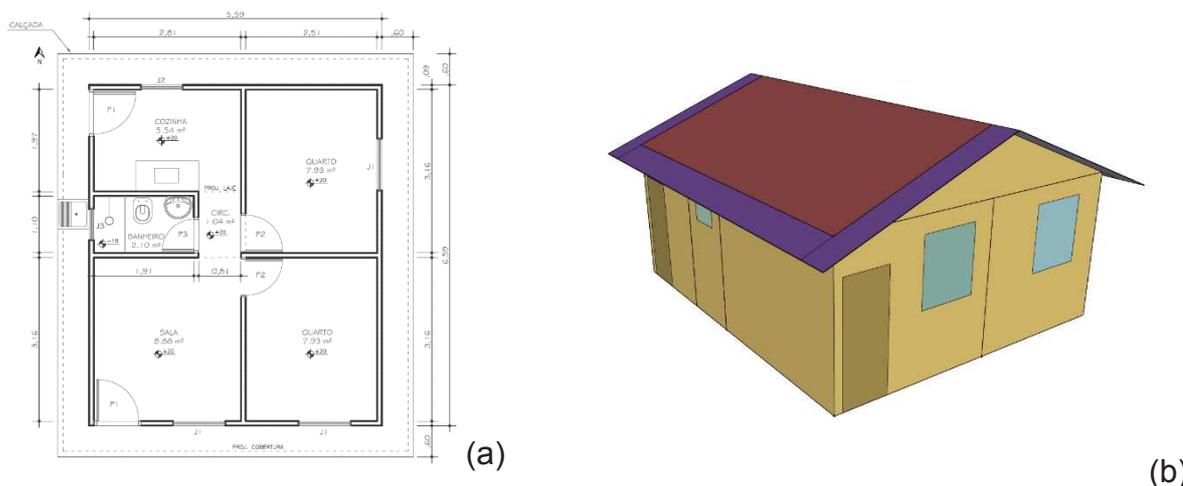


Figura 9 – Modelo de residência unifamiliar adotado, denominado “casa”: (a) planta baixa e (b) modelo de simulação

Fonte: caixa.gov.br.

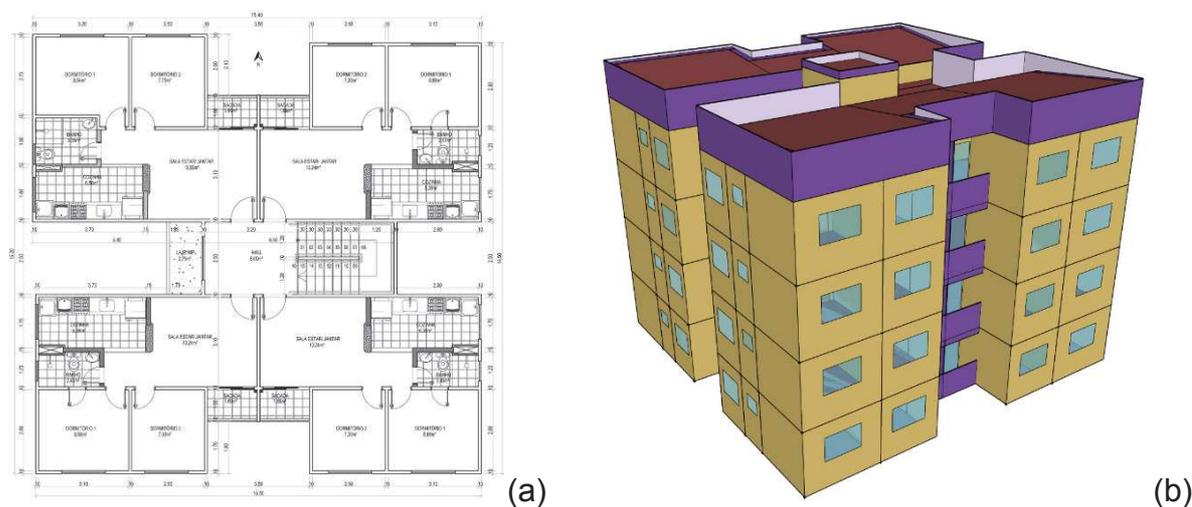


Figura 10 – Modelo de edifício residencial multifamiliar adotado, denominado “prédio”: (a) planta baixa e (b) modelo de simulação

Fonte: Empresa A.

### 3.1.2 Zonas bioclimáticas

O estudo foi realizado visando englobar diferentes variações climáticas no cenário brasileiro. Desta forma, foram adotadas 4 cidades (Tabela 1), classificadas conforme o zoneamento da NBR 15220 (ABNT, 2005). Foram adotados os arquivos climáticos fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) no formato EnergyPlus Weather Format (EPW), cujos dados básicos foram registrados no período de 2001 a 2010 para cada cidade adotada.

Tabela 1 – Cidades analisadas na pesquisa

Cidade	Estado	Zona Bioclimática
Curitiba	PR	1
Porto Alegre	RS	3
Cuiabá	MT	7
Manaus	AM	8

Fonte: autor.

### 3.1.3 Sistemas de parede

Os sistemas de paredes analisados são apresentados na Tabela 2 e na Figura 11. Suas características térmicas são apresentadas na Tabela 3, em termos de transmitância térmica –  $U$  ( $W/m^2K$ ); Capacidade térmica –  $CT$  ( $kJ/m^2K$ ) e atraso térmico –  $\phi$  (h), tendo sido calculadas conforme NBR 15220 (ABNT, 2005).

Tabela 2 – Sistemas construtivos analisados

Sigla	Tipologia	Descrição do sistema construtivo
<b>P1-CER</b>	Alvenaria	Alvenaria de blocos cerâmicos 14x19x29 cm, com revestimento interno em gesso de 5 mm e externo em argamassa cimentícia de 2,5 cm
<b>P2-CON</b>	Parede de concreto	Concreto maciço de 10 cm de espessura, sem revestimentos
<b>P3-SL</b>	Sistema leve	Sistema leve com placa interna de gesso de 12,5 mm, núcleo em lã de rocha de 75 mm e fechamento externo em placa cimentícia de 10 mm

Fonte: autor.

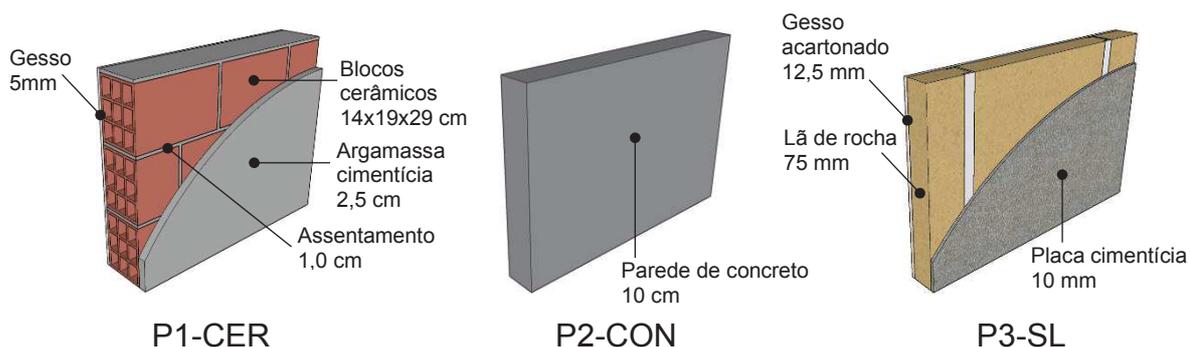


Figura 11 – Sistemas de paredes

Fonte: autor.

Tabela 3 – Características térmicas dos sistemas construtivos

Sigla	U (W/m <sup>2</sup> .K)	CT (kJ/m <sup>2</sup> .K)	φ (h)
P1-CER	1,59	142	4,3
P2-CON*	4,40	220	2,2
P3-SL	0,53	29	3,2

Obs: U – transmitância térmica; CT – capacidade térmica; φ – atraso térmico; \* Sistema de referência indicado pela NBR 15575-1/Em1 (ABNT, 2021).

Fonte: autor.

Destaca-se que, nos cenários do sistema P1-CER, para as paredes internas foram adotados blocos de mesma tipologia das paredes externas, porém com espessura de 9 cm. Nos demais cenários, as paredes internas foram compostas pelo mesmo sistema construtivo das paredes externas. Para todas as paredes externas analisadas, foi considerada uma pintura externa em cor média, com absorvância à radiação solar ( $\alpha$ ) de 0,58, sendo esse adotado como o valor degradado em 3 anos para absorvâncias iniciais de 0,50, conforme NBR 15575-1/Em1 (ABNT, 2021).

### 3.1.4 Uso e operação

Os padrões de uso investigados consideram 4 ocupantes, sendo que 2 desocupam a unidade habitacional no período da manhã e da tarde e os outros 2 desocupam apenas no período da manhã. Devido ao caráter estocástico do uso e operação de unidades habitacionais, foram analisados outros padrões, relacionando-os com o de referência. A Figura 12 apresenta um fluxograma com o resumo dos padrões de uso e operação analisados.

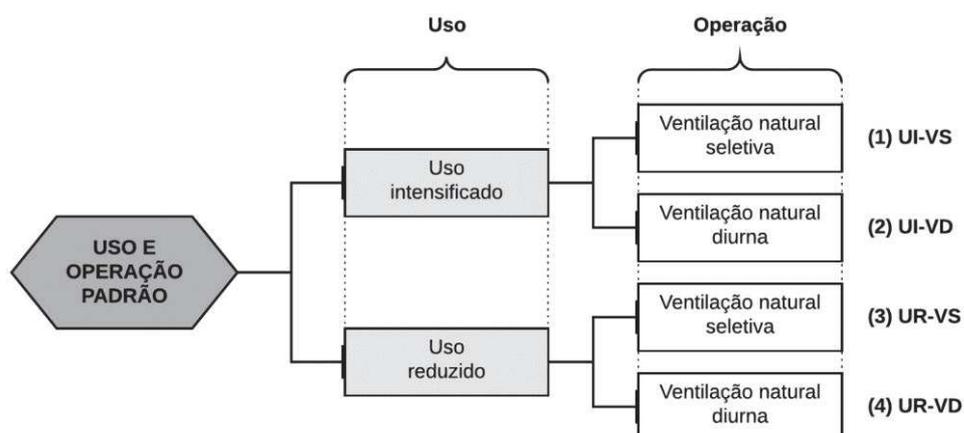


Figura 12 – Padrões de uso alternativos analisados

Obs: UI – Uso intensificado; UR – Uso reduzido; VS – Ventilação seletiva;

VD – Ventilação diurna.

Fonte: autor.

Quanto à ocupação e, conseqüentemente, o uso da unidade habitacional, foram adotadas duas variações: uso intensificado, com ocupação ao longo de todo o dia, e uso reduzido, com ocupação apenas no período noturno. Quanto à operação da edificação, foi analisado o efeito das alterações na ventilação natural. Assim, foram adotadas duas variações: ventilação seletiva e ventilação diurna. Os padrões de uso e operação desses cenários alternativos são apresentados no Apêndice A. Destaca-se que nas análises de uso as simulações foram realizadas apenas em cenários com uso da ventilação natural.

### 3.1.5 Modelagem da edificação multifamiliar

Atualmente, as metodologias nacionais para simulação de desempenho térmico orientam que edifícios multipavimentos sejam modelados e simulados na sua integridade, visando preservar as trocas térmicas internas. No entanto, as simulações realizadas nessa fase visam embasar tecnicamente essa questão, analisando diferentes formas de modelagem e análise de edifícios multipavimentos, baseando-se ainda em premissas de metodologias anteriores.

Assim, foi adotado o edifício residencial multifamiliar já apresentado na Figura 10, com o qual foram realizadas simulações com métodos alternativos de modelagem. Esses métodos são provenientes da NBR 15575/2013, que considerava que as

unidades de pior desempenho térmico, tanto para verão quanto inverno, podem ser consideradas unidades representativas de desempenho pois, ao se determinar o seu desempenho, tem-se o pior caso das unidades habitacionais de uma edificação multifamiliar. Ainda, considera-se que essas unidades se localizam sempre no último pavimento da edificação, no caso de pavimentos idênticos, e que essas unidades são selecionadas diretamente pela análise da orientação solar, adotando uma unidade de posição solar crítica para análise de desempenho térmico no verão e outra unidade no inverno.

Os métodos de modelagem alternativos adotados consistem em simplificações de modelagem tomando como base a premissa de que pode ser analisado somente os resultados de desempenho das unidades habitacionais de pior desempenho, ou seja, as unidades representativas. Sendo assim, as outras unidades habitacionais presentes na edificação multifamiliar não têm seus resultados analisados, apenas contribuem para as trocas térmicas internas e influenciam indiretamente nos resultados das unidades habitacionais representativas, as quais por sua vez são analisadas. Logo, as simplificações de modelo consistem em desconsiderar a modelagem de zonas térmicas que não façam parte das unidades habitacionais representativas. Os métodos de modelagem analisados estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Métodos de modelagem analisados

<b>Método</b>	<b>Descrição da modelagem</b>
M1-COMP	Edifício modelado completamente
M2-INT	Modelados o primeiro pavimento, um pavimento intermediário e o último pavimento do edifício
M3-2PAV	Modelados somente os 2 últimos pavimentos do edifício
M4-1PAV	Modelados somente o último pavimento do edifício
M5-UH	Modelada somente as unidades habitacionais representativas

Fonte: autor.

O primeiro modelo, com modelagem total, consiste na condição adotada para as fases anteriores do estudo, ou seja, é a referência para as análises comparativas realizadas nessa fase. Destaca-se que em todos os modelos as superfícies externas possuem contato com o meio externo, com ação do sol e dos ventos. Ainda, as superfícies internas possuem a troca de calor entre zonas. No primeiro e no segundo modelo, considera-se o contato do piso do primeiro pavimento da edificação com o

solo, através da ferramenta *Ground Domain* do EnergyPlus. No segundo modelo, os pavimentos não modelados foram integrados através da ferramenta de multiplicação de pavimentos *ZoneGroup*. Nos modelos 3 a 5, desconsidera-se o contato com o solo e, para todas as superfícies que trocariam calor com zonas que serão desconsideradas, adota-se a condição de contorno adiabática, a qual desconsidera trocas de calor no elemento.

Assim, foi realizada análise dos resultados obtidos considerando as condições descritas, comparando os modelos de 2 a 5 com o modelo de referência, permitindo observar o comportamento térmico de modelos com modelagem reduzida e discutir a viabilidade do emprego dessas simplificações em análises, trazendo redução de tempo em modelagem e simulação.

### 3.2 CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO

As análises foram realizadas em três etapas, cujos cenários de simulação são apresentados na Tabela 5 através dos objetos de análises e variáveis de cada etapa. Ao todo, foram realizadas simulações de 128 cenários.

Tabela 5 – Descrição e quantificação dos cenários analisados por simulação

Objeto de análise		Variáveis	Cenários		Total de cenários
			Nº	Identificação	
Etapa 1	Sistemas de parede	Sistemas de parede	3	Conforme Tabela 2	48
		Edificações	2	Casa e Prédio	
		Condições de ventilação	2	Com e sem ventilação natural	
		Cidades	4	Conforme Tabela 1	
Etapa 2	Uso e operação	Cenários de uso	5	Conforme Figura 12	40
		Edificações	2	Casa e Prédio	
		Condições de ventilação	1	Com ventilação natural	
		Cidades	4	Conforme Tabela 1	
Etapa 3	Modelagem	Métodos de modelagem	5	Conforme Tabela 4	40
		Edificações	1	Prédio	
		Condições de ventilação	2	Com e sem ventilação natural	
		Cidades	4	Conforme Tabela 1	

Fonte: autor.

### 3.3 PARÂMETROS DE BASE E MÉTODOS ADOTADOS NAS SIMULAÇÕES

As simulações seguiram o método da NBR 15575-1/Em1 (ABNT, 2021), com adoção do *software* EnergyPlus versão 9.3 para simulação. A análise dos resultados foi feita ao longo de todo o período anual, e se baseou nos indicadores da mesma norma, com algumas exceções. Para uma análise completa, a metodologia traz a necessidade de simular os modelos em duas condições de utilização, com e sem o uso de ventilação natural, os quais foram adotados.

#### 3.3.1 Indicadores adotados

Nas simulações onde tem-se o uso de ventilação natural, determinou-se o percentual de horas ocupadas dentro de uma faixa de temperatura operativa (PHFT) de cada ambiente de permanência prolongada (APP) analisado. Para tal, a condição adotada é de temperatura operativa entre 18°C e 26°C, para cidades do Intervalo 1, até 28°C para cidades do Intervalo 2 e até 30°C para cidades do Intervalo 3. A aplicação dos intervalos é dada em função da média anual da temperatura externa de bulbo seco do clima local, sendo esse dado extraído do arquivo climático de cada cidade. Essa primeira condição de simulação, com a aplicação de ventilação natural, visa simular edificações em cenários nos quais seus ocupantes não possuem a disponibilidade de equipamentos de ar-condicionado. A Tabela 6 apresenta esses dados.

Tabela 6 – Intervalos de temperaturas externas de bulbo seco e limites do PHFT

Intervalo	Delimitação	Limites do PHFT
Intervalo 1	$TBS_m < 25,0 \text{ °C}$	$18,0 \text{ °C} \leq T_{OAPP} < 26,0 \text{ °C}$
Intervalo 2	$25,0 \text{ °C} \leq TBS_m < 27,0 \text{ °C}$	$T_{OAPP} < 28,0 \text{ °C}$
Intervalo 3	$TBS_m \geq 27,0 \text{ °C}$	$T_{OAPP} < 30,0 \text{ °C}$

Obs: TBS<sub>m</sub> – Média anual da temperatura externa de bulbo seco; Limites do PHFT – Limites das faixas de temperaturas operativas adotadas para a determinação do PHFT; T<sub>OAPP</sub> – Temperatura operativa do APP.

Fonte: adaptado de NBR 15575-1/Em1 (ABNT, 2021).

Nesse trabalho, além do indicador PHFT foram adotados os indicadores de graus-hora, sendo esses o graus-hora de desconforto térmico por calor (GHc), o graus-hora de desconforto térmico por frio (GHf) e o somatório total de graus-hora de

desconforto térmico (GHT), aplicáveis também apenas aos cenários onde há o uso de ventilação natural. Esses indicadores consistem no somatório horário da diferença entre a temperatura operativa interna do APP e o limite de temperatura operativa interna adotada nos intervalos de conforto térmico (limite superior, no caso de GHc, e limite inferior, no caso de GHf). As faixas adotadas de temperatura operativa de conforto térmico seguiram os mesmos limites do PHFT apresentados na Tabela 6. Destaca-se que, por não haver limite inferior nos climas do Intervalo 2 e Intervalo 3, nesses casos não é calculado o GHf. Assim, o GHT consiste no somatório de GHc e GHf, nos casos em que há o cálculo de GHf, e possui o mesmo valor de GHc quando não há o cálculo de GHf.

Portanto, quando a temperatura operativa interna de um APP em um determinado horário consta fora do intervalo do PHFT, é realizado o cálculo da diferença em graus celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ) para o limite da faixa de conforto térmico que foi extrapolada, resultando no valor de graus-hora referente ao período horário analisado. Sendo assim, os indicadores de graus-hora consistem no somatório anual horário dessa verificação, sendo nulo quando o APP se encontra em condições de conforto térmico de acordo com os limites adotados.

Os indicadores PHFT, GHc, GHf e GHT têm sua análise horária condicionada à ocupação de cada APP, conforme padrões de uso adotados. Ainda, destaca-se que os resultados apresentados consistem na habitação como um todo, representando todos os APP's de cada unidade habitacional (UH) das edificações analisadas. Portanto, para a representação geral desses indicadores, é realizada a média aritmética de cada indicador entre todos os APP's existentes em cada edificação.

Destaca-se que os indicadores de graus-hora não constam na NBR 15575-1/Em1 (ABNT, 2021), mas foram adotados particularmente para esse trabalho. Ainda, não foram analisados os dados de temperatura máxima e mínima operativa anual das zonas térmicas, indicadores que estão presentes na norma mas que não foram adotados nesse trabalho.

Nas simulações sem o uso de ventilação natural, considera-se a disponibilidade de condicionadores de ar nos APP's. Sendo assim, determina-se a carga térmica integrada anual de refrigeração (CgTR) e a carga térmica integrada anual de aquecimento (CgTA), indicadores que quando somados resultam na carga térmica integrada anual total (CgTT). Nesses cenários, realiza-se o cálculo de cada indicador

conforme os limites apresentados na Tabela 7, sendo variável conforme cada intervalo de temperatura externa de bulbo seco de cada cidade.

Tabela 7 – Intervalos de temperaturas externas de bulbo seco e limites do CgTR e do CgTA

Intervalo	Delimitação	Limites do CgTR	Limites do CgTA
Intervalo 1	$TBS_m < 25,0\text{ °C}$	$T_{OAPP} \geq 26,0\text{ °C}$	$T_{OAPP} \leq 18,0\text{ °C}$
Intervalo 2	$25,0\text{ °C} \leq TBS_m < 27,0\text{ °C}$	$T_{OAPP} \geq 28,0\text{ °C}$	Não aplicável
Intervalo 3	$TBS_m \geq 27,0\text{ °C}$	$T_{OAPP} \geq 30,0\text{ °C}$	Não aplicável

Obs:  $TBS_m$  – Média anual da temperatura externa de bulbo seco; Limites do CgTR – Limites das faixas de temperaturas operativas adotadas para ao cálculo de CgTR; Limites do CgTA – Limites das faixas de temperaturas operativas adotadas para ao cálculo de CgTA.

Fonte: adaptado de NBR 15575-1/Em1 (ABNT, 2021).

Portanto, nesses cenários se considera um sistema de cálculo de carga térmica ideal, ou seja, que não possui perdas térmicas na sua operação. O cálculo de carga térmica de refrigeração adota um *setpoint* de  $23\text{ °C}$ , e para os climas enquadrados no Intervalo 1 o *setpoint* de aquecimento é de  $21\text{ °C}$ . Ainda, o acionamento de tais sistemas é condicionado à ocupação do APP, conforme padrões de ocupação adotados. Ao fim, realiza-se a soma dos valores totais obtidos de cada indicador em cada APP de cada UH da edificação, resultando na carga térmica total da habitação.

Os ganhos internos de calor considerados são a ocupação, a iluminação e os equipamentos. Em ambos os modelos de edificação adotados, os APP's são a sala, em ambiente integrado com a cozinha, e os dormitórios. Os padrões de ocupação, de uso de iluminação e de uso de equipamentos dos APP's são apresentados na Figura 13 (dormitórios) e na Figura 14 (salas). Destaca-se que não é considerada a presença de equipamentos nos dormitórios.

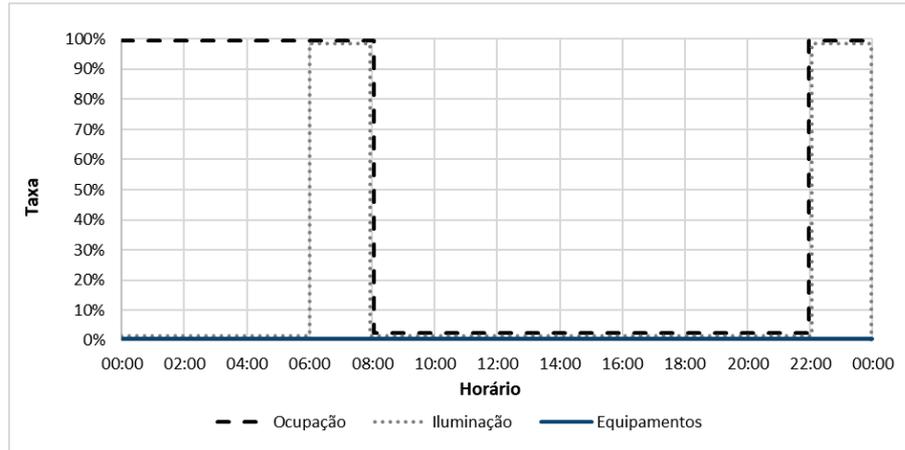


Figura 13 – Padrões de ocupação e uso dos dormitórios

Fonte: adaptado de NBR 15575-1/Em1 (ABNT, 2021).

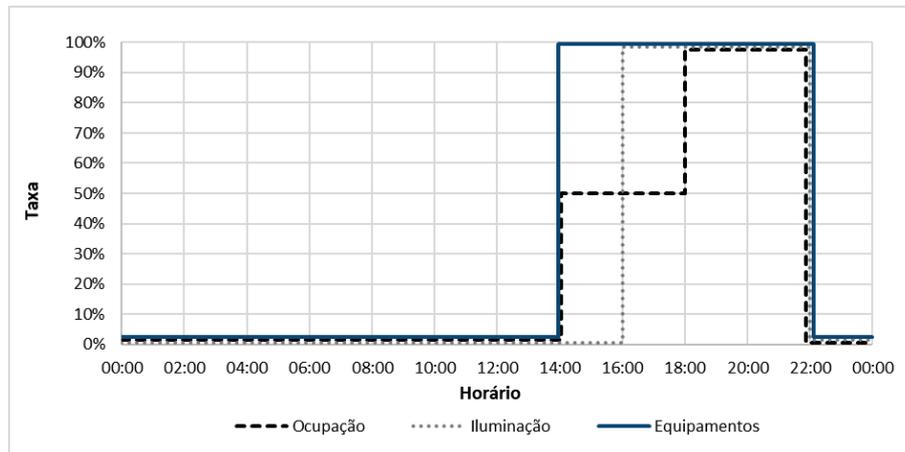


Figura 14 – Padrões de ocupação e uso das salas

Fonte: adaptado de NBR 15575-1/Em1 (ABNT, 2021).

A Tabela 8 apresenta as taxas metabólicas e a fração radiante do calor gerado pelos ocupantes e as potências instaladas para os sistemas de iluminação e de equipamentos.

Tabela 8 – Taxas metabólicas dos usuários e potências instaladas de iluminação e equipamentos

Ambiente	Taxas metabólicas das atividades dos usuários			Potências instaladas				
	Atividade realizada	Calor/ ocupante (W)	Fração radiante	Iluminação			Equipamentos	
				Densidade de potência instalada (W/m <sup>2</sup> )	Fração radiante	Fração visível	Potência (W)	Fração radiante
Dormitório	Dormindo ou descansando	81	0,3	5	0,32	0,23	0	-
Sala	Sentado ou assistindo TV	108	0,3	5	0,32	0,23	120	0,3

Fonte: adaptado de NBR 15575-1/Em1 (ABNT, 2021).

Quanto à ocupação, o método estabelece uma regra que considera 2 ocupantes por dormitório de cada unidade habitacional. Todas as unidades habitacionais analisadas nesse trabalho possuem 2 dormitórios, desta forma, são considerados 4 ocupantes por unidade habitacional. A ocupação da sala é dada em relação ao número total de ocupantes da unidade habitacional, sendo que a capacidade máxima desse ambiente é de 4 ocupantes, em qualquer situação.

No que se refere à operação das aberturas, são adotados critérios para acionamento da ventilação natural e circulação interna por parte dos usuários. Nos modelos simulados com ventilação natural, a abertura de janelas e porta-janelas ocorre quando há as três condições atendidas: (1) ocupação do APP; (2) temperatura operativa interna igual ou superior a 19°C e (3) temperatura operativa interna maior que a temperatura externa. Os demais ambientes, de permanência transitória, são mantidos com suas janelas fechadas em período integral, com infiltração de ar por frestas, exceto as janelas de banheiros, que são mantidas abertas ao longo de todo o ano. As portas internas são mantidas sempre abertas, exceto as portas de banheiros, sempre fechadas. As portas externas das unidades habitacionais são mantidas fechadas, somente com infiltração por frestas ao longo de todo o ano. Nos modelos sem uso de ventilação natural, todas as portas e janelas são mantidas fechadas em período integral, apenas com infiltração de ar por frestas, exceto a janela do banheiro, a qual permanece aberta.

As simulações foram realizadas com seis *timesteps* por hora, realizando os cálculos das interações térmicas da edificação para cada 10 minutos da condição simulada, sendo essa especificação recomendada pelo EnergyPlus. No entanto, os

valores de saída serão registrados para cada hora do ano, resultando em 8.760 linhas de dados dos *outputs*. Os indicadores, sendo o PHFT, GHc, GHf e GHt nos modelos com ventilação natural e CgTR e CgTA nos modelos sem ventilação natural, foram obtidos para cada APP da edificação. O PHFT de cada UH foi calculado através da média aritmética de seus APP's e expresso em percentual (%) em relação às 8.760 horas do ano; no modelo de edifício multifamiliar, é feita ainda a média aritmética do PHFT de cada UH. Os indicadores GHc, GHf e GHt são expressos em °C, somados em todas as 8.760 horas do ano em que há condições para o cálculo, conforme condições descritas. Os índices de carga térmica, CgTR e CgTA, são somados entre todos os APP's de cada UH e, ao final, realiza-se um índice por área total da unidade, sendo os valores expressos em kWh/(m<sup>2</sup>.ano). Os valores de todos os índices foram comparados entre as condições de estudo no capítulo de análise de resultados.

### 3.3.2 Dados dos sistemas construtivos

Quanto à composição construtiva das edificações, foram adotados sistemas construtivos comumente empregados na construção civil brasileira, priorizando os sistemas de referência indicados na NBR 15575-1/Em1 (ABNT, 2021). A Tabela 9 apresenta os sistemas empregados nas simulações. Destaca-se que as paredes internas e externas estão detalhadas anteriormente no item 3.1.3, e que os sistemas construtivos aqui indicados foram adotados em todos os cenários e zonas bioclimáticas, sem isolamentos térmicos adicionais em situações específicas.

Tabela 9 – Sistemas construtivos adotados

Elemento	Descrição do sistema construtivo
Paredes externas	Variável entre alvenaria de blocos cerâmicos, parede de concreto e sistema leve (conforme item 3.1.3)
Paredes internas	Variável entre alvenaria de blocos cerâmicos, parede de concreto e sistema leve (conforme item 3.1.3)
Cobertura	Telhas de fibrocimento de 6 mm de espessura com $\alpha = 0,6$ e forro em laje de concreto de 10 cm de espessura
Piso / Forro / Lajes entrespisos	Concreto armado de 10 cm de espessura
Janelas	Vidro <i>float</i> incolor de 4 mm de espessura
Portas	Madeira de 3 cm de espessura

Obs:  $\alpha$  – absorvância solar.

Fonte: autor.

As propriedades térmicas e físicas dos materiais empregados estão apresentadas na Tabela 10, enquanto a Tabela 11 apresenta as propriedades térmicas e físicas dos vidros.

Tabela 10 – Propriedades térmicas e físicas dos materiais empregados

Material	Densidade de massa aparente ( $\rho$ – kg/m <sup>3</sup> )	Condutividade térmica ( $\lambda$ – W/m.K)	Calor específico (c – kJ/kg.K)	Emissividade de onda longa ( $\epsilon$ )
Cerâmica	1600	0,90	0,92	0,9
Concreto	2200	1,75	1,00	0,9
Argamassa cimentícia	2000	1,15	1,00	0,9
Gesso	1200	0,70	0,84	0,9
Gesso acartonado	750	0,35	0,84	0,9
Lã de rocha	100	0,045	0,75	0,9
Placa cimentícia	1900	0,95	0,84	0,9
Fibrocimento	1700	0,65	0,84	0,9
Madeira	400	0,10	2,30	0,9

Fonte: NBR 15220/2005 (ABNT, 2005).

Tabela 11 – Propriedades térmicas e físicas dos vidros empregados

<b>Vidro float incolor</b>	
Transmitância solar ( $T_s$ )	0,847
Refletância solar externa ( $R_{fs}$ )	0,078
Refletância solar interna ( $R_{bs}$ )	0,078
Transmitância visível ( $T_v$ )	0,902
Refletância visível externa ( $R_{fv}$ )	0,081
Refletância visível interna ( $R_{bv}$ )	0,081
Transmitância de infravermelho ( $T_{ir}$ )	0
Emissividade hemisférica externa de infravermelho ( $\epsilon_f$ )	0,84
Emissividade hemisférica interna de infravermelho ( $\epsilon_b$ )	0,84
Condutividade térmica do vidro (K – W/m.K)	1,00

Fonte: Optics 6.0 (2013).

### 3.2.3 Dados referente aos climas

Previamente à análise dos resultados, identificou-se a importância do detalhamento de alguns dados de embasamento gerados nas etapas iniciais que tiveram influência em todas as etapas do programa experimental. Entre esses, ganha

destaque a diversidade dos climas brasileiros, que geram considerações específicas para as análises de desempenho térmico em cada localidade.

Sendo assim, a distinção entre os climas gerou alguns dados que são relevantes para fomentar a discussão dos resultados do trabalho. Conforme detalhado anteriormente, a NBR 15575-1/Em1 (ABNT, 2021) distingue os climas com base na média anual da temperatura externa de bulbo seco ( $TBS_m$ ), adotando parâmetros diferentes considerando três situações climáticas. A Tabela 12 apresenta a classificação obtida para cada clima analisado no trabalho em relação aos intervalos de temperatura definidos pela norma, os quais são utilizados nos limites dos indicadores PHFT, GHf e GHc.

Tabela 12 – Intervalos de temperatura obtidos para cada cidade

ZB	Cidade	$TBS_m$ (°C)	Intervalo*	LI* PHFT (°C)	LS* PHFT (°C)	LS GHf (°C)	LI GHc (°C)
1	Curitiba	17,4	1	18,0	26,0	18,0	26,0
3	Porto Alegre	20,0	1	18,0	26,0	18,0	26,0
7	Cuiabá	26,3	2	N/A	28,0	N/A	28,0
8	Manaus	27,3	3	N/A	30,0	N/A	30,0

Obs:  $TBS_m$  – Temperatura externa de bulbo seco média anual; LI – Limite Inferior; LS – Limite Superior; PHFT – Percentual de horas ocupadas na faixa de temperatura; GHf – Graus-hora de desconforto por frio; GHc – Graus-hora de desconforto por calor; N/A – Não aplicável; \* Intervalos e limites conforme NBR 15575-1/Em1 (ABNT, 2021).

Fonte: autor.

Conforme apresenta a Tabela 12, as cidades de Curitiba (ZB1) e Porto Alegre (ZB3) tiveram seus climas enquadrados no Intervalo 1 da NBR 15575-1/Em1 (ABNT, 2021), onde tem-se uma média anual da temperatura externa de bulbo seco ( $TBS_m$ ) abaixo de 25°C. Nesse contexto, para essas cidades a faixa de temperatura interna adotada para análise de PHFT foi entre 18°C e 26°C, valores os quais delimitam também os limites para análise de desconforto térmico pelos indicadores de graus-hora – ou seja, medições horárias com temperaturas internas abaixo de 18°C são consideradas como horas de desconforto por frio e temperaturas internas acima de 26°C são consideradas como horas de desconforto por calor. A cidade de Cuiabá (ZB7) se enquadrou no Intervalo 2, pois possui um  $TBS_m$  entre 25°C e 27°C. Assim, para o PHFT considera-se temperaturas horárias abaixo de 28°C e analisa-se somente o indicador de graus-hora para desconforto por calor, que ocorre em

temperaturas internas acima de 28°C. Por fim, a cidade de Manaus (ZB8) se enquadrou no Intervalo 3, com um  $TBS_m$  acima de 27°C. Nesse cenário, a faixa do PHFT abrange temperaturas até 30°C, valor que também define o limite inferior do GHc.

Portanto, esses valores foram adotados como dados de entrada referente ao clima de cada cenário analisado. A análise de resultados, a seguir, apresenta os resultados obtidos no programa experimental descrito na metodologia, referenciando quando necessário os dados apresentados acima.

## 4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A primeira parte dos resultados apresentados se refere à análise de como diferentes sistemas de parede influenciam no desempenho térmico das edificações em cidades de diferentes zonas bioclimáticas. A segunda apresenta os resultados das variações de uso e operação que podem ocorrer em ambientes residenciais e como estes influenciam no conforto e desconforto térmico dos usuários (o que se relaciona com o desempenho da edificação). A terceira etapa apresenta os resultados das variações de modelagem de prédios e qual a similaridade das simplificações de modelos em relação a um modelo completo, tomado como referência.

As três etapas consistem em estudos isolados, ou seja, entre elas não há cruzamento de cenários ou de dados. A relação entre as etapas é a de que os resultados da etapa 1 (sistemas de parede) embasaram a adoção de um sistema de parede para as etapas seguintes, o qual é devidamente identificado no início da apresentação dos resultados das etapas 2 e 3.

Para as análises das simulações das edificações em cenários com ventilação natural, ou seja, permitindo-se a operação das aberturas pelo usuário quando necessário, foram gerados quatro indicadores: PHFT – Percentual de Horas Ocupadas na Faixa de Temperatura (%); GHc – Graus-hora de desconforto térmico por calor (°C); GHf – Graus-hora de desconforto térmico por frio (°C) e GHt – Graus-hora total de desconforto térmico.

Destaca-se que o PHFT é inversamente relacionado ao GHc, ao GHf e ao GHt, visto que o primeiro trata de índice de permanência dentro da faixa de temperatura (conforto), e os demais, fora da faixa (desconforto). Porém, não é possível tratar uma relação de proporcionalidade entre os dois tipos de índice (percentual e graus-hora), pois o percentual trabalha de 0% a 100% (ou seja, 0 a 1) e o graus-hora não possui limites máximos, por ser um somatório realizado hora a hora do ano. A adoção dos índices de graus-hora foi realizada para que seja possível verificar o resultado em situações de calor e frio separadamente, o que não é possível no indicador PHFT, que unifica as situações de conforto e desconforto de forma global.

Nos cenários sem ventilação natural, ou seja, com condicionamento térmico artificial, os indicadores gerados são relativos ao consumo de energia para aquecimento e resfriamento da edificação, sendo estes: CgTR – Carga Térmica Integrada Anual de Refrigeração e CgTA – Carga Térmica Integrada Anual de

Aquecimento. Ambos são apresentados na unidade de kWh/m<sup>2</sup>. Destaca-se que a unidade de área adotada na relação dos resultados é feita apenas em relação à área da edificação condicionada termicamente, ou seja, computa a área apenas de salas e dormitórios. Essa relação é envolvida para que seja possível comparar diretamente os resultados dos modelos de casa e de prédio, o que não seria possível sem realizar a relação com a área condicionada de cada edificação.

#### 4.1 ETAPA 1: SISTEMAS DE PAREDE

Nesse item é apresentado o estudo da influência dos sistemas de parede no desempenho térmico pela nova metodologia de simulação da NBR 15575-1/Em1 (ABNT, 2021). Foram adotados os sistemas de parede de alvenaria de blocos cerâmicos (P1-CER), parede de concreto (P2-CON) e sistema leve (P3-SL), conforme detalhado na metodologia. Esse capítulo divide-se em um agrupamento de cenários, sendo considerado: (a) o modelo, de casa e de prédio e (b) o tipo de condicionamento térmico, com ventilação natural (por operação das aberturas) e sem ventilação natural (com uso de condicionamento artificial). Sendo assim, tem-se a divisão em 4 subitens, apresentadas a seguir.

##### 4.1.1 Sistemas de parede em casa com ventilação natural

A seguir são apresentados os resultados referentes aos cenários do modelo de casa com ventilação natural. A Figura 15 apresenta os resultados de Percentual de Horas Ocupadas na Faixa de Temperatura (PHFT - %) e Graus-Hora (°C) de desconforto térmico por calor (GHc), por frio (GHf) e total (GHt) dos três sistemas de parede, considerando as cidades de Curitiba (ZB1), Porto Alegre (ZB3), Cuiabá (ZB7) e Manaus (ZB8).

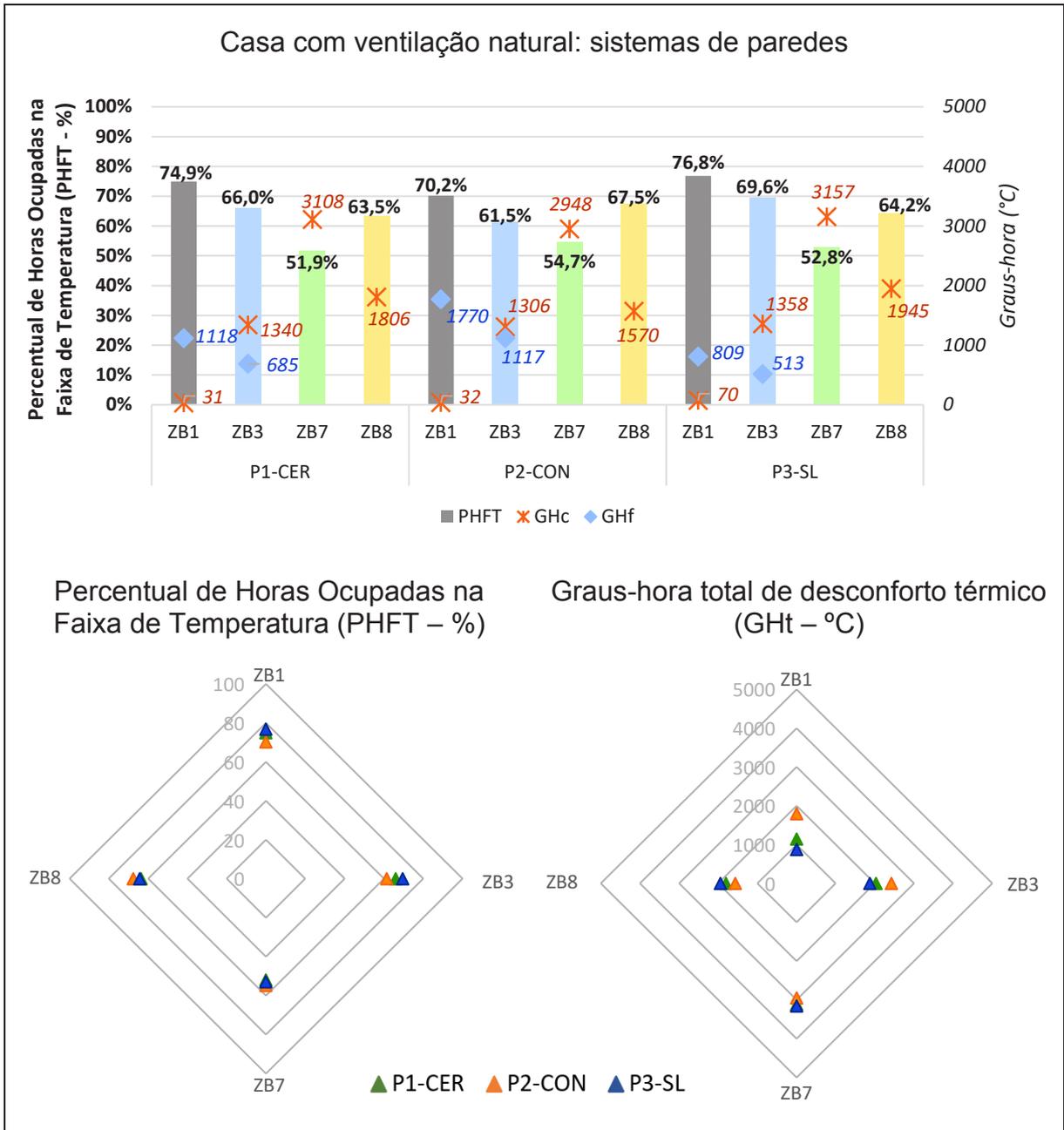


Figura 15 – PHFT (%), GHc, GHf e GHT (°C) de casa com ventilação natural, com diferentes sistemas de paredes e em diferentes zonas bioclimáticas

Fonte: autor.

Nas simulações de casa com ventilação natural, para os três sistemas de parede a cidade de Cuiabá/MT (ZB7) foi a que apresentou o menor PHFT e maior graus-hora por desconforto por calor entre as cidades, embora a cidade de Manaus (ZB8) possua um clima que, segundo o zoneamento bioclimático brasileiro, é mais quente do que Cuiabá.

Essa diferença ocorreu devido à distinção dos intervalos de temperatura entre ambas as cidades, que distancia os valores limitantes da situação entre conforto e desconforto por calor em 2°C entre ambas, embora a diferença da temperatura externa de bulbo seco média anual ( $TBS_m$ ) entre as duas cidades seja de apenas 1,0°C (conforme apresentado na metodologia, através da Tabela 12). Sendo assim, mesmo considerando que a cidade de Manaus possua um clima mais quente do que a cidade de Cuiabá, os indicadores apontam que em Manaus há menor desconforto por calor quando considerados os limites e intervalos de temperatura da NBR 15575-1/Em1 (ABNT, 2021).

Deve-se reconhecer, porém, que as faixas de temperatura adotadas para cada intervalo de  $TBS_m$  na NBR 15575-1/Em1 (ABNT, 2021) não indicam parâmetros de conforto, mas sim parâmetros para a análise comparativa de resultados entre a edificação analisada e a edificação de referência. A igualdade entre os intervalos da norma e os limites adotados para os indicadores de graus-hora trata-se de uma decisão de relação direta tomada particularmente neste trabalho.

Por outro lado, também não deve ser descartada a perspectiva de que os limites da faixa de temperatura adotados na norma se baseiam em limites de conforto térmico estipulados para cada região, que variam conforme a adaptação parcial de cada população ao clima da cidade na qual habita. Sendo assim, a magnitude dessa adaptabilidade humana e a simplificação por parte da norma na classificação dos climas para a análise de desempenho no novo método podem gerar discussões voltadas aos parâmetros de conforto térmico em trabalhos futuros.

No que diz respeito aos indicadores adotados no trabalho, a relação inversa entre os indicadores PHFT e graus-hora ( $GH_f$ ,  $GH_c$  e  $GH_t$ ) compatibiliza com os resultados esperados. Isso pode ser visualizado pelo fato de que, na cidade de Porto Alegre, por exemplo, nos três sistemas de parede o  $GH_t$  foi maior que na cidade de Curitiba, e em todos os casos o PHFT foi menor. Da mesma forma, Cuiabá teve o maior índice de graus-hora entre as cidades e o menor PHFT. Sendo assim, isso indica que a relação e a complementação entre si dos indicadores adotados são favoráveis às análises realizadas nesse trabalho.

Uma característica a se destacar referente aos indicadores entre cidades é a de que nos dois climas mais frios (ZB1 e ZB3), onde há a determinação de  $GH_f$ , esse indicador apresentou variação considerável entre os sistemas nas duas cidades

(Curitiba e Porto Alegre); no entanto, o indicador GHc apresentou uma variabilidade menor entre os sistemas, dentro das quatro cidades analisadas.

Sendo assim, é possível verificar que a importância da definição de um sistema construtivo para residências unifamiliares pode ser mais determinante para o conforto térmico dos habitantes quando considerados os períodos frios, enquanto nos períodos mais quentes os ganhos ou perdas de conforto devido à característica construtiva dos sistemas de parede serão menos percebidos.

Analisando os sistemas de paredes entre si, da forma como propõe a metodologia desse trabalho, percebe-se inicialmente que não houve uniformidade dos resultados entre as cidades. É observado que o sistema de parede de concreto (P2-CON) proporcionou um comportamento dos indicadores de desempenho térmico distinto em comparação com sistema de parede de alvenaria de blocos cerâmicos (P1-CER) e com sistema leve (P3-SL). Nas cidades de Curitiba e Porto Alegre, o sistema P2-CON apresentou o desempenho mais baixo, o que é possível perceber devido ao PHFT mais baixo entre os 3 sistemas e o GHt mais alto. No entanto, nas cidades de Cuiabá e Manaus, o sistema P2-CON apresentou resultados que indicam que esse sistema contribuiu para uma residência de melhor desempenho térmico quando em comparação com os demais sistemas construtivos, pois em ambas as cidades se atingiu o maior PHFT e o menor GHt.

Desta forma, os resultados para a residência analisada indicam que o sistema de parede de concreto em casa com ventilação natural proporciona melhor desempenho em climas quentes. Esse comportamento pode ser justificado pelas propriedades de alta capacidade térmica, baixa resistência térmica e baixo atraso térmico do sistema (dados apresentados anteriormente na Tabela 3), quando em comparação aos sistemas P1-CER e P3-SL.

A alta capacidade térmica proporciona ao sistema construtivo uma característica de ser menos reativo em relação ao crescimento de temperatura do local onde se situa – portanto, em altas temperaturas é o sistema, dentre os três analisados, que mais colabora para amenizar as temperaturas internas no processo de transmissão de calor que tem origem no meio externo. Por outro lado, em climas frios, um sistema com alta capacidade térmica aliada a uma alta transmitância térmica retém menos calor, quando em comparação com os demais, proporcionando ambientes internos mais frios e causando maior desconforto aos usuários.

Em climas frios a propriedade de resistência térmica toma alta relevância, visto que baixas resistências térmicas permitem em maior parte a transmissão de calor interno da residência – gerado naturalmente pelo ganhos internos, dentre os quais há a ocupação e atividade humana, em combinação com o fechamento de aberturas – para o meio externo, e altas resistências térmicas irão trazer maior isolamento nesse processo de perda de calor interno, mantendo o interior mais aquecido e, portanto, proporcionando melhor desempenho.

A alta resistência térmica, porém, não é necessariamente benéfica em climas quentes, onde tem-se um processo de ganho de calor do meio externo para o interno, pois para que fosse proporcionado conforto seria necessário evitar a ventilação natural, que é benéfica em climas quentes quando tem-se um cenário favorável. Além disso, pesquisas constataam que em climas quentes a ventilação natural é uma necessidade humana, ou seja, é desejada pelos usuários de forma natural, para permitir perdas de calor corporal e interno dos ambientes (SORGATO; MELO; LAMBERTS, 2016).

No caso de sistemas construtivos de alta resistência térmica combinados com ventilação natural ativa, gera-se uma maior probabilidade de acúmulo interno de calor, que terá sua transmissão no sentido oposto (do interno para o externo) dificultada pelo sistema construtivo. Esse comportamento pode ser verificado nos resultados do sistema P3-SL, que possui a maior resistência térmica dos sistemas analisados e que proporcionou a residência de pior desempenho térmico nas cidades de climas quentes – Cuiabá (ZB1) e Manaus (ZB8).

Por fim, a propriedade de atraso térmico dos sistemas adotados se comportou de forma semelhante à resistência térmica. Os sistemas que possuem atraso térmico maior (P1-CER e P3-SL) proporcionaram maior desempenho e conforto térmico em climas frios, enquanto o menor atraso térmico do sistema P2-CON foi benéfico para os climas quentes. Esse comportamento indica que o atraso térmico está relacionado à perda de calor interno que, sendo acelerada (em sistemas com baixo atraso térmico), irá proporcionar um melhor desempenho em climas quentes. Porém, em climas frios poderá gerar perdas indesejadas de calor gerado pelos ganhos internos.

Portanto, através da análise dos cenários de casa com ventilação natural, os resultados obtidos indicam que nenhum dos três sistemas de paredes estudados proporcionou melhor desempenho e/ou conforto térmico em todas as situações de clima. Nos climas mais frios, o sistema leve (P3-SL) apresentou melhores indicadores,

proporcionando melhor desempenho térmico nesses cenários. O sistema de alvenaria de blocos cerâmicos (P1-CER) apresentou resultados que se situaram entre os valores dos demais sistemas e o sistema de parede de concreto (P2-CON) apresentou indicadores de desempenho e conforto térmico mais baixos. Em climas quentes, a casa com ventilação natural apresentou indicadores de desempenho e conforto térmico mais altos quando adotado o sistema de parede de concreto (P2-CON). Por outro lado, em climas quentes o sistema P3-SL proporcionou os mais baixos indicadores de desempenho e conforto dentre os três sistemas, e o sistema P1-CER apresentou indicadores medianos em relação aos demais.

#### **4.1.2 Sistemas de parede em casa sem ventilação natural**

A seguir são apresentados os resultados referentes aos cenários do modelo de casa sem ventilação natural. A Figura 16 apresenta os resultados de Carga Térmica Integrada Anual de Refrigeração (CgTR), Carga Térmica Integrada Anual de Aquecimento (CgTA) e Carga Térmica Integrada Anual Total (CgTT) na unidade de kWh/m<sup>2</sup>, dos três sistemas de parede considerando as cidades de Curitiba (ZB1), Porto Alegre (ZB3), Cuiabá (ZB7) e Manaus (ZB8).

Os resultados apresentados na Figura 16 demonstram algumas semelhanças com o cenário da casa sem ventilação natural. Destaca-se, porém, que houve menor diferença entre os indicadores na comparação entre ZB8 e ZB7, sendo suavemente mais altos na ZB8 em comparação com a ZB7 no caso dos sistemas P1-CER e P3-SL (276,0 vs. 271,8 kWh/m<sup>2</sup> e 255,2 vs. 246,8 kWh/m<sup>2</sup>) e menor no sistema P2-CON (288,5 vs. 301,7 kWh/m<sup>2</sup>).

Quando comparados os indicadores de calor GHc (cenário da casa com ventilação natural) e CgTR (casa sem ventilação natural), percebe-se um comportamento distinto entre os sistemas tendo em vista o P2-CON. Enquanto no primeiro cenário esse sistema contribuiu para os maiores ganhos de desempenho, nas simulações da casa sem ventilação natural foi o sistema que apresentou indicadores de desempenho mais baixo entre os três sistemas analisados.

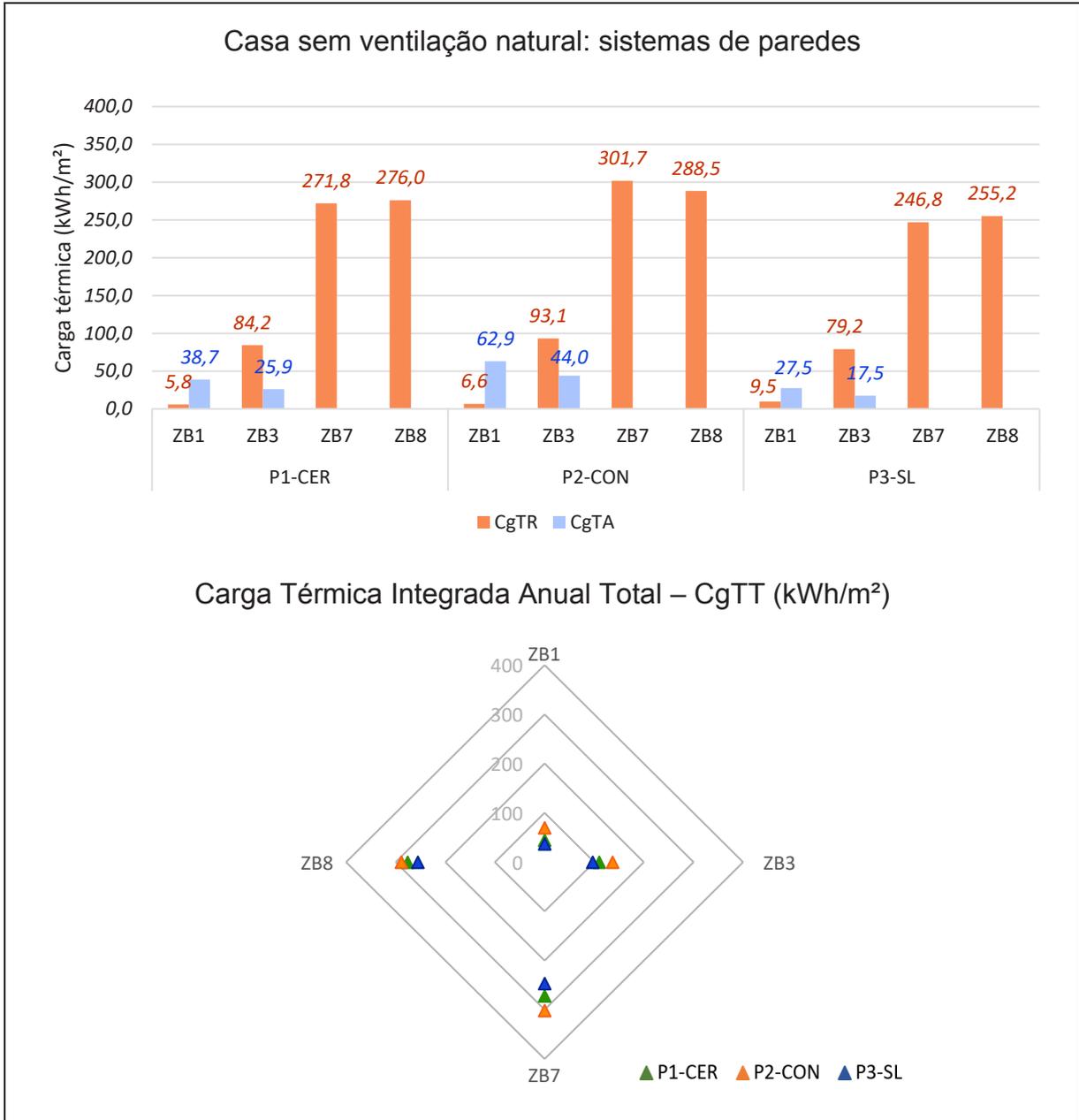


Figura 16 – CgTR, CgTA e CgTT (kWh/m²) de casa sem ventilação natural, com diferentes sistemas de paredes e em diferentes zonas bioclimáticas

Fonte: autor.

Quanto ao sistema P3-SL, foi o que apresentou o melhor CgTT em todas as simulações de sistemas e cidades de Curitiba e Porto Alegre (ZB1 e ZB3), o que não ocorreu nas cidades de clima mais quente (Cuiabá e Manaus) quando a residência é utilizada com ventilação natural.

O sistema P1-CER apresentou resultados medianos entre os outros dois sistemas, exceto no indicador CgTR para a cidade de Curitiba (ZB1), cenário onde

esse indicador de calor tem baixa relevância, visto que se trata de um clima tipicamente mais frio.

Sendo assim, percebe-se que houve distinções dos indicadores de cada sistema de parede em situações com e sem ventilação natural. Portanto, não é possível adotar os mesmos sistemas de parede tratando os resultados de forma geral entre situações de casa com e sem ventilação natural. Dependendo do tipo de uso da edificação analisada, observa-se variações de desempenho.

Percebe-se, nos resultados da Figura 16, que propriedades como a alta capacidade térmica das paredes (como é o caso do sistema P2-CON) pode tomar relevância para contribuir a um melhor desempenho em climas quentes, enquanto nos cenários sem ventilação natural a menor transmitância térmica (característica do P3-SL) aparenta ser a propriedade dominante para proporcionar melhores condições para a casa nas quatro cidades consideradas. Conforme discutido na análise dos cenários de casa com ventilação natural, o sistema P3-SL possui baixa transmitância térmica e, portanto, desempenha melhor a função de isolamento térmico, supostamente, no caso de não utilização da ventilação natural, inibindo as trocas diretas de calor através do ar pelas aberturas. Dessa forma, a relação entre o uso da casa e os indicadores resultantes de cada sistema de parede se apresentou variável nos cenários analisados acima, devido às distintas características térmicas dos sistemas construtivos adotados no estudo.

#### **4.1.3 Sistemas de parede em prédio com ventilação natural**

A seguir são apresentados os resultados referentes às simulações da edificação prédio com ventilação natural. A Figura 17 apresenta os resultados de Percentual de Horas Ocupadas na Faixa de Temperatura (PHFT - %) e Graus-Hora (°C) de desconforto térmico por calor (GHc), por frio (GHf) e total (GHt) dos três sistemas de parede, considerando as cidades de Curitiba (ZB1), Porto Alegre (ZB3), Cuiabá (ZB7) e Manaus (ZB8).

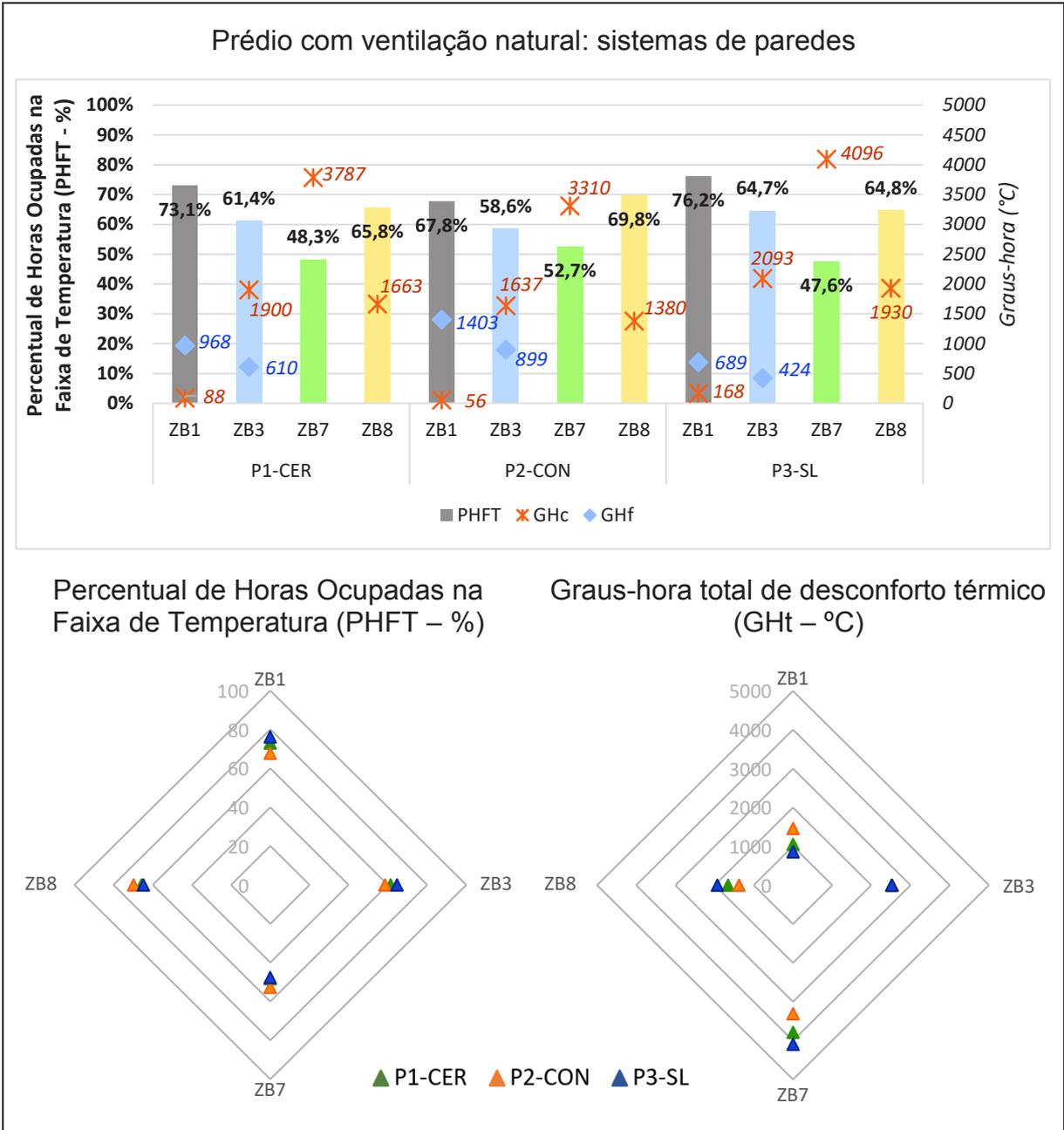


Figura 17 – PHFT (%), GHc, GHf e GHT (°C) de prédio com ventilação natural, com diferentes sistemas de paredes e em diferentes zonas bioclimáticas

Fonte: autor.

Os indicadores apresentados na Figura 17 mostram uma tendência de que, nos cenários do prédio analisado, haja menores valores de PHFT e maiores valores de GHc em relação à casa – com exceção dos cenários da cidade de Manaus, onde ocorreu o oposto, o que provavelmente está relacionado às características de climas mais quentes.

Além disso, os valores de GHf (indicador aplicável apenas às cidades de Curitiba e Porto Alegre) do prédio com ventilação natural foram inferiores em relação aos da casa com ventilação natural. Essa característica, junto ao comportamento do indicador GHc em cidades dos Intervalos 1 e 2 da ABNT NBR 15575-1:2021, indica que há a tendência de que a geometria e distribuição espacial das zonas térmicas de prédios multifamiliares gerem ambientes em geral mais quentes quando considerada uma distribuição ao longo do ano todo. Destaca-se, porém, que esse comportamento não foi observado no caso da cidade de Manaus, enquadrada no Intervalo 3, de climas tipicamente mais quentes.

Nas cidades de Curitiba, Porto Alegre e Cuiabá, percebe-se que o indicador PHFT foi inferior para o modelo de edificação prédio, o que indica que há mais horas ao longo do ano em desconforto térmico em relação ao cenário de casa. Essa diferença gera a expectativa de que ao menos um dos indicadores GHc e GHf seja maior, e que o somatório de ambos também seja superior – na cidade de Curitiba. Porém, esse segundo comportamento não ocorreu, o que pode estar relacionado à proporção de GHc em relação ao total de horas do ano, que tende a ser baixo em climas tipicamente mais frios como é a situação de cidades da ZB1.

Ainda referente à cidade de Curitiba, percebe-se que houve uma perda maior de PHFT para o sistema P2-CON, de 2,4%, superior às perdas nos cenários dos sistemas P1-CER e P3-SL (1,8% e 0,6%, respectivamente). Esses resultados também indicam que há uma tendência de que sistemas com maior resistência térmica apresentem menor variação dependendo das características geométricas da edificação em climas mais frios.

Na cidade de Porto Alegre, chama a atenção uma discrepância entre os indicadores de GHf dos três sistemas, quando em comparação ao cenário de casa, o que também indica que os sistemas de parede analisados possuem variabilidade distinta na alternância dos cenários estudados.

Além disso, foi a cidade cujos cenários apresentaram as maiores perda de desempenho dos sistemas em relação ao indicador PHFT na comparação de casa e prédio, que em média foi de 4,1%, bastante superior às demais – em Curitiba e Cuiabá houve perda de 1,6% e 3,6%, respectivamente, e em Manaus houve aumento de 1,7%. Esse comportamento específico dos objetos de estudo na cidade de Porto Alegre pode estar relacionado às características particulares do seu clima, que possui

maior proporção entre os indicadores de frio e calor, por possuir tanto períodos quentes quanto períodos frios ao longo do ano.

Portanto, os resultados obtidos nessa etapa indicaram que a edificação multifamiliar (prédio) analisada, devido à sua distribuição e geometria, apresentou maior acúmulo interno de calor em relação à casa, quando em cenários com o uso da ventilação natural, exceto em climas mais quentes como o de Manaus.

A análise comparativa entre os sistemas de parede estudados foi em geral semelhante nos cenários de casa e prédio, sendo que o sistema P3-SL apresentou melhores indicadores nas cidades de Curitiba e Porto Alegre, o sistema P2-CON melhores indicadores nas cidades de Cuiabá e Manaus, e há uma tendência geral de indicadores medianos do sistema P1-CER, quando comparado com os demais sistemas. Destaca-se, porém, que o maior número de zonas térmicas e unidades habitacionais da tipologia de edificação de prédio gera uma impossibilidade de comparação direta de unidades habitacionais ao cenário de casa, onde há apenas uma unidade. No entanto, a média entre as edificações é comparada de forma a analisar os aspectos citados, embasando as conclusões obtidas nessa etapa.

#### **4.1.4 Sistemas de parede em prédio sem ventilação natural**

A seguir são apresentados os resultados referentes aos cenários do modelo de prédio sem ventilação natural. A Figura 18 apresenta os resultados de Carga Térmica Integrada Anual de Refrigeração (CgTR), Carga Térmica Integrada Anual de Aquecimento (CgTA) e Carga Térmica Integrada Anual Total (CgTT) na unidade de kWh/m<sup>2</sup>, dos três sistemas de parede considerando as cidades de Curitiba (ZB1), Porto Alegre (ZB3), Cuiabá (ZB7) e Manaus (ZB8).

Os indicadores obtidos nessa etapa mostram uniformidade no que diz respeito ao desempenho proporcionado por cada tipo de sistema de vedação vertical. O sistema que mais colaborou para o melhor desempenho do prédio analisado foi o P3-SL, cujos indicadores apresentaram valores menores de carga térmica em todas as cidades. Sendo assim, entende-se que quando não há a ventilação natural, sistemas que possuem menor transmitância térmica contribuem mais para o desempenho térmico das residências, resultado que também foi observado no cenário de casa sem ventilação natural. O sistema P1-CER apresentou desempenho mediano entre os demais sistemas em todas as simulações dessa etapa.

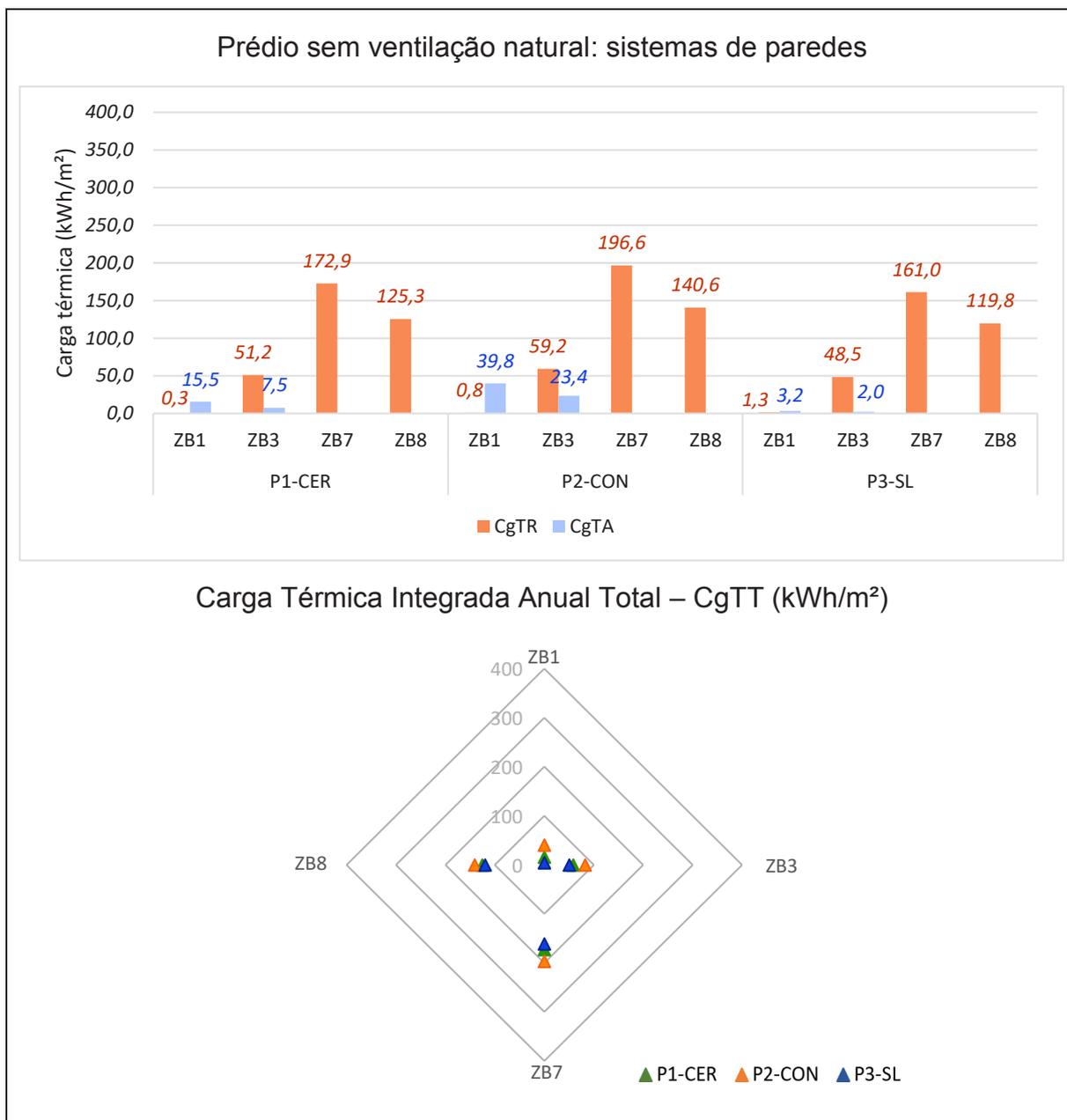


Figura 18 – CgTR, CgTA e CgTT (kWh/m²) de prédio sem ventilação natural, com diferentes sistemas de paredes e em diferentes zonas bioclimáticas

Fonte: autor.

Por fim, o sistema P2-CON apresentou indicadores mais altos de carga térmica, especialmente no indicador de GHf nas cidades aplicáveis (Curitiba e Porto Alegre), chegando a gerar valores mais de 10 vezes superiores ao sistema P3-SL – 39,8 vs. 3,2 kWh/m² em Curitiba e 23,4 vs. 2,0 kWh/m² em Porto Alegre – e mais de 2,5 vezes superior ao P1-CER – 39,8 vs. 15,5 kWh/m² em Curitiba e 23,4 vs. 7,5 kWh/m² em Porto Alegre. Sendo assim, pode ser considerado como o sistema menos recomendável, dentre os três estudados, para paredes de edifícios, por prováveis

demandas energéticas altas para condicionamento térmico, em especial nos climas mais frios.

Desta análise comparativa entre os sistemas, observa-se que o indicador CgTR na cidade de Curitiba apresentou maiores valores no sistema P3-SL, seguido de P2-CON e P1-CER (1,3, 0,8 e 0,3 kWh/m<sup>2</sup>, respectivamente), diferença que pode ter ocorrido devido aos baixos valores desse indicador para cidades frias, gerando maiores possibilidades de desvios sensíveis em relação aos indicadores nos outros cenários.

No que tange à análise comparativa entre os cenários das tipologias de edificação de casa e prédio sem ventilação natural, há algumas relações que tomam destaque. Entre os sistemas de parede analisados, a ordem classificatória de desempenho foi idêntica para todos os cenários e indicadores, sendo observada, porém, uma redução significativa do CgTA nos cenários do sistema P3-SL, aplicado às cidades de Curitiba e Porto Alegre. Essa diferença é observada tanto em valores absolutos do indicador quanto em comparação com os demais sistemas, e sugere que o uso do sistema leve (ou outros sistemas de baixas densidade e transmitância térmica) proporcione melhor desempenho térmico em climas frios, especialmente em casos de prédios multifamiliares.

Outro fator observado é que, de forma geral, os resultados de carga térmica das simulações do prédio em relação à casa foram inferiores quando considerada a média por unidade de área de cada tipologia. A maior parte dos indicadores de carga térmica foram cerca de 40% inferiores nos cenários de prédio, havendo casos especiais, como uma redução acentuada nos cenários do sistema P3-SL, chegando a valores 88% abaixo em relação aos cenários de casa – como pode ser observado nos resultados de 3,2 vs. 27,5 kWh/m<sup>2</sup> e 2,0 vs. 17,5 kWh/m<sup>2</sup> no indicador de GHf das cidades de Curitiba e Porto Alegre, nos cenários de prédio e casa, respectivamente.

Sendo assim, percebe-se que as trocas térmicas entre as unidades habitacionais de edificações verticais multifamiliares foram benéficas ao desempenho térmico nos cenários com uso de condicionamento térmico ativo, nas condições analisadas nesse trabalho. Esse comportamento distingue-se da comparação de desempenho entre casa e prédio quando houve o uso da ventilação natural, pois nessa comparação o prédio apresentou maiores valores no indicador de GHc, havendo perda de desempenho térmico em situações de calor, e menores valores de PHFT, que indicam menor desempenho global quando considerado o período anual

como um todo. Salieta-se, porém, que os valores apresentados nos cenários de prédio representam uma média de todas as unidades habitacionais da edificação, e que dependendo das condições de orientação solar e altura do pavimento de cada unidade, podem ser obtidos valores e condições comparativas significativamente distintos aos obtidos de forma global.

## 4.2 ETAPA 2: USO E OPERAÇÃO

Nesse capítulo é apresentado o estudo da influência do uso e da operação por parte do usuário no desempenho térmico das edificações. No que diz respeito ao uso, foram adotadas três variações, sendo que a primeira se trata do uso padrão (UP) indicado pela NBR 15575-1/Em1 (ABNT, 2021), a segunda de um uso intensificado (UI) e a terceira de um uso reduzido (UR). Destaca-se que o período de uso altera a quantidade de horas ocupadas na residência anualmente, utilizada como base para seleção dos dados no cálculo do PHFT.

Quanto à operação, tem-se a ventilação seletiva (VS – com parâmetros de operação das aberturas conforme cenários de temperatura interna e externa NBR 15575-1/Em1 [ABNT, 2021]) e ventilação diurna (VD – sem parâmetros de temperatura, apenas aplicando a abertura no período diurno).

Essas variações de uso e operação são cruzadas ao longo das análises que foram conduzidas nessa etapa. Esse capítulo divide-se em um agrupamento de cenários que considera: (a) o modelo, de casa ou de prédio e (b) a variação da operação das aberturas para ventilação, com ventilação seletiva (VS) ou ventilação diurna (VD).

No que tange ao sistema construtivo das paredes, com base nos resultados obtidos na etapa de análise de diferentes sistemas de parede, observou-se que o sistema de alvenaria de blocos cerâmicos (P1-CER) apresentou os resultados com menores variações e valores medianos entre os sistemas analisados, sendo o sistema de parede adotado para as etapas 2 (uso e operação) e 3 (métodos de modelagem) desse trabalho.

Sendo assim, a seguir tem-se a divisão dessa etapa do trabalho em 4 subetapas. A primeira apresenta os resultados dos cenários de casa com ventilação seletiva; a segunda, casa com ventilação diurna; a terceira, prédio com ventilação seletiva e, a quarta, prédio com ventilação diurna.

#### 4.2.1 Uso e operação em casa com ventilação seletiva

A seguir são apresentados os resultados referentes aos cenários do modelo de casa com ventilação seletiva. A Figura 19 apresenta os resultados de Percentual de Horas Ocupadas na Faixa de Temperatura (PHFT - %) e Graus-Hora (°C) de desconforto térmico por calor (GHc), por frio (GHf) e total (GHt) dos três sistemas de uso e operação, considerando as cidades de Curitiba (ZB1), Porto Alegre (ZB3), Cuiabá (ZB7) e Manaus (ZB8).

Os resultados apresentados indicaram alta variabilidade do perfil comparativo entre os tipos de uso da residência nas cidades analisadas. Inicialmente, observa-se que os cenários de uso intensificado (UI) apresentaram maiores valores de PHFT na cidade de Curitiba (ZB1) em relação aos demais usos, e que há uma tendência de redução do indicador em relação aos demais tipos de uso quando esse fator é alternado nas cidades mais quentes (Cuiabá – ZB7 e Manaus – ZB8).

Esse comportamento está relacionado ao fato de que, na condição UI, a casa é ocupada de forma mais prolongada, abrangendo o período diurno, que é mais quente, causando maiores sensações de calor aos usuários quando considerado o período anual como um todo. Sendo assim, há aumento de PHFT nas cidades mais frias e redução em cidades mais quentes. Por outro lado, o oposto ocorre nos cenários do tipo de uso reduzido (UR), onde tem-se a ocupação concentrada no período noturno, nas horas mais frias do dia.

Através da comparação dos indicadores de calor (GHc) e frio (GHf), é ainda mais clara a percepção dessas diferenças de desempenho em relação ao uso. Nas cidades analisadas, os cenários de UI apresentaram o indicador GHc mais alto e GHf mais baixo (quando aplicável esse indicador); e os cenários de UR apresentaram GHc mais baixo e GHf mais alto.

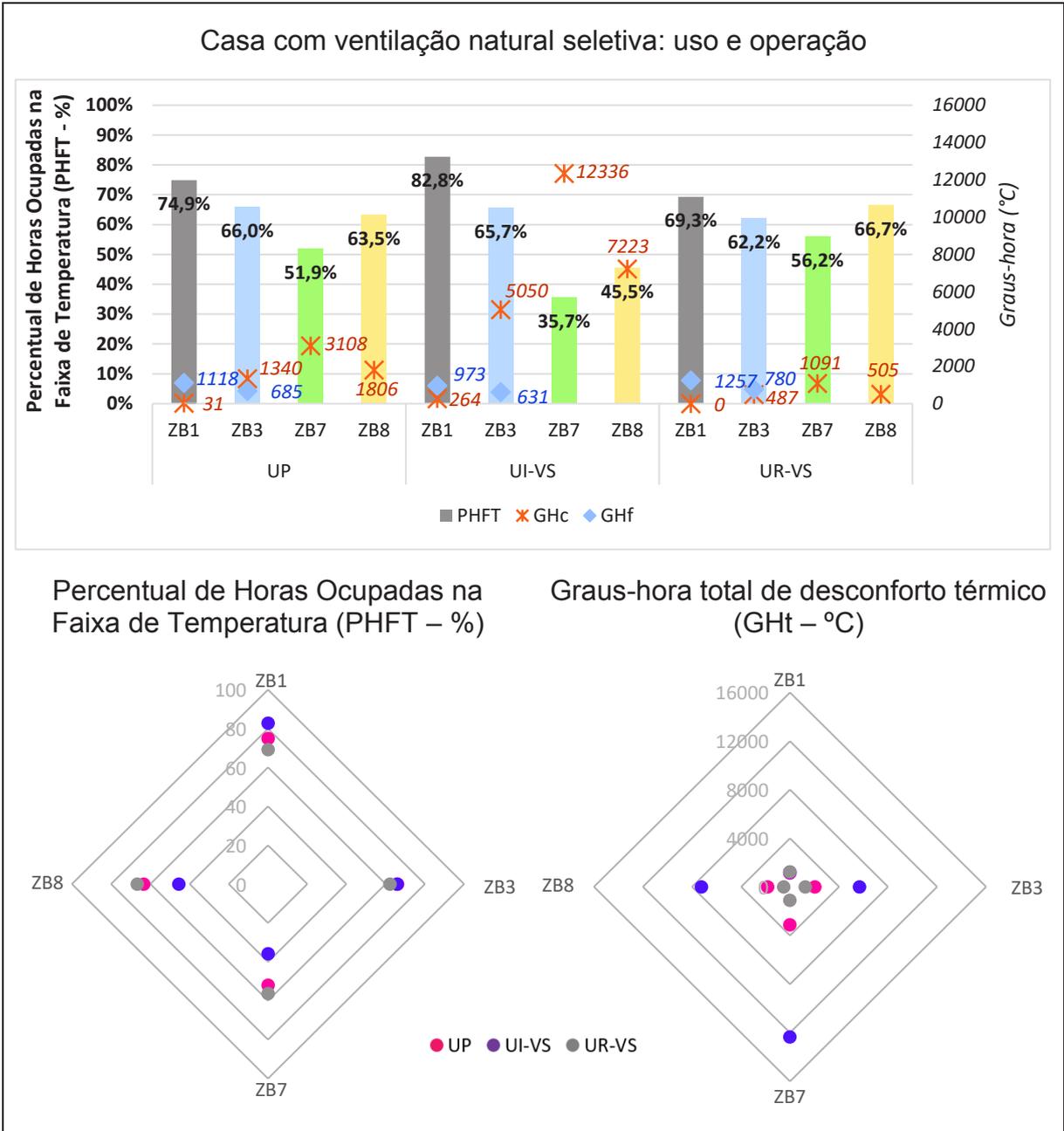


Figura 19 – PHFT (%), GHc, GHf e GHT (°C) de casa com ventilação natural seletiva, com diferentes tipos de uso e em diferentes zonas bioclimáticas

Fonte: autor.

Esses fatores atendem os resultados esperados, considerando que os indicadores são medidos quando há a ocupação da residência. O perfil ocupacional configurado nos tipos de uso leva à expectativa de que quando há maior ocupação diurna os usuários estarão mais expostos ao calor, e esta exposição será benéfica ao desempenho nos climas frios e desfavorável nos climas quentes. O caráter estocástico do uso das residências, citado por Balvedi, Ghisi e Lamberts (2018),

destaca como essa alteração ocupacional, que é de opção e decisão do usuário, pode ser variável e imprevisível. Sendo assim, o usuário torna-se uma variável na sua própria sensação de conforto térmico, que por sua vez relaciona-se com o desempenho térmico proporcionado pela residência.

Além disso, a ocupação de pessoas não somente as torna exposta ao calor no ambiente habitado, mas como contribui aos ganhos internos, seja pelo próprio corpo humano ou pela atividade exercida com uso de equipamentos, por exemplo. Ou seja, quando o usuário ocupa um determinado ambiente, está contribuindo para o calor gerado, que por sua vez leva ao usuário sensações de temperaturas mais altas (MAHDAVI, 2011). Portanto, a ocupação por si só está vinculada aos indicadores de desempenho e tende a gerar a sensação de calor naturalmente, o que torna compreensível que, quanto maior o período de ocupação, maior o desconforto por calor e menor o desconforto por frio em um ambiente; por outro lado, quando os períodos de ocupação são reduzidos, tem-se maior desconforto por frio e menor desconforto por calor.

No que diz respeito à variação dos indicadores entre as cidades, percebe-se que em Curitiba houve maior atendimento às condições satisfatórias de ocupação, com PHFT médio de 75,7% entre os cenários analisados. Em Porto Alegre, o percentual de horas na faixa de temperatura foi menor, com média de 64,6%; em Cuiabá, há uma média significativamente mais baixa, de 47,9%; e em Manaus, foi obtido 58,6%. Esses resultados acompanham o comportamento do indicador GHc, que possui a tendência de aumentar na ordem das cidades citadas. Porém, a redução de GHc e conseqüentemente aumento do PHFT entre Cuiabá e Manaus estão relacionados, possivelmente, às diferenças das temperaturas adotadas na faixa da NBR 15575-1/Em1 (ABNT, 2021), conforme já citado na análise dos sistemas de parede.

A análise conduzida nessa etapa evidencia que o perfil de ocupação de uma residência pode alterar significativamente o desempenho térmico. Em especial nas cidades mais quentes, o tipo de uso gerou diferenças de PHFT de mais de 20% entre os cenários analisados. Para climas com maior distribuição de períodos frios e quentes, como é o caso de Porto Alegre (ZB3), houve variabilidade mais baixa. Nos climas mais frios, a tendência é que as diferenças também sejam maiores, de forma oposta aos climas quentes, sendo o maior período de uso benéfico ao desempenho térmico.

#### 4.2.2 Uso e operação em casa com ventilação diurna

A seguir são apresentados os resultados referentes aos cenários do modelo de casa com ventilação diurna. A Figura 20 apresenta os resultados de Percentual de Horas Ocupadas na Faixa de Temperatura (PHFT - %) e Graus-Hora (°C) de desconforto térmico por calor (GHc), por frio (GHf) e total (GHT) dos três sistemas de uso e operação, considerando as cidades de Curitiba (ZB1), Porto Alegre (ZB3), Cuiabá (ZB7) e Manaus (ZB8).

Os resultados da Figura 20 mostram indicadores com variações consideráveis em relação ao uso e operação padrão da residência, chegando até 22,9% de variação no indicador PHFT. O uso da ventilação natural diurna como ação provocada pelo usuário é supostamente desfavorável ao desempenho térmico, em relação a uma condição seletiva com base nas temperaturas internas e externas (SORGATO; MELO; LAMBERTS, 2016); porém, em alguns casos esse comportamento não ocorreu, pois a ação provocou ganhos de desempenho nas cidades mais quentes como Cuiabá (ZB7) e Manaus (ZB8). Sendo assim, uma análise mais detalhada se faz necessária para essas situações.

Nos climas mais frios (ZB1 e ZB3) os resultados indicaram perda de desempenho nos cenários de UI e UR com ventilação diurna da casa, em relação ao Uso Padrão (UP). Em uma análise isolada dos indicadores, percebe-se que houve consideráveis aumentos de ambos os indicadores GHf e GHc (exceto GHc dos cenários de UR), o que leva ao entendimento de que as temperaturas anuais dos ambientes foram, em geral, mais próximas às temperaturas externas devido à alta exposição à ventilação natural durante o período diurno. Conseqüentemente, houve queda de PHFT em ambos os cenários alternativos dessas cidades, o que indica que em geral a ventilação diurna em climas frios é desfavorável ao desempenho.

Por outro lado, nos climas quentes ocorreram situações divergentes. A combinação dos cenários de UI com ventilação diurna provocou quedas de desempenho nas cidades de Cuiabá (ZB7) e Manaus (ZB8), porém em ambas as cidades nos cenários de UR os indicadores apresentaram ganhos de desempenho térmico, perceptível pela redução de GHc e aumento de PHFT. Esse comportamento ainda se assimila aos cenários comparativos das cidades de Curitiba e Porto Alegre, pois nelas também houve redução de GHc quando nos cenários de UR.

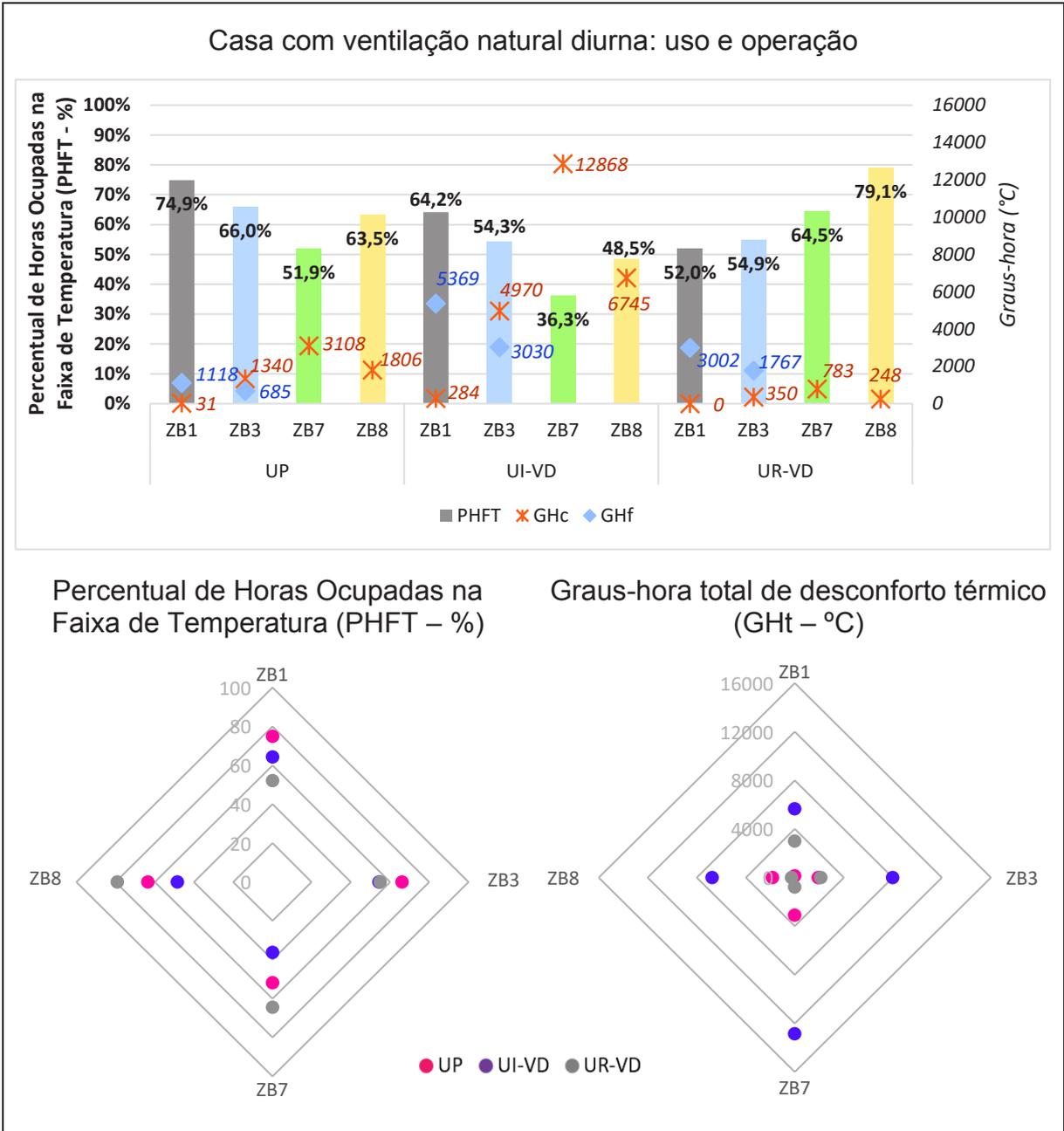


Figura 20 – PHFT (%), GHc, GHf e GHt (°C) de casa com ventilação natural diurna, com diferentes tipos de uso e em diferentes zonas bioclimáticas

Fonte: autor.

Sendo assim, nas cidades de clima mais quente, havendo apenas os indicadores de calor, houve aumento de desempenho devido à redução de temperaturas internas, quando considerado o período de um ano completo. Essas reduções de temperatura, por sua vez, podem ocorrer nesses cenários devido aos menores períodos de uso dos ambientes. Ou seja, no período diurno, quando se ativa a ventilação natural, o usuário não está exposto a ela, de forma distinta aos cenários

de UI; ainda, no período noturno, há ocupação e não há o uso da ventilação natural, mantendo o ar interno isolado do meio externo, podendo provocar ganhos de desempenho como observado nos cenários analisados.

Em relação às simulações de casa com ventilação seletiva, o perfil comparativo dos resultados apresenta algumas características a serem destacadas. Nas cidades de Curitiba e Porto Alegre, observaram-se significativas perdas de desempenho, com redução de PHFT e aumento de GHc e GHf. Por outro lado, nas cidades quentes houve aumento de desempenho em todos os cenários, em especial quando há uso reduzido da residência. Portanto, o uso diurno de ventilação natural como um hábito cultural tende a gerar perda de desempenho térmico em climas mais frios, porém pode ser benéfico ao desempenho em cidades quentes, dependendo de outros aspectos relacionados ao uso da residência.

Sendo assim, os resultados esperados, que seguiram o estudo de Sorgato, Melo e Lamberts (2016), foram, em parte, atendidos, havendo situações adversas em que o uso da ventilação natural diurna apresentou-se como uma alternativa que pode colaborar para o conforto térmico do usuário e, conseqüentemente, para o desempenho térmico de residências unifamiliares (casas).

Os resultados apresentados nessa etapa apresentaram variabilidade significativa entre os cenários estudados. Dessa forma, identifica-se os usuários de edificações residenciais como uma importante variável no sistema de trocas térmicas do qual fazem parte. Não apenas como um elemento passivo, os usuários interferem no comportamento das edificações frente aos agentes externos, podendo alterar significativamente o desempenho térmico, através de seus hábitos de uso e operação da residência. Portanto, o alto impacto que podem causar nas residências, citado por Mahdavi (2011), foi corroborado nessa etapa, cujos resultados apresentaram situações com mais de 15% de variação do PHFT em relação ao uso padrão. Logo, o papel do usuário toma alta relevância no sistema de trocas térmicas o qual este integra.

#### **4.2.3 Uso e operação em prédio com ventilação seletiva**

A seguir são apresentados os resultados referentes aos cenários do modelo de prédio com ventilação seletiva. A Figura 21 apresenta os resultados de Percentual de Horas Ocupadas na Faixa de Temperatura (PHFT - %) e Graus-Hora (°C) de

desconforto térmico por calor (GHc), por frio (GHf) e total (GHT) dos três sistemas de uso e operação, considerando as cidades de Curitiba (ZB1), Porto Alegre (ZB3), Cuiabá (ZB7 e Manaus (ZB8).

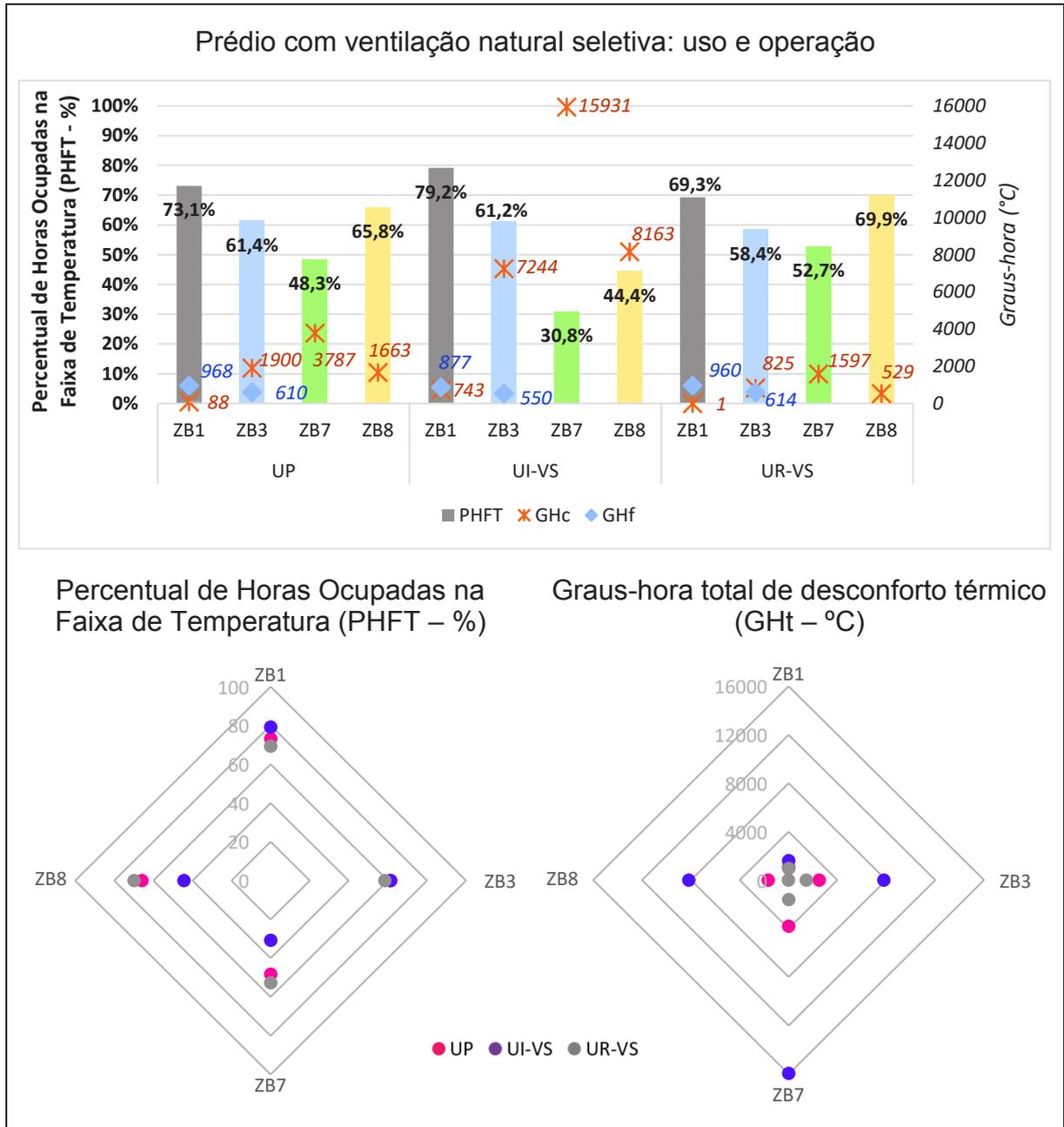


Figura 21 – PHFT (%), GHc, GHf e GHT (°C) de prédio com ventilação natural seletiva, com diferentes tipos de uso e em diferentes zonas bioclimáticas

Fonte: autor.

Em geral, os resultados obtidos nessa etapa apresentaram semelhanças em relação aos cenários de casa com ventilação seletiva. Em Curitiba (ZB1) e Porto

Alegre (ZB3), a variação dos indicadores entre os cenários de UP, UI e UR foram mais baixas, enquanto em Cuiabá (ZB7) e Manaus (ZB8) houve maior oscilação. Com exceção do cenário UP em Manaus, todos os indicadores de calor dos demais cenários foram maiores nas simulações com o prédio em relação às com a casa, e os indicadores de frio foram menores, mostrando que anualmente as temperaturas internas foram mais altas. Ainda, com exceção dos cenários de UP e UR em Manaus, todos os indicadores de PHFT nos cenários analisados de prédio foram menores em relação à casa, indicando que há perda de desempenho no caso de edificações multifamiliares – junto ao fator anterior, observa-se que a perda de desempenho foi causada devido ao aumento do desconforto por calor, apontado pelo indicador GHc.

Quanto aos aspectos citados no parágrafo anterior, a comparação dos resultados entre os tipos de edificação adotados assemelha-se ao comparativo obtido na etapa 1, de análise dos sistemas de parede. Da mesma forma, houve a tendência de que os resultados nos cenários de prédio indicassem maiores temperaturas internas e, conseqüentemente, maior desconforto por calor dos usuários nas edificações multifamiliares, com exceção dos cenários da cidade de Manaus que, devido às características climáticas, apresentou melhor desempenho térmico no caso de edificação multifamiliar (exceto no cenário de UI).

Uma característica observada nessa etapa é a de que, nas cidades de Curitiba e Porto Alegre, o cenário de UI apresentou acentuado crescimento do indicador GHc em relação aos demais cenários de uso, sendo ainda maiores do que nos cenários de casa. Isso indica que o uso prolongado das unidades habitacionais que são construtivamente e termicamente associadas tende a gerar acúmulos internos de calor. Além de ocorrer apenas nas zonas térmicas onde o calor é propriamente gerado devido à atividade humana, pode também estar sendo transferido internamente entre as zonas da edificação, gerando temperaturas internas mais altas e, portanto, maior desconforto por calor.

No entanto, tal comportamento não ocorreu nas cidades de Cuiabá e Manaus, onde observou-se um perfil comparativo semelhante entre os indicadores de ambas as etapas. Nessas cidades, também se observou valores intensamente mais altos de GHc nos cenários de UI em relação aos demais, sendo de 4 a 5 vezes maior que nos cenários de UP e de 10 a 15 vezes maior que nos cenários de UR.

A comparação entre os indicadores leva ao entendimento de que há a possibilidade de que esse maior desconforto por calor nos cenários de uso

intensificado esteja ocorrendo principalmente devido à maior exposição do usuário às temperaturas internas no período diurno, relacionada à maior ocupação dos ambientes, e não necessariamente pelo calor que o usuário gera através das suas atividades exercidas no local. Dessa forma, há uma distinção dos fatores de influência na variação dos valores do indicador de GHc entre os climas, sendo que nos locais mais frios há forte influência dos ganhos internos de calor e nas cidades mais quentes o principal fator é possivelmente a ação própria do clima e a maior exposição do usuário aos ambientes residenciais.

Portanto, os resultados obtidos nas simulações com ventilação natural seletiva em edificação multifamiliar apresentaram coerência e semelhanças com o comportamento térmico apresentado nas demais etapas. As diferenças observadas estão relacionadas às diferenças geométricas, com zonas térmicas de diferentes unidades habitacionais diretamente associadas, e ao tipo de uso de cada ambiente, sendo possível traçar as principais influências a partir dessas características.

#### **4.2.4 Uso e operação em prédio com ventilação diurna**

A seguir são apresentados os resultados referentes aos cenários do modelo de prédio com ventilação diurna. A Figura 22 apresenta os resultados de Percentual de Horas Ocupadas na Faixa de Temperatura (PHFT - %) e Graus-Hora (°C) de desconforto térmico por calor (GHc), por frio (GHf) e total (GHt) dos três sistemas de uso e operação, considerando as cidades de Curitiba (ZB1), Porto Alegre (ZB3), Cuiabá (ZB7) e Manaus (ZB8).

Os resultados apresentados na Figura 22 indicaram comportamentos dos indicadores em geral semelhantes aos modelos com a simulação de casa. Nos cenários de prédio com ventilação diurna, tem-se também perda de desempenho térmico em ambos os cenários alternativos nas cidades de Curitiba e Porto Alegre, e apenas no cenário de UI nas cidades de Cuiabá e Manaus, havendo desempenho mais alto nessas cidades quanto há o UR. Essas características foram observadas também nos cenários de casa com ventilação diurna, tendo sido discutidas anteriormente.

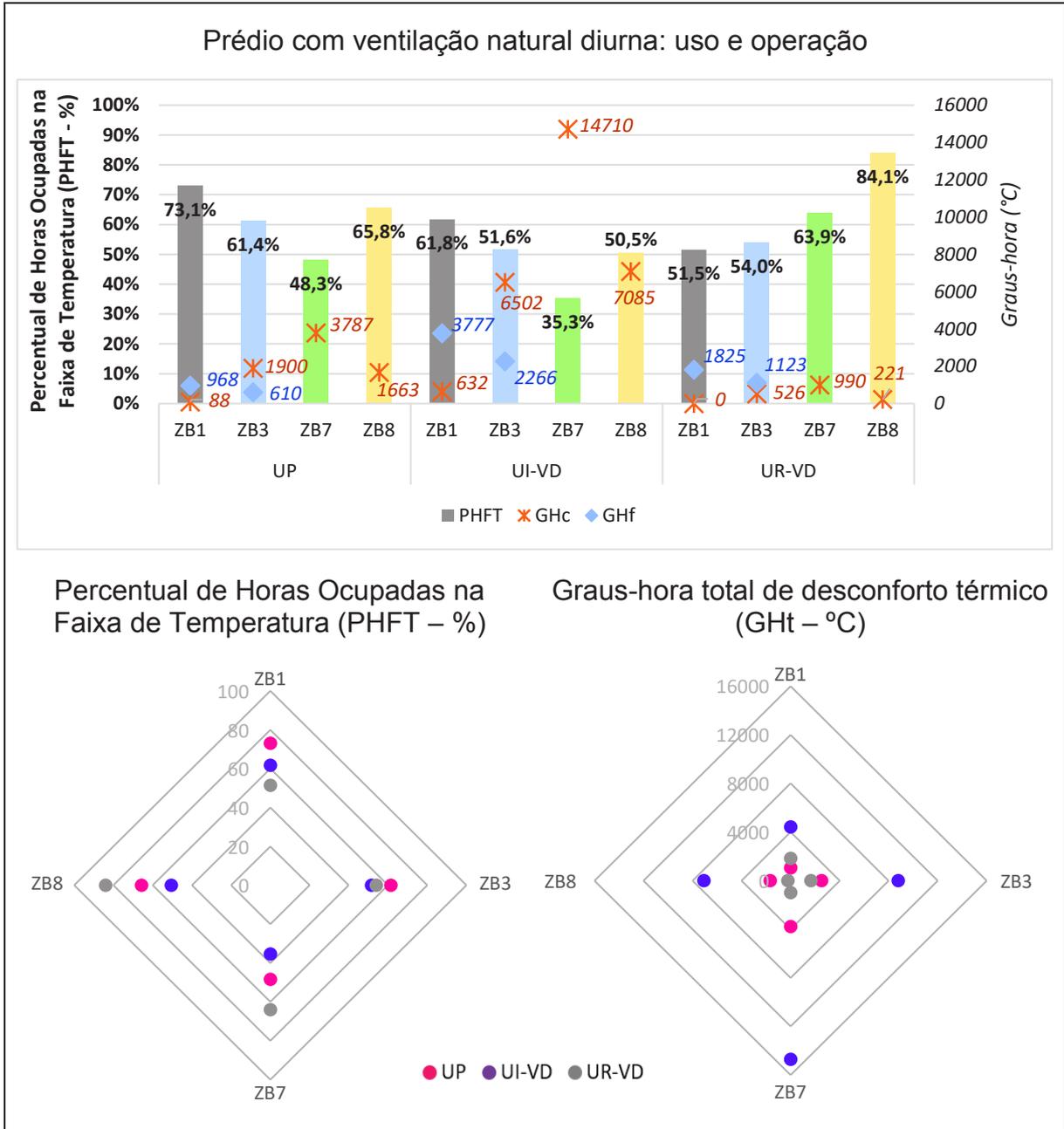


Figura 22 – PHFT (%), GHc, GHf e GHT (°C) de prédio com ventilação natural diurna, com diferentes tipos de uso e em diferentes zonas bioclimáticas

Fonte: autor.

Também de forma semelhante às demais análises comparativas, o cenário de prédio apresentou indícios de maior calor interno nos ambientes da edificação, o que é verificado pelo aumento de GHc na maior parte dos cenários, exceto quando há UP e UR na cidade de Manaus, e redução de GHf nas cidades de Curitiba e Porto Alegre. Na maioria dos cenários há menores valores de PHFT nos cenários de prédio em relação à casa, com exceção de UP e UR em Manaus.

Em relação à influência do critério de ativação da ventilação natural por parte do usuário, a ventilação natural diurna provocou perdas de desempenho térmico (indicada pela queda de PHFT) nas cidades de Curitiba e Porto Alegre, e ganhos nas cidades de Cuiabá e Manaus, em relação à ventilação seletiva com os critérios indicados pela NBR 15575-1/Em1 (ABNT, 2021). Esse comportamento distinto ocorre devido às diferenças climáticas, supondo-se que a ventilação diurna provoque maiores trocas de ar e conseqüentemente redução das temperaturas internas nas condições simuladas – sendo assim, há o aumento de GHf em Curitiba e Porto Alegre, e redução de GHc em todas as cidades, melhorando as condições de conforto nos climas mais quentes, onde há o indicador de graus hora apenas para calor. Tal comportamento foi verificado também na comparação dos cenários de casa com ventilação natural seletiva e diurna.

Sendo assim, não foi constatada uma relação direta da adoção de ventilação natural diurna com a diminuição do desempenho médio das unidades habitacionais de prédios multifamiliares, conforme observado no trabalho de Sorgato, Melo e Lamberts (2016), podendo haver ganhos em cidades mais quentes. Embora a ventilação natural durante o dia seja supostamente desfavorável ao desempenho térmico em climas quentes, observou-se o efeito contrário nas condições analisadas. Esse comportamento pode estar relacionado à troca do ar em períodos do dia nos quais não há a ocupação dos ambientes, sendo então a ventilação natural diurna favorável à retirada de calor acumulado internamente nesses casos.

Nessa etapa, bem como nas anteriores, o efeito dos padrões de uso e operação das unidades habitacionais provocou alta variação de valores dos indicadores utilizados, gerando oscilação de mais de 15% no indicador PHFT e de mais de 300% dos indicadores GHc e GHf nos cenários analisados. Dessa forma, verificou-se a alta influência dos usuários no comportamento térmico das unidades habitacionais e, logo, no seu conforto térmico, assim como destacado por Mahdavi (2011) e Balvedi, Ghisi e Lamberts (2018).

Os efeitos trazidos pela ocupação dos usuários, portanto, devem ser cada vez mais estudados, de forma a reproduzir coerentemente o comportamento humano em simulações de edifícios. O caráter estocástico do uso das residências gera cada vez maiores variações de hábitos entre os habitantes dos espaços projetados, sendo necessário aprofundar o tema quando há variáveis humanas relacionadas ao comportamento das edificações.

### 4.3 ETAPA 3: MÉTODOS DE MODELAGEM

Nesse item são apresentados os resultados obtidos com os diferentes métodos de modelagem e de simplificação de modelos de simulação computacional. Foram adotados cinco métodos, sendo o modelo completo (M1-COMP), utilizado como referência, o modelo com pavimento intermediário (M2-INT), o modelo com apenas os 2 últimos pavimentos (M3-2PAV), o modelo com apenas o último pavimento (M4-1PAV) e o modelo com a unidade habitacional representativa (M5-UH). Essas variações consideram a utilização das unidades de pior desempenho como as unidades habitacionais representativas por verificação da posição solar, não analisando o desempenho das demais.

Os resultados se dividem em um agrupamento de 2 cenários, considerando o tipo de condicionamento térmico, com ventilação natural (por operação das aberturas) ou sem ventilação natural (com uso de condicionamento artificial), conforme apresentado a seguir. Destaca-se que o sistema construtivo das paredes adotado foi de alvenaria de blocos cerâmicos, conforme os mesmos critérios de adoção do sistema utilizado na etapa 2.

#### 4.3.1 Modelos com ventilação natural

A Figura 23 apresenta os indicadores de Percentual de Horas na Faixa de Temperatura (PHFT - %) e Graus-Hora (°C) de desconforto térmico por calor (GHc), por frio (GHf) e total (GHt) dos cinco modelos, considerando ventilação natural, nas cidades de Curitiba (ZB1), Porto Alegre (ZB3), Cuiabá (ZB7) e Manaus (ZB8).

Os resultados apresentados na Figura 23 indicaram que os métodos de modelagem que representaram a geometria da edificação de forma mais completa apresentaram valores mais próximos ao modelo de referência (M1-COMP). Por outro lado, os métodos que simplificaram mais a geometria visando as unidades habitacionais representativas apresentaram maiores divergências dos valores de referência.

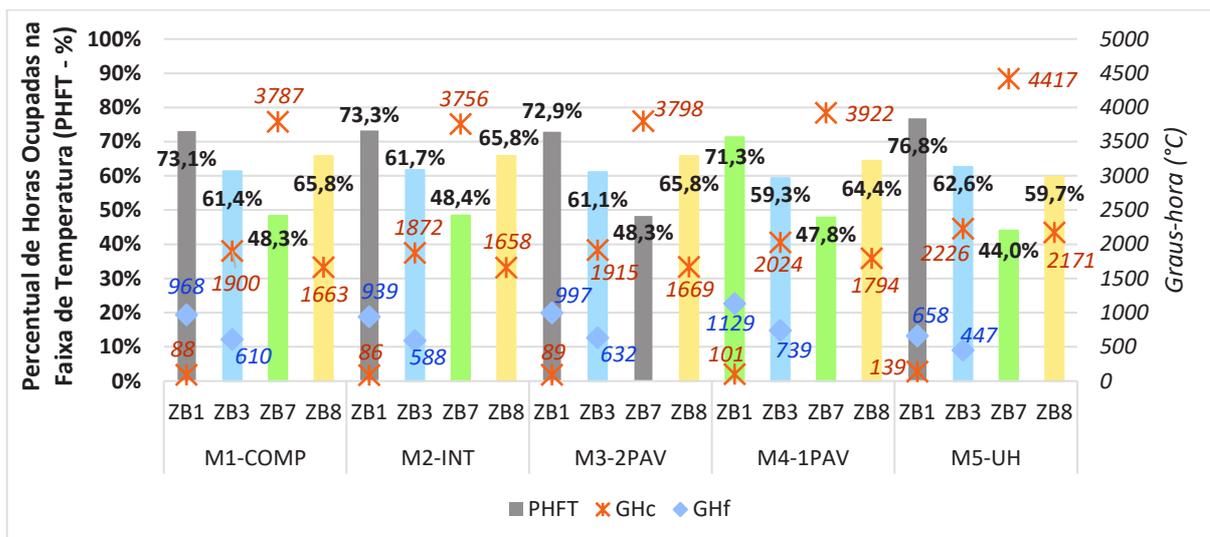


Figura 23 – PHFT (%), GHc, GHf e GHT (°C) de prédio com ventilação natural, com diferentes métodos de modelagem e em diferentes zonas bioclimáticas

Fonte: autor.

Na cidade de Curitiba, o PHFT de referência foi de 73,1% e o indicador apresentou variações coerentes quando relacionado com os indicadores GHc e GHf nos demais cenários, variando até 3,7% nos casos mais distantes. Como característica do clima, o indicador de GHf é o principal em relação ao desconforto térmico, sendo bastante superior ao GHc. Os indicadores de graus-hora apresentaram variações de até 58% conforme os cenários adotados.

Em Porto Alegre, o clima com maior equilíbrio entre períodos frios e quentes levou o PHFT a ser mais baixo, de 61,4% no modelo M1-COMP e com variação mais baixa, de até 2,1%. Os indicadores de graus-hora também apresentaram variação menor, sendo a máxima de 26%, verificada no GHf do modelo M5-UH em relação ao M1-COMP.

Nas cidades de Cuiabá e Manaus, os indicadores mostram comportamento semelhante, sendo a maior diferença entre esses cenários o percentual obtido no indicador PHFT, com o de Cuiabá inferior ao de Manaus (48,3% e 65,8% respectivamente, para os modelos M1-COMP). A variação máxima do indicador foi de 4,3% em Cuiabá e 6,1% em Manaus, sendo as máximas obtidas no cenário do modelo M5-UH. Na cidade de Cuiabá, a variação máxima do indicador GHc foi de 17%, e em Manaus de 31%.

Em relação aos indicadores graus-hora, percebe-se que houve a tendência de que, quanto maior a simplificação do modelo de simulação, maiores os valores

apresentados do indicador GHc, porém para o indicador GHf houve oscilação, não havendo uma relação direta e linear. Em ambas as cidades onde há o GHf, houve redução no indicador nas simulações com os cenários M2-INT e M5-UH, e crescimento dos valores nos cenários M3-2PAV e M4-1PAV.

Considerando os resultados obtidos para cada indicador, foi calculada a similaridade (%) individual de cada indicador (PHFT, GHc e GHf), em cada método de modelagem e em cada uma das quatro zonas bioclimáticas. Para a determinação desse percentual, tomou-se o modelo completo (M1-COMP) como modelo de referência (100%). Esses resultados são apresentados na Figura 24.

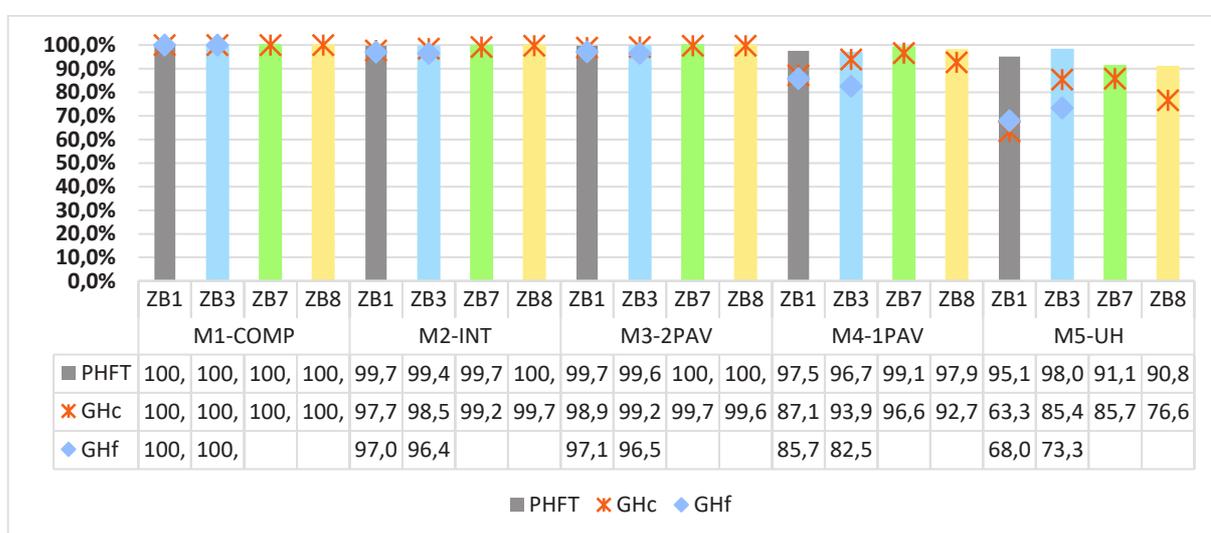


Figura 24 – Similaridade (%) individual dos indicadores em modelos simplificados de prédio com ventilação natural em relação ao M1-COMP em cada zona bioclimática

Fonte: autor.

A partir da Figura 24, foi calculada a média dos três indicadores (%) para cada método de modelagem em cada zona bioclimática, o que consiste na similaridade (%) agrupada dos três indicadores para cada situação. Assim, foi possível determinar a similaridade dos métodos de modelagem ao modelo completo tomado como referência, sendo esses resultados apresentados na Figura 25.

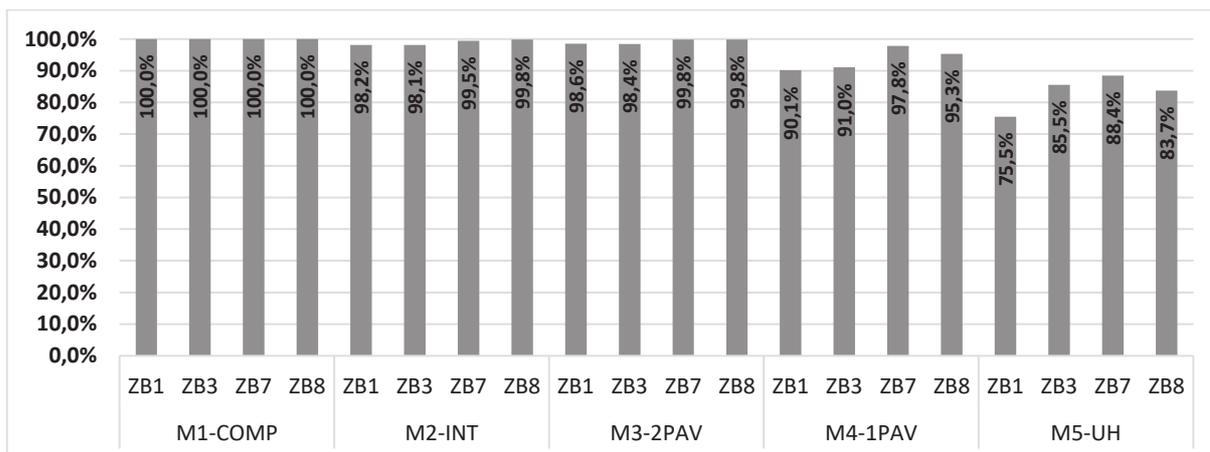


Figura 25 – Similaridade (%) agrupada dos indicadores em modelos simplificados de prédio com ventilação natural em relação ao M1-COMP em cada zona bioclimática

Fonte: autor.

A partir dos dados apresentados na Figura 25, foi feita uma média dos indicadores em cada método de modelagem nas quatro zonas bioclimáticas. Sendo assim, tem-se a média final de similaridade (%) de cada método de modelagem em relação ao método M1-COMP, conforme apresenta a Figura 26.

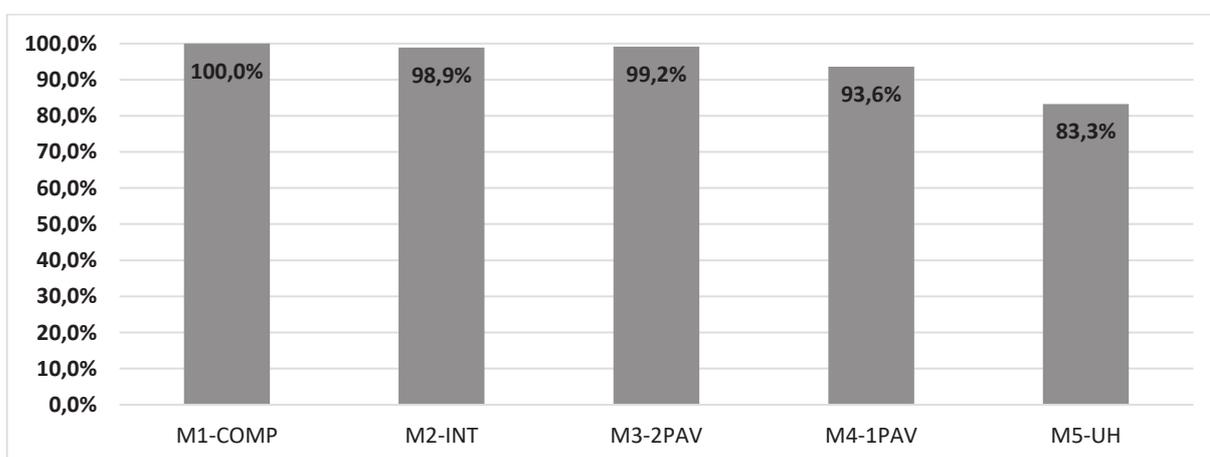


Figura 26 – Similaridade (%) média final dos métodos de modelagem nos cenários de prédio com ventilação natural

Fonte: autor.

Os resultados apresentados na Figura 24, na Figura 25 e na Figura 26 possibilitam uma análise dos indicadores de cada método de modelagem, em relação ao sistema de referência da edificação modelada completamente, sendo esse o M1-COMP.

Percebe-se na Figura 24 que o PHFT obteve menores diferenças em relação ao modelo completo, enquanto os indicadores graus-hora tiveram variação mais sensível. Ainda, o indicador GHc apresentou maior similaridade que o indicador GHf em Porto Alegre, havendo maior proximidade entre os dois indicadores de graus-hora na cidade de Curitiba.

Entre as cidades analisadas, percebe-se através da Figura 25 que os cenários de simulação em Curitiba apresentaram similaridade significativamente menor, quando em comparação com as demais cidades. Ainda, Cuiabá apresentou a maior similaridade entre as cidades analisadas, com valores de mais de 10% acima dos valores de Curitiba em alguns cenários.

Por fim, no que tange à relação dos resultados entre as metodologias de modelagem do prédio, considerando todos os cenários analisados, verifica-se através da Figura 26 que os métodos M2-INT e M3-2PAV apresentaram similaridades bastante semelhantes entre si e muito próximas de 100%. Sendo assim, entende-se que os métodos de modelagem da edificação considerando a multiplicação de um pavimento intermediário (M2-INT) ou apenas os dois últimos pavimentos da edificação (M3-2PAV) possam representar o modelo de simulação da edificação como um todo.

Ainda, o modelo M3-2PAV, apesar de considerar a modelagem de apenas 2 pavimentos e isolar uma parte da edificação, apresentou indicadores mais próximos aos indicadores do M1-COMP quando comparado com os indicadores do modelo M2-INT, que considera a modelagem de 3 pavimentos e a representação completa da edificação através de uma ferramenta de multiplicação de pavimentos idênticos.

Por outro lado, os modelos M4-1PAV e M5-UH apresentaram quedas consideráveis de similaridade, de 6,4% e 16,7%, respectivamente, em relação ao modelo referência. Esses valores indicam menor similaridade do modelo adotado como referência para a edificação com ventilação natural, quando comparado com os demais métodos.

O trabalho de Veiga (2021) analisou cenários de simplificação e argumenta que os efeitos de tornar superfícies adiabáticas impedem o fluxo de calor entre zonas adjacentes. Dessa forma, percebe-se que reduções de modelos devem ser cautelosas a ponto de considerar, pelo menos, a influência do fluxo de calor proveniente do comportamento térmico de parte do entorno das zonas analisadas. Ainda, outros métodos de simplificações permitem predizer o desempenho através de

metamodelos, com bases de dados robustas que consideram as principais variáveis (VEIGA, 2021).

Destaca-se, porém, que as análises realizadas nessa etapa do trabalho consideram a adoção de unidades habitacionais representativas para análise de desempenho térmico com base na orientação solar e altura do pavimento, considerando a pior situação. Portanto, nas situações em que se faça necessário a análise da edificação como um todo, restringe-se as possibilidades de modelagem apenas aos modelos M1-COMP e M2-INT, não se aplicando os valores aqui apresentados para efeitos de análise comparativa entre os modelos.

#### 4.3.2 Modelos sem ventilação natural

A seguir são apresentados os resultados referentes aos modelos sem ventilação natural. A Figura 27 apresenta os indicadores de CgTR – Carga Térmica Integrada Anual de Refrigeração e CgTA – Carga Térmica Integrada Anual de Aquecimento em simulações realizadas com os cinco modelos do prédio sem ventilação natural, nas quatro zonas bioclimáticas.

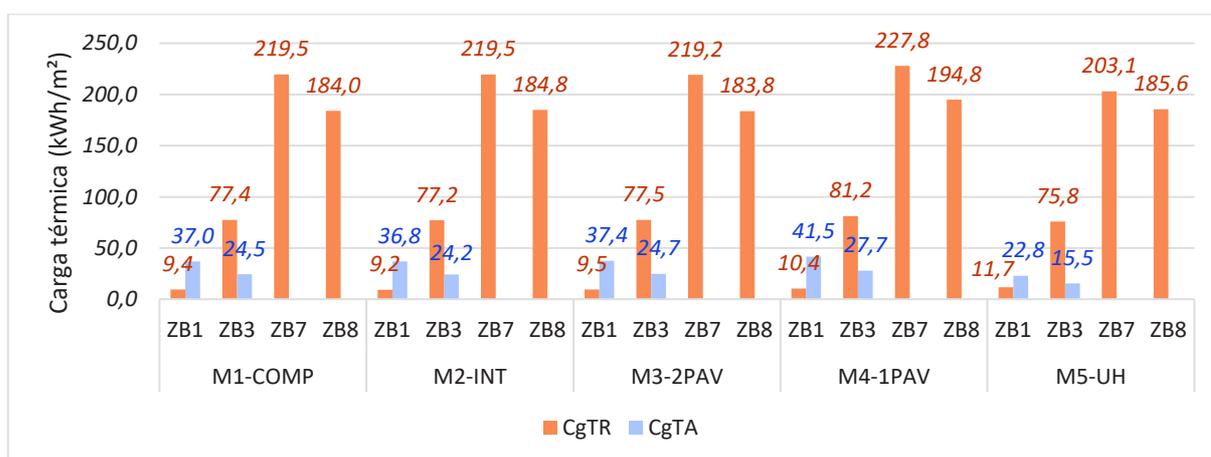


Figura 27 – CgTR e CgTA (kWh/m<sup>2</sup>) de prédio sem ventilação natural, com diferentes métodos de modelagem e em diferentes zonas bioclimáticas

Fonte: autor.

Os resultados obtidos nessa etapa, apresentados na Figura 27, indicaram a variação dos indicadores de carga térmica – CgTR e CgTA – em cenários de métodos simplificados de modelagem de uma edificação multifamiliar vertical sem uso da ventilação natural. Em geral, o perfil comparativo dos resultados obtidos entre os

cenários se assemelha ao verificado na etapa anterior, quando se considerava a ventilação natural. Nessa etapa, porém, o indicador geral de desempenho consiste na soma de CgTR e CgTA, e é possível relacionar esses indicadores ao GHc e GHf para efeitos de análise.

Em Curitiba, há a presença de maiores valores para o indicador CgTA, devido ao clima tipicamente mais frio. Os modelos M2-INT e M3-2PAV apresentaram valores bastante próximos ao M1-COMP, sendo perceptível um aumento de CgTR e CgTA no modelo M4-1PAV e um aumento de CgTR junto a uma redução de 38% de CgTA no modelo M5-UH, distanciando-se do modelo de referência. Em Porto Alegre, o comportamento entre os modelos é semelhante, sendo que nessa cidade há uma distribuição de grandezas praticamente oposta de valores entre CgTR e CgTA, por se tratar de um clima mais quente; ainda, percebe-se que no modelo M5-UH houve redução de CgTR, sendo um detalhe que apresentou distinção em relação aos cenários da cidade de Curitiba.

Na cidade de Cuiabá, é possível perceber valores muito superiores do indicador CgTR em relação às demais cidades, sendo 23 vezes maior que Curitiba, 180% acima de Porto Alegre e 20% maior que Manaus. Destaca-se que em Manaus tem-se um clima mais quente, porém as diferenças de critérios de temperatura para acionamento do sistema de condicionamento de ar geraram cargas térmicas inferiores a Cuiabá, bem como se percebeu nas demais etapas do trabalho. Ainda, percebe-se que nas cidades de Cuiabá e Manaus houve oscilação do indicador CgTR nos cenários analisados, distinguindo-se do comportamento observado do indicador GHc na etapa dos modelos com ventilação natural, onde teve-se uma tendência de crescimento de valores na maior parte dos cenários. Destaca-se que é possível perceber uma tendência de que, nas cidades mais quentes, haja menor oscilação dos valores de carga térmica em relação às cidades mais frias, como é possível perceber nos valores de similaridade, apresentados a seguir.

Considerando os resultados obtidos para cada indicador, foi calculada a similaridade (%) individual de cada indicador (CgTR e CgTA), em cada método de modelagem e em cada uma das quatro zonas bioclimáticas. Para a determinação desse percentual, tomou-se o modelo completo (M1-COMP) como modelo de referência (100%). Esses resultados são apresentados na Figura 28.

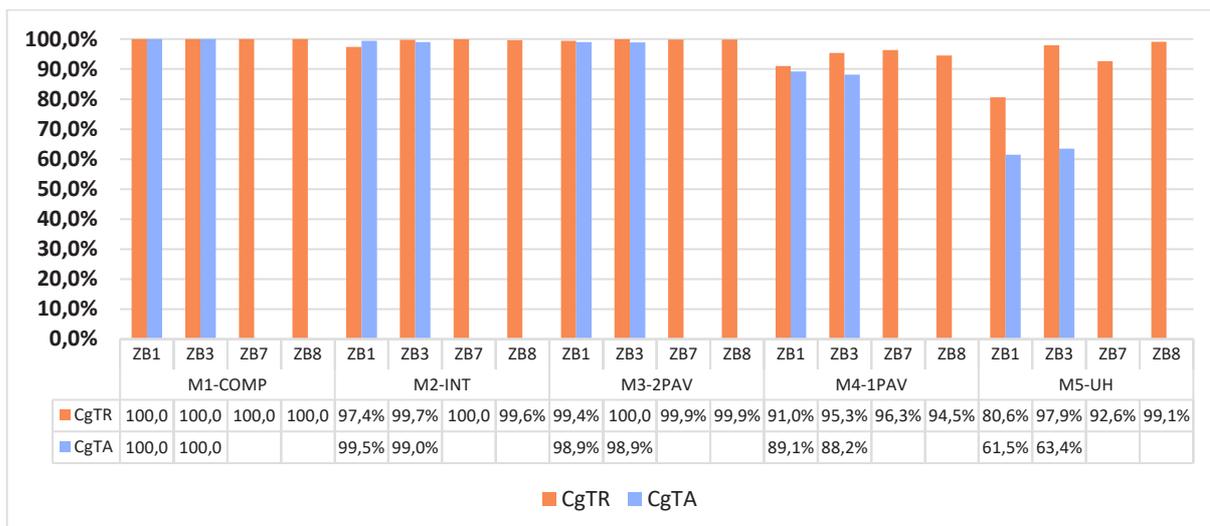


Figura 28 – Similaridade (%) individual dos indicadores em modelos simplificados de prédio sem ventilação natural em relação ao M1-COMP em cada zona bioclimática

Fonte: autor.

A partir da Figura 28, foi calculada a média dos dois indicadores (%) para cada método de modelagem em cada zona bioclimática, o que consiste na similaridade (%) agrupada dos dois indicadores para cada situação. Assim, determinou-se a similaridade dos métodos de modelagem ao modelo completo tomado como referência, sendo esses resultados apresentados na Figura 29.

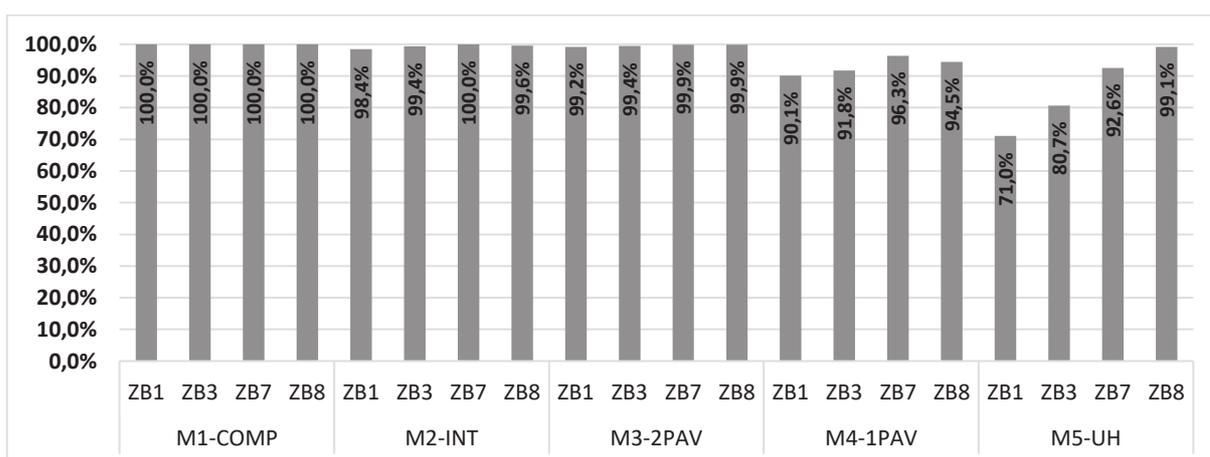


Figura 29 – Similaridade (%) agrupada dos indicadores em modelos simplificados de prédio sem ventilação natural em relação ao M1-COMP em cada zona bioclimática

Fonte: autor.

A partir dos dados apresentados na Figura 29, foi calculada a média dos indicadores em cada método de modelagem nas quatro zonas bioclimáticas. Sendo

assim, tem-se a média final de similaridade (%) de cada método de modelagem em relação ao método M1-COMP, conforme apresenta a Figura 30.

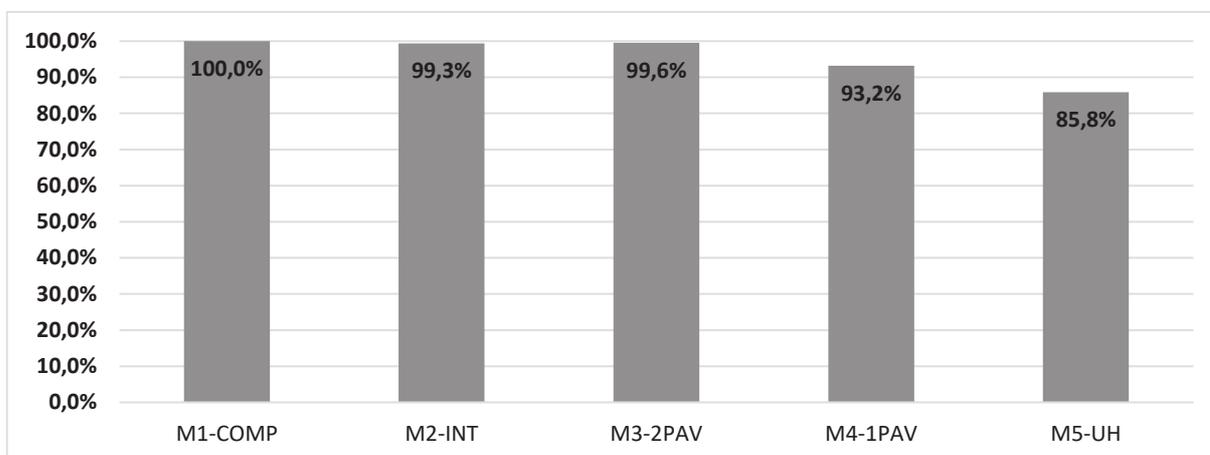


Figura 30 – Similaridade (%) média final dos métodos de modelagem nos cenários de prédio sem ventilação natural

Fonte: autor.

Os resultados apresentados na Figura 28, na Figura 29 e na Figura 30 indicam a similaridade dos métodos de modelagem, em ordem crescente de agrupamento dos dados. No que diz respeito aos indicadores separadamente, percebe-se através da Figura 28 que há uma tendência de maiores variações no indicador CgTR, sendo a similaridade do indicador CgTA mais alta na maior parte dos cenários. Ainda, percebe-se que o indicador CgTR apresentou maior variação nos cenários da cidade de Curitiba, em comparação aos demais climas, o que provavelmente ocorre devido às temperaturas mais baixas nesse local.

Analisando o comportamento dos métodos de modelagem em cada cidade na Figura 29, percebe-se que há uma tendência de menores similaridades em climas mais frios, o que ocorre principalmente devido à presença do indicador CgTA nesses casos, o qual apresenta maior variação quando em cenários de modelagem simplificada, conforme visto anteriormente. O modelo M5-UH na cidade de Curitiba apresentou a menor similaridade dessa etapa do trabalho, de 71,0% em relação ao modelo de referência. Ainda, na cidade de Manaus esse modelo apresentou alta similaridade, de 99,1%, acima ainda do modelo M4-1PAV na mesma cidade, característica que toma destaque.

Através da Figura 30, observa-se a similaridade média final de cada método de modelagem nos cenários sem ventilação natural. Percebe-se que a similaridade de cada método foi semelhante aos valores já observados nos cenários dos modelos com uso da ventilação natural, havendo pequenas variações. O modelo M3-2PAV apresentou-se como o método mais próximo ao modelo M1-COMP, seguido do modelo M2-INT, ambos com alto índice de similaridade, acima de 99%. No modelo M4-1PAV, ocorreu uma redução significativa da similaridade para 93,2%, sendo menos representativo do modelo de referência. Por fim, o modelo M5-UH apresentou similaridade de 85,8%, ainda mais distanciado do modelo M1-COMP. Sendo assim, no que tange à similaridade dos indicadores nos métodos adotados, estas foram semelhantes nos cenários com e sem o uso da ventilação natural. Essas análises podem ser estudadas a fim de possibilitar a adoção de outras formas de modelagem focadas em áreas específicas de edificações multifamiliares de maior porte, além de embasar a definição de métodos de modelagem específicos em procedimentos, normas e métodos de avaliação de desempenho térmico.

## 5 DISCUSSÃO

Após a realização do programa experimental proposto e apresentação dos resultados obtidos, esse capítulo visa discutir os fatores observados e previamente destacados. Sendo assim, para cada etapa do trabalho, foram identificados os principais aspectos observados, sendo discutidos os valores obtidos com as expectativas iniciais e a relação com trabalhos semelhantes dentro de cada variável analisada nesse estudo.

Para a primeira etapa do trabalho, que teve foco nos sistemas de parede, é feita a análise de como estes afetam o desempenho térmico das residências considerando situações com e sem uso da ventilação natural, nas quatro cidades adotadas para todo o programa experimental, nos tipos de edificação de casa e prédio. A Tabela 13 apresenta uma análise comparativa do desempenho proporcionado por cada sistema nas unidades habitacionais analisadas. Destaca-se que essa análise é baseada nos resultados obtidos na primeira etapa e possui caráter qualitativo, não indicando a ordem de grandeza das diferenças entre os resultados.

Tabela 13 – Análise qualitativa do desempenho proporcionado por cada sistema na primeira etapa do trabalho

Sistema	Casa								Prédio							
	Com ventilação natural				Sem ventilação natural				Com ventilação natural				Sem ventilação natural			
	ZB1	ZB3	ZB7	ZB8												
P1-CER	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
P2-CON	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
P3-SL	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●

Fonte: autor.

Inicialmente, os resultados apontaram que não houve um sistema construtivo das paredes externas, entre os três adotados, que proporcionou os cenários de melhor desempenho térmico em todas as situações, pois os resultados comparativos entre os sistemas de parede variaram conforme cada cidade e seu clima. Nas cidades de clima mais frio, o modelo com o sistema de parede leve (P3-SL) apresentou o melhor desempenho em cenários de ventilação natural, com PHFT de 1,9% a 8,4% acima dos demais sistemas; o modelo com sistema de alvenaria de blocos cerâmicos vazados (P1-CER) apresentou desempenho mediano entre os demais, e o modelo com o sistema de parede de concreto (P2-CON) apresentou o desempenho mais

baixo, com PHFT de 2,8% a 8,4% menor. Através do uso dos indicadores graus-hora, percebe-se altos valores no indicador GHf para o modelo com o sistema P2-CON quando comparado com os demais, havendo maior estabilidade no indicador GHc entre diferentes modelos. Nas cidades mais quentes, quando com ventilação natural, a relação entre a influência dos sistemas se inverte, sendo o P2-CON o de melhor desempenho, seguido pelo P1-CER e pelo P3-SL, com diferenças de PHFT que variaram de 1,9% a 5,1%. Nos cenários sem ventilação natural nas cidades quentes, o P3-SL proporcionou o melhor desempenho térmico, com valores de 4% a 89% abaixo dos demais, seguido do P1-CER e do P2-CON.

Sendo assim, em posse dos resultados obtidos e das características dos sistemas, é possível traçar diversas relações. O sistema P1-CER possui transmitância térmica 2,8 vezes menor e 3 vezes maior em relação aos sistemas P2-CON e P3-SL, respectivamente; quanto à capacidade térmica, ou inércia térmica, é 1,5 vezes menor e 4,9 vezes maior do que os demais sistemas na mesma ordem. Portanto, trata-se de um sistema com características de valores medianos em relação aos demais sistemas, tendo apresentado desempenho coerente com essa relação. O sistema P2-CON, de transmitância e capacidade térmica mais altas, apresenta baixo desempenho para climas frios, e melhores condições de conforto e desempenho térmico para climas quentes quando em cenários de ventilação natural, não se aplicando esse comportamento nessas últimas cidades quando há o uso de ar-condicionado. Dessa forma, pode proporcionar desempenho térmico mais alto quando há maiores renovações de ar interno, porém não promove boas características de isolamento térmico quando há o isolamento dessas trocas nos cenários sem ventilação natural. Ainda, o P3-SL, de transmitância e capacidade térmica significativamente mais baixas, apresentou-se como o sistema que proporcionou o melhor desempenho na maior parte dos cenários, exceto nas cidades de Cuiabá e Manaus quando com ventilação natural ativa.

Portanto, a propriedade de isolamento térmico, dada principalmente em função da transmitância térmica, toma relevância na maior parte dos cenários, fator que também é constatado em outros trabalhos como o de Eli (2020) e o de Sorgato, Melo e Lamberts (2016). O comportamento desfavorável de sistemas com maior isolamento térmico nos climas quentes quando com ventilação natural foi observado também nos resultados do trabalho de Silveira (2014), que atribuiu o aumento das temperaturas internas ao acúmulo de ganhos internos de calor nesses sistemas, ocasionando um

efeito de isolamento térmico inverso ao conforto térmico dos usuários, mantendo o meio interno mais quente em relação ao meio externo em situações de verão. Sendo assim, os resultados observados nessa etapa puderam ser explicados através de análise das características térmicas e físicas dos sistemas adotados, junto a estudos semelhantes que corroboram as conclusões que foram obtidas.

Na segunda etapa do trabalho, foram analisados os efeitos do uso e operação dos ambientes residenciais no desempenho térmico das edificações, que se relaciona com o conforto do próprio usuário, que por sua vez toma um importante papel no processo de trocas térmicas entre os ambientes internos e externos. A Tabela 14 apresenta uma análise comparativa do desempenho obtido na situação de cada tipo de uso. Destaca-se a análise é qualitativa, não indicando ordem de grandeza das diferenças entre os resultados obtidos.

Tabela 14 – Análise qualitativa do desempenho proporcionado por cada sistema na segunda etapa do trabalho

Tipo de uso	Casa								Prédio							
	Ventilação seletiva				Ventilação diurna				Ventilação seletiva				Ventilação diurna			
	ZB1	ZB3	ZB7	ZB8	ZB1	ZB3	ZB7	ZB8	ZB1	ZB3	ZB7	ZB8	ZB1	ZB3	ZB7	ZB8
UP	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
UI	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
UR	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●

Fonte: autor.

Através das simulações realizadas, foi percebido que o uso prolongado da residência, que ocorre nos cenários de uso intensificado (UI), tende a tornar as temperaturas internas mais altas devido aos ganhos internos de calor e a manter o usuário mais exposto aos ambientes que habitam. Sendo assim, nas cidades de clima mais frio como Curitiba e Porto Alegre esse comportamento foi em geral satisfatório ao desempenho térmico, chegando a aumentar o PHFT em até 7,9% em relação ao uso padrão (UP), porém em Cuiabá e Manaus esse fator reduziu o indicador em mais de 20% em alguns casos. Por outro lado, o uso reduzido (UR) tende a ter o efeito inverso, aumentando o indicador GHf e reduzindo o PHFT nas cidades com períodos tipicamente frios e aumentando as condições de desempenho e conforto nas cidades de clima mais quente. Isso ocorre pois se presume que, nesses cenários, o usuário ocupa a residência por períodos mais curtos, gerando menores ganhos internos de calor e ficando exposto aos ambientes com temperaturas mais baixas. Esses

resultados são semelhantes aos obtidos no trabalho de Eli (2020), que observou maiores cargas térmicas de refrigeração (CgTR) em cenários com tipo de ocupação prolongado e menores CgTR em cenários com padrão de ocupação predominantemente noturno, assemelhando-se aos resultados obtidos nessa etapa do presente trabalho.

No que tange às variações do tipo de ventilação, foram analisados cenários com ventilação natural seletiva e com ventilação natural diurna. Nas cidades mais frias, a ventilação natural diurna apresentou redução de desempenho térmico, que está relacionado ao aumento de GHf nesses climas, e nas cidades de clima mais quente houve tendência de aumento de PHFT e redução de GHc – em Cuiabá, onde há um clima quente e seco, ocorreram alterações sensíveis, com aumento de desempenho na edificação unifamiliar e redução na edificação multifamiliar, e na cidade de Manaus, com clima quente e úmido, houve aumento de desempenho em todos os cenários.

Esses resultados ocorreram de forma parcialmente oposta aos resultados esperados, pois trabalhos semelhantes relataram cenários onde a ventilação diurna foi insatisfatória para a carga térmica da residência (SORGATO; MELO; LAMBERTS, 2016). No entanto, destaca-se que o trabalho tomado como referência analisou essa variação para a cidade de Florianópolis, localizada na ZB3 – entre os climas abordados nesse trabalho, se aproxima mais às cidades de Curitiba e Porto Alegre, onde de fato os resultados indicaram que a ventilação diurna foi prejudicial ao desempenho térmico.

No presente trabalho, foi verificado que para climas mais quentes a ventilação natural diurna pode ser favorável à amenização de temperaturas internas, reduzindo o GHc e aumentando o PHFT, e esses resultados não se opõem ao trabalho tomado como referência. Esse comportamento pode ser explicado pelo fenômeno de trocas de ar interno e externo, que faz a renovação interna do ar no período diurno. Supostamente, a ventilação natural seletiva seria mais favorável a esse fenômeno, pois essa apenas ativa a abertura das janelas quando a temperatura interna é superior à temperatura externa e superior a 19°C.

Porém, os resultados obtidos indicam que a troca de ar interno pode ser necessária e benéfica ao desempenho mesmo em situações que não se enquadram nos critérios adotados de ventilação natural seletiva. Destaca-se que a renovação se torna ainda mais relevante nos cenários de uso reduzido (UR), onde obteve-se

aumentos de até 20%, contra 3% quando com uso intensificado (UI); ou seja, há maiores vantagens quando a ventilação natural diurna é ativada e o usuário não ocupa os ambientes, renovando o ar e preparando-o para a ocupação tardia com temperaturas mais amenas. Sendo assim, os resultados observados no trabalho de Sorgato, Melo e Lamberts (2016), no que tange a ventilação natural diurna, foram corroborados pelo comportamento observado nas cidades mais frias, havendo um complemento para as cidades quentes, nas quais a ventilação diurna pode ser uma alternativa interessante.

Dessa forma, os resultados obtidos na segunda etapa do trabalho demonstraram o importante papel dos usuários na operação e ocupação da residência, alterando significativamente as condições de conforto e desempenho térmico com base em seus hábitos pessoais. O uso deve ser estudado a fundo quando possível, podendo gerar ganhos de desempenho térmico e eficiência energética quando utilizado a favor desses fatores. (BALVEDI; GHISI; LAMBERTS, 2018; MAHDAVI, 2011).

Na terceira etapa, foi estudado como o método de modelagem de edificações multifamiliares pode influenciar nos resultados de análises de desempenho térmico em simulações. Com cinco modelos de diferentes formas de simplificação, adotou-se a análise de unidades habitacionais representativas com base na orientação solar e altura dos pavimentos, reduzindo o modelo original e aplicando superfícies adiabáticas nos locais de limitação das zonas térmicas modeladas. Os resultados indicaram que os modelos M2-INT e M3-2PAV representaram mais de 99% do modelo de referência, sendo modelos altamente representativos. Por outro lado, os modelos M4-1PAV e M5-UH, com simplificações mais acentuadas, representaram de 93,2% a 93,6% e de 83,3% a 85,8%, respectivamente, os resultados obtidos no modelo de referência – sendo assim, apresentam reduções consideráveis de similaridade dos dados, não sendo indicados. O trabalho de Veiga (2021) atribui essas variações acentuadas ao efeito causado pela configuração de superfícies como adiabáticas na redução de modelos – sendo assim, ao realizar uma simplificação deve-se considerar trechos do entorno mais próximos às zonas de análise, de forma a garantir maior representatividade do modelo de referência. O autor apresenta, ainda, análises de metamodelos que podem prever o desempenho térmico de edificações com base nas principais variáveis, classificando-as através de análise de sensibilidade de Sobol.

Dessa forma, as análises são simplificadas ainda mais, efeito que não faz parte do escopo do presente trabalho, mas que possui um potencial interessante.

Portanto, os resultados obtidos nesse estudo possibilitam discutir a influência de diferentes variáveis no desempenho térmico de habitações. As três etapas abordaram variáveis relacionadas à edificação, aos usuários e ao método de análise em si. Esses fatores podem contribuir com a elaboração de novos documentos técnicos e com a atualização dos já existentes, de forma a aprimorar as metodologias vigentes de análise de desempenho no âmbito nacional.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O propósito desse trabalho foi analisar condicionantes relacionados à envoltória, aos usuários e à representação de modelos de edificações no seu desempenho térmico. Com isso, o programa experimental foi realizado em três etapas, sendo a primeira com foco em sistemas de parede, a segunda em variações de uso e operação da residência e a terceira em métodos de modelagem para simulação computacional.

No que tange aos sistemas de parede, analisou-se sistema de alvenaria de blocos cerâmicos (P1-CER), parede de concreto (P2-CON) e sistema leve em *drywall* (P3-SL). Ainda, foram analisados cenários com variação de quatro cidades (Curitiba/PR [ZB1], Porto Alegre/RS [ZB3], Cuiabá [ZB7] e Manaus [ZB8]), dois tipos de uso de sistemas de ventilação (com ventilação natural e sem ventilação natural, ou seja, com ar-condicionado) e dois tipos de edificação (casa unifamiliar e prédio multifamiliar). Na segunda etapa, com foco no uso e operação, analisou-se ocupação com uso padrão (UP), reduzido (UR) e intensificado (UI); ventilação natural seletiva (VS) e diurna (VD); nas quatro cidades (Curitiba, Porto Alegre, Cuiabá e Manaus); e dois tipos de edificação (casa e prédio). Na terceira etapa, foram analisados cinco métodos de modelagem, sendo esses o modelo completo (M1-COMP), modelo com pavimento intermediário (M2-INT), modelo com os dois últimos pavimentos (M3-2PAV), modelo com somente o último pavimento (M4-1PAV) e modelo somente com a unidade habitacional representativa (M5-UH); nas quatro cidades (Curitiba, Porto Alegre, Cuiabá e Manaus) e em dois tipos de uso de sistema de ventilação (com e sem ventilação natural). Sendo assim, foram analisados um total de 128 cenários de simulação térmica computacional.

Os resultados da primeira etapa indicaram que não há um sistema de parede, dentre os analisados, que apresente o melhor ou o pior desempenho em todos os cenários. Dependendo de fatores como o clima e o tipo de uso da ventilação, há variações consideráveis de desempenho térmico entre os sistemas. No que tange ao tipo de edificação, houveram alguns desvios, porém estes foram uniformes entre os sistemas de parede, não alterando consideravelmente a relação entre eles. Foi possível identificar que em climas frios, há a tendência de que sistemas de menor transmitância térmica apresentem desempenho térmico mais elevado, visto que o sistema P3-SL apresentou PHFT de 2% a 8% acima e cargas térmicas de 4% a 89%

abaixo dos demais sistemas. Por outro lado, em climas mais quentes, sistemas com alta capacidade térmica podem proporcionar melhor desempenho, pois o sistema P2-CON apresentou aumentos de 2% a 5% no PHFT nos cenários com ventilação natural; quando não houve a ventilação natural porém, foram observados aumentos de carga térmica em relação aos demais sistemas. O sistema P1-CER apresentou desempenho mediano entre os demais, em grande parte dos cenários analisados.

Na segunda etapa, as variações de uso e operação das unidades habitacionais indicaram que o fator usuário tem alta influência no conforto térmico proporcionado, nas cargas térmicas geradas e, portanto, também no desempenho térmico. Os resultados obtidos indicaram que usos mais prolongados e intensificados tendem a gerar maiores ganhos internos, aumentando as temperaturas internas, o que é benéfico em climas frios e desfavorável ao desempenho em climas quentes; por outro lado, usos reduzidos tendem a gerar menores acúmulos de calor, reduzindo as temperaturas internas e gerando o efeito inverso. Além disso, esses tipos de uso alternam os períodos em que o usuário está exposto aos ambientes das unidades habitacionais, influenciando nos períodos em que se coleta os dados que influenciam diretamente no indicador PHFT. Quanto à operação das aberturas das residências, a ventilação seletiva apresenta melhores resultados em climas mais frios; porém, em climas mais quentes podem haver benefícios quando há uma ventilação natural diurna fixa nas unidades habitacionais, especialmente quando aliada à uma ocupação da residência restrita ao período noturno.

A análise conduzida com foco nas variações de métodos de modelagem das edificações indicou que algumas simplificações podem ser empregadas sem que haja alterações consideráveis nos resultados. Os modelos M2-INT e M3-2PAV apresentaram resultados que representaram 99% do modelo de referência – sendo assim, ambos se apresentam como métodos muito próximos de modelos completos, permitindo que suas técnicas sejam empregadas de forma a reduzir modelos de simulação quando desejado. Por outro lado, os modelos M4-1PAV e M5-UH apresentaram variações de 7% e 15%, respectivamente, dos resultados tidos como referência do modelo completo, o que indica que a adoção de superfícies adiabáticas próximas às zonas de análise tende a gerar perdas significativas de trocas térmicas internas entre zonas, o que pode comprometer a confiabilidade dos resultados gerados.

Sendo assim, o trabalho realizado possibilitou traçar análises comparativas entre fatores de envoltória, de uso e de caracterização de edificações para simulação. As três etapas, analisadas de forma individual, trazem dados que contribuem para análises de desempenho térmico de edificações no contexto climático brasileiro. Com a alternância das cidades, tipo de ventilação dos ambientes e tipo de edificação foi possível verificar também que os valores relativos aos parâmetros de conforto térmico, bem como às cargas térmicas, são altamente variáveis considerando todos esses aspectos. Sendo assim, tem-se um sistema sensível a diversos fatores, os quais estão relacionados à concepção construtiva das edificações, à forma como estas são usadas, aos métodos de análise de desempenho, entre outras variáveis que se relacionam aos mecanismos de trocas térmicas existentes no contexto de edificações habitacionais.

## REFERÊNCIAS

- ABNT. **NBR 15220: Desempenho térmico de edificações**. Rio de Janeiro, 2005.
- ABNT. **NBR 15575: Edificações Habitacionais — Desempenho**. Rio de Janeiro, 2013.
- ABNT. **NBR 15575-1/Em1: Edificações Habitacionais — Desempenho — Parte 1: Requisitos gerais**. Rio de Janeiro, 2021.
- AGOPYAN, V.; JOHN, V. M. **O desafio da sustentabilidade na construção civil**. 5. ed. São Paulo: Blucher, 2011.
- ASCIONE, F. et al. Design of the Building Envelope: A Novel Multi-Objective Approach for the Optimization of Energy Performance and Thermal Comfort. **Sustainability**, v. 7, n. 8, p. 10809–10836, 2015.
- ASHRAE. **ANSI/ASHRAE Standard 55-2017: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy**. Atlanta, 2017.
- ASHRAE. **ANSI/ASHRAE/IES Standard 90.2-2018: Energy-Efficient Design of Low-Rise Residential Buildings**. Atlanta, 2018.
- ASHRAE. **ANSI/ASHRAE/IES Standard 90.1-2019: Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings**. Atlanta, 2019a.
- ASHRAE. **ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2019: Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality**. Atlanta, 2019b.
- ASHRAE. **ANSI/ASHRAE Standard 62.2-2019: Ventilation and Acceptable Indoor Air Quality in Residential Buildings**. Atlanta, 2019c.
- ASSIS, E. S. DE; PEREIRA, I. M. Consumo de energia: fatores ambientais e socioeconômicos da organização espacial urbana. In: **Planejamento e controle ambiental-urbano e a eficiência energética**. Rio de Janeiro: IBAM/DUMA; ELETROBRAS/PROCEL, 2013.
- BALVEDI, B. F.; GHISI, E.; LAMBERTS, R. A review of occupant behaviour in residential buildings. **Energy and Buildings**, v. 174, p. 495–505, 2018.
- BANIASSADI, A. et al. Direct and indirect effects of high-albedo roofs on energy consumption and thermal comfort of residential buildings. **Energy and Buildings**, v. 178, p. 71–83, 2018.
- BARNABY, C. S.; CRAWLEY, D. B. Weather data for building performance simulation. In: **Building Performance Simulation for Design and Operation**. 1. ed. Abingdon: Spon Press, 2011. p. 37–55.
- BOGO, A. J. **Limitações quanto aos parâmetros de desempenho térmico e estratégias bioclimáticas recomendadas pela norma brasileira de desempenho térmico de habitações de interesse social**. NUTAU 2008 - Núcleo de Pesquisa em

Tecnologia da Arquitetura. **Anais...**São Paulo: Universidade de São Paulo, 2008. Disponível em: <<https://www.usp.br/nutau/CD/30.pdf>>

BOGO, A. J. Reflexões críticas quanto as limitações do texto das normas brasileiras de desempenho NBR 15220-3 e NBR 15575. **Holos**, v. 7, p. 290–298, 2016.

CAMPOS, P. E. F. DE. Norma de desempenho de edificações: uma contribuição para o desenvolvimento do conceito de normativa exigencial aplicado à construção civil. **Concreto & Construção**, v. XLI, p. 48–53, 2013.

CÂNDIDO, C. et al. Cooling exposure in hot humid climates: Are occupants “addicted”? **Architectural Science Review**, v. 53, n. 1, p. 59–64, 2010.

CHVATAL, K. M. S. Avaliação do procedimento simplificado da NBR 15575 para determinação do nível de desempenho térmico de habitações. **Ambiente Construído**, v. 14, n. 4, p. 119–134, 2014.

CLARKE, J. A.; HENSEN, J. L. M. Integrated building performance simulation: Progress, prospects and requirements. **Building and Environment**, v. 91, p. 294–306, 2015.

COELHO, T. DA C. C.; GOMES, C. E. M.; DORNELLES, K. A. Desempenho térmico e absorvência solar de telhas de fibrocimento sem amianto submetidas a diferentes processos de envelhecimento natural. **Ambiente Construído**, v. 17, n. 1, p. 147–161, 2017.

CRAWLEY, D. B. et al. Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs. **Building and Environment**, v. 43, n. 4, p. 661–673, 2008.

DEKAY, M.; BROWN, G. Z. **Sun, Wind & Light - Architectural Design Strategies**. 3. ed. Hoboken: Wiley, 2014.

DORNELLES, K. A. **Absorvência solar de superfícies opacas: métodos de determinação e base de dados para tintas látex acrílica e PVA**. [s.l.] Universidade Estadual de Campinas, 2008.

DORNELLES, K. A.; CARAM, R. M.; SICHIERI, E. P. Absorvência solar e desempenho térmico de tintas frias para uso no envelope construtivo. **Paranoá: cadernos de arquitetura e urbanismo**, n. 12, p. 55–64, 2014.

DORNELLES, K.; CARAM, R.; SICHIERI, E. Natural weathering of cool coatings and its effect on solar reflectance of roof surfaces. **Energy Procedia**, v. 78, p. 1587–1592, 2015.

ELI, L. G. **O impacto do padrão de uso no desempenho térmico de edificações unifamiliares no Brasil**. [s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina, 2020.

FERREIRA, C. C.; SOUZA, H. A. DE; ASSIS, E. S. DE. Discussão dos limites das propriedades térmicas dos fechamentos opacos segundo as normas de desempenho térmico brasileiras. **Ambiente Construído**, v. 17, n. 1, p. 183–200, 2017.

FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. R. **Manual de Conforto Térmico**. 8. ed. São Paulo: Studio Nobel, 2003.

GALLARDO, A. A. et al. **Analysis and Optimization of the Thermal Performance of Social Housing Construction Materials in Ecuador**. PLEA 2016 - 32nd International Conference on Passive and Low Energy Architecture. **Anais...**Los Angeles: PLEA, 2016.

GRIGOLETTI, G. DE C.; SATTLER, M. A. Método de avaliação global de desempenho higrotérmico de habitações de interesse social para Porto Alegre - RS - Brasil. **Ambiente Construído**, v. 10, n. 2, p. 101–114, 2010.

HASTINGS, R.; WALL, M. **Sustainable solar housing: Strategies and solutions**. Londres: Earthscan, 2007.

HENSEN, J. L. M.; LAMBERTS, R. **Building Performance Simulation for Design and Operation**. 1. ed. Abingdon: Spon Press, 2011.

JONES, J. Roofing materials for thermal performance and environmental integration of buildings. In: **Materials for Energy Efficiency and Thermal Comfort in Buildings**. Cambridge, UK: Woodhead Publishing Limited, 2010. p. 455–483.

KERN, A. P. et al. Energy and water consumption during the post-occupancy phase and the users' perception of a commercial building certified by Leadership in Energy and Environmental Design (LEED). **Journal of Cleaner Production**, v. 133, p. 826–834, 2016.

KOENIGSBERGER, O. H. et al. **Viviendas y edificios en zonas cálidas y tropicales**. Madrid, España: Paraninfo, 1977.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência Energética na Arquitetura**. 3. ed. Rio de Janeiro: ELETROBRAS/PROCEL, 2014.

LAMBERTS, R.; TRIANA, M. A. **Levantamento do estado da arte: Energia**. São Paulo, 2007.

LING-CHIN, J. et al. UK policies and industrial stakeholder perspectives on building thermal performance. **Energy Procedia**, v. 158, n. 2019, p. 3375–3380, 2019.

LIU, C. The Convergence of Standard 90.1, 62.1 and 55: Examples of Energy Efficiency Measures. **ASHRAE Transactions**, v. 125, n. Part 1, p. 223–230, 2019.

MAHDAVI, A. People in building performance simulation. In: **Building Performance Simulation for Design and Operation**. 1. ed. Abingdon: Spon Press, 2011. p. 56–83.

MAZZAFERRO, L. et al. Do we need building performance data to propose a climatic zoning for building energy efficiency regulations? **Energy & Buildings**, 2020.

MELO, A. P.; SORGATO, M. J.; LAMBERTS, R. Building energy performance assessment: Comparison between ASHRAE standard 90.1 and Brazilian regulation. **Energy and Buildings**, v. 70, p. 372–383, 2014.

MORENO, A. C. R.; MORAIS, I. S. DE; SOUZA, R. V. G. DE. **Thermal Performance of Social Housing – A Study Based on Brazilian Regulations**. 8th International Conference on Sustainability in Energy and Buildings. **Anais...**Turin, ITALY: Elsevier B.V., 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.013>>

MULHALL, C.; AYNSLEY, R. **Solar absorptance and uninsulated houses in the humid tropics**. PLEA'99 - International Conference on Passive and Low Energy Architecture. **Anais...**Melbourne, Australia: 1999. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/267769718\\_SOLAR\\_ABSORPTANCE\\_AND\\_UNINSULATED\\_HOUSES\\_IN\\_THE\\_HUMID\\_TROPICS](https://www.researchgate.net/publication/267769718_SOLAR_ABSORPTANCE_AND_UNINSULATED_HOUSES_IN_THE_HUMID_TROPICS)>

NETTO, G. R.; CZAJKOWSKI, J. D. Comparación entre las normas de desempeño térmico edificio de Argentina y Brasil. **Ambiente Construído**, v. 16, n. 1, p. 105–122, 2016.

NEWSHAM, G. R.; MANCINI, S.; BIRT, B. J. Do LEED-certified buildings save energy? Yes, but... **Energy and Buildings**, v. 41, n. 8, p. 897–905, 2009.

NGUYEN, A. T.; REITER, S.; RIGO, P. A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis. **Applied Energy**, v. 113, p. 1043–1058, 2014.

OLIVEIRA, R. D.; SOUZA, R. V. G. DE; DA SILVA, R. M. Issues to be improved on the Thermal Performance Standards for Sustainable Buildings consolidation: an overview of Brazil. **Energy Procedia**, v. 111, n. September 2016, p. 71–80, 2017.

OPTICS, 6.0. **International Glazing Database**. Lawrence Berkeley National Laboratory, 2013.

QIAO, R.; LIU, T. Impact of building greening on building energy consumption: A quantitative computational approach. **Journal of Cleaner Production**, v. 246, p. 1–13, 2020.

RIVERO, R. **Arquitetura e clima: acondicionamento térmico natural**. Porto Alegre: D.C. Luzzatto, 1985.

RORIZ, M. **Classificação de Climas do Brasil – Versão 3.0**São Carlos/SPANTAC: Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2014. Disponível em: <[http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/Climas\\_v3.pdf](http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/Climas_v3.pdf)>

SAILOR, D. J. Risks of summertime extreme thermal conditions in buildings as a result of climate change and exacerbation of urban heat islands. **Building and Environment**, v. 78, p. 81–88, 2014.

SCOFIELD, J. H. Do LEED-certified buildings save energy? Not really... **Energy and Buildings**, v. 41, n. 12, p. 1386–1390, 2009.

SCOFIELD, J. H. Efficacy of LEED-certification in reducing energy consumption and greenhouse gas emission for large New York City office buildings. **Energy and Buildings**, v. 67, p. 517–524, 2013.

SILVA, A. S. et al. Incerteza do método de simulação da NBR 15575-1 para a avaliação do desempenho térmico de habitações. **Ambiente Construído**, v. 14, n. 4, p. 103–117, 2014.

SILVA, A. S.; ALMEIDA, L. S. S.; GHISI, E. Análise de incertezas físicas em simulação computacional de edificações residenciais. **Ambiente Construído**, v. 17, n. 1, p. 289–303, 2017.

SILVEIRA, F. M. **Análise do desempenho térmico de edificações residenciais ventiladas naturalmente: NBR 15.575 e ASHRAE 55**. Campinas, SP: [s.n.], 2014.

SORGATO, M. J. et al. Análise do procedimento de simulação da NBR 15575 para avaliação do desempenho térmico de edificações residenciais. **Ambiente Construído**, v. 14, n. 4, p. 83–101, 2014.

SORGATO, M. J.; MELO, A. P.; LAMBERTS, R. Análise do método de simulação de desempenho térmico da norma NBR 15.575. **Paranoá: cadernos de arquitetura e urbanismo**, n. 12, p. 12–21, 2014.

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.

SPITLER, J. D. Building performance simulation: The now and the not yet. **HVAC&R Research**, v. 12, n. November, p. 711–713, 2006.

TALEGHANI, M. et al. Heat mitigation strategies in winter and summer: Field measurements in temperate climates. **Building and Environment**, v. 81, p. 309–319, 2014.

TIAN, Z. et al. Towards adoption of building energy simulation and optimization for passive building design: A survey and a review. **Energy & Buildings**, v. 158, p. 1306–1316, 2018.

TRIANA, M. A.; LAMBERTS, R.; SASSI, P. Should we consider climate change for Brazilian social housing? Assessment of energy efficiency adaptation measures. **Energy and Buildings**, v. 158, p. 1379–1392, 2018.

VEIGA, R. K. S. **Metamodelo para estimar o desempenho térmico de edificações residenciais multifamiliares naturalmente ventiladas**. [s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina, 2021.

WALSH, A. **Zoneamento bioclimático para edificações baseado no desempenho térmico**. Campinas, SP: [s.n.], 2017.

WALSH, A.; CÓSTOLA, D.; LABAKI, L. C. Performance-based validation of climatic zoning for building energy efficiency applications. **Applied Energy**, v. 212, n. December 2017, p. 416–427, 2018.

## APÊNDICE A – PADRÕES DE USO ALTERNATIVOS

Este apêndice visa complementar o item 3.2.3 no que diz respeito aos padrões de uso e operação das unidades habitacionais nos cenários alternativos analisados. Desta forma, a Figura 31 e a Figura 32 apresentam os padrões de uso dos cenários de uso intensificado da edificação, os quais consideram usuários nos dormitórios ao longo de todo o dia e na sala no período da manhã e da tarde. Destaca-se que nesses cenários adota-se potência de equipamentos também nos dormitórios, de 120 W. A Figura 33 e a Figura 34 apresentam os padrões de uso dos cenários de uso reduzido, ou seja, para casos de usuários que desocupam a habitação prolongadamente no período diurno. Ainda, a Figura 35 apresenta o padrão de abertura de janelas e/ou porta-janelas dos APP's para ventilação natural nos cenários com ventilação natural diurna. Destaca-se que os percentuais exibidos no gráfico são relativos à ventilação efetiva em relação ao vão total das esquadrias.

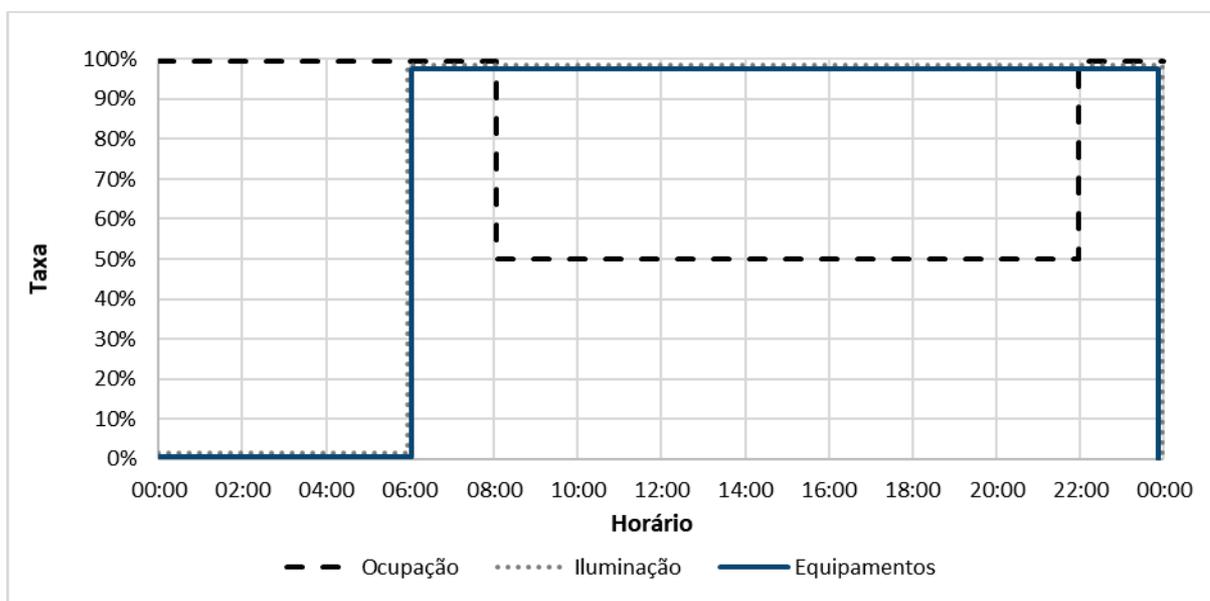


Figura 31 – Padrões de uso dos dormitórios nos cenários de uso intensificado

Fonte: autor.

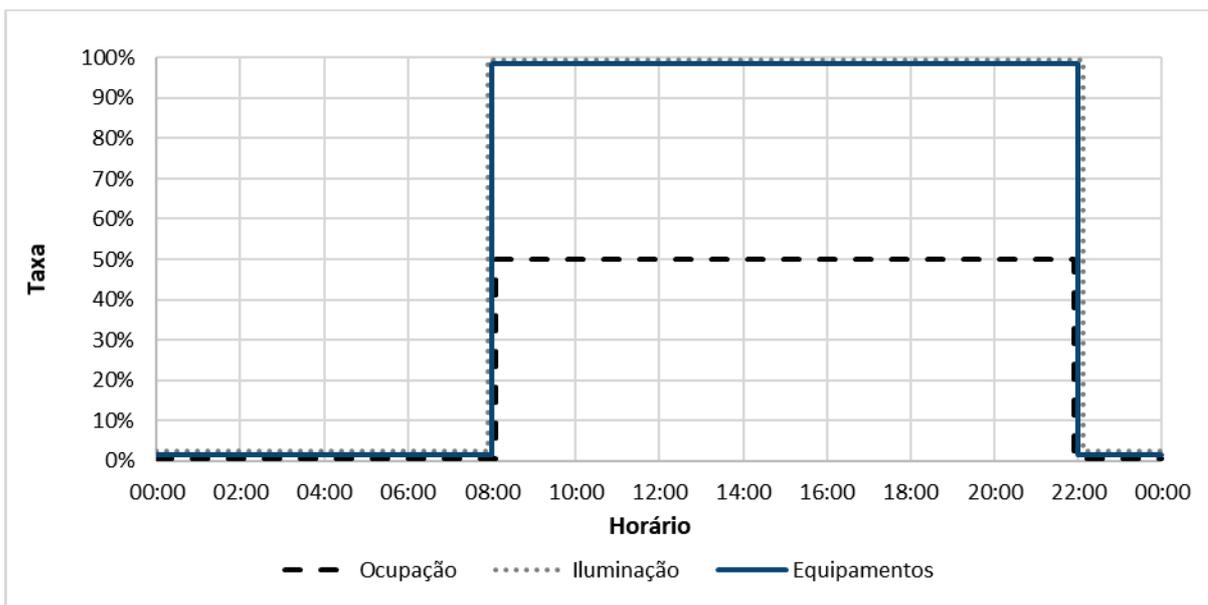


Figura 32 – Padrões de uso das salas nos cenários de uso intensificado

Fonte: autor.

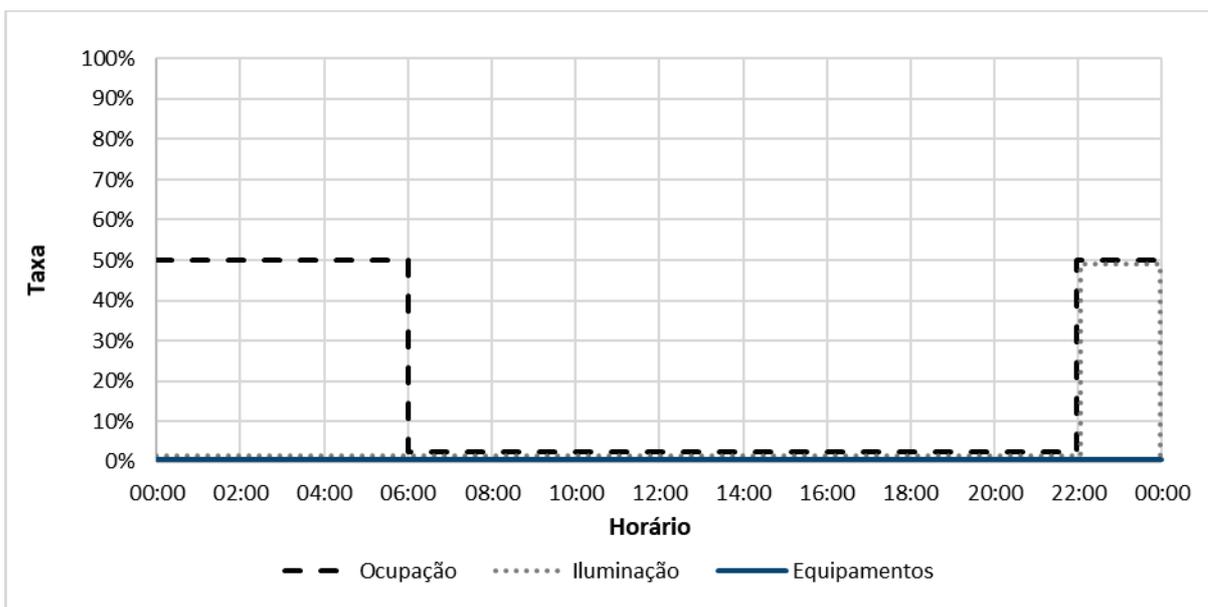


Figura 33 – Padrões de uso dos dormitórios nos cenários de uso reduzido

Fonte: autor.

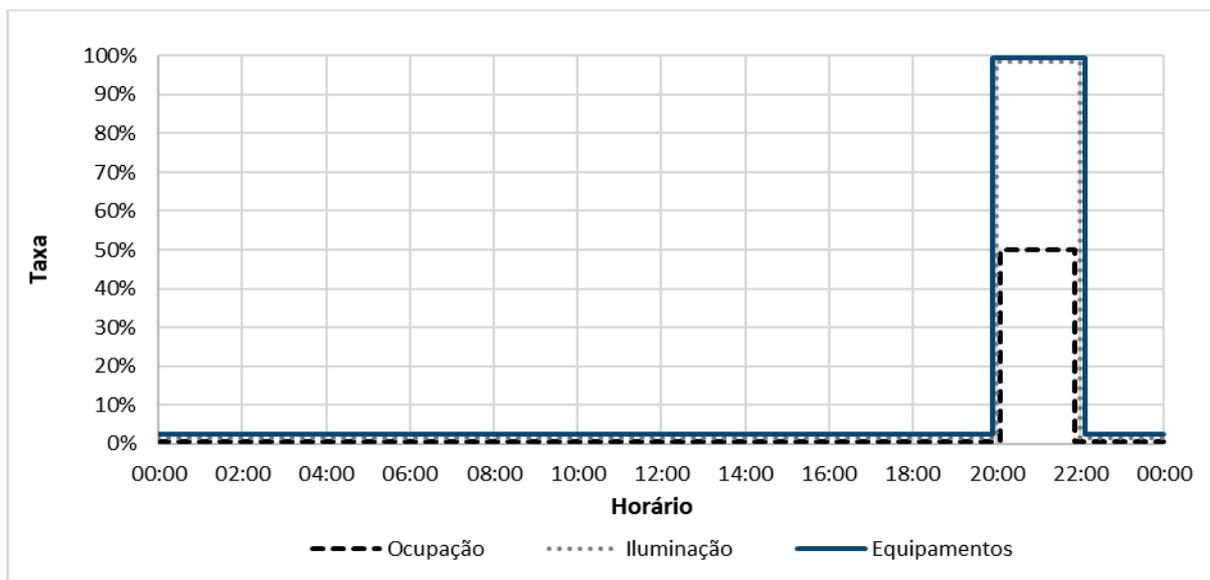


Figura 34 – Padrões de uso das salas nos cenários de uso reduzido

Fonte: autor.

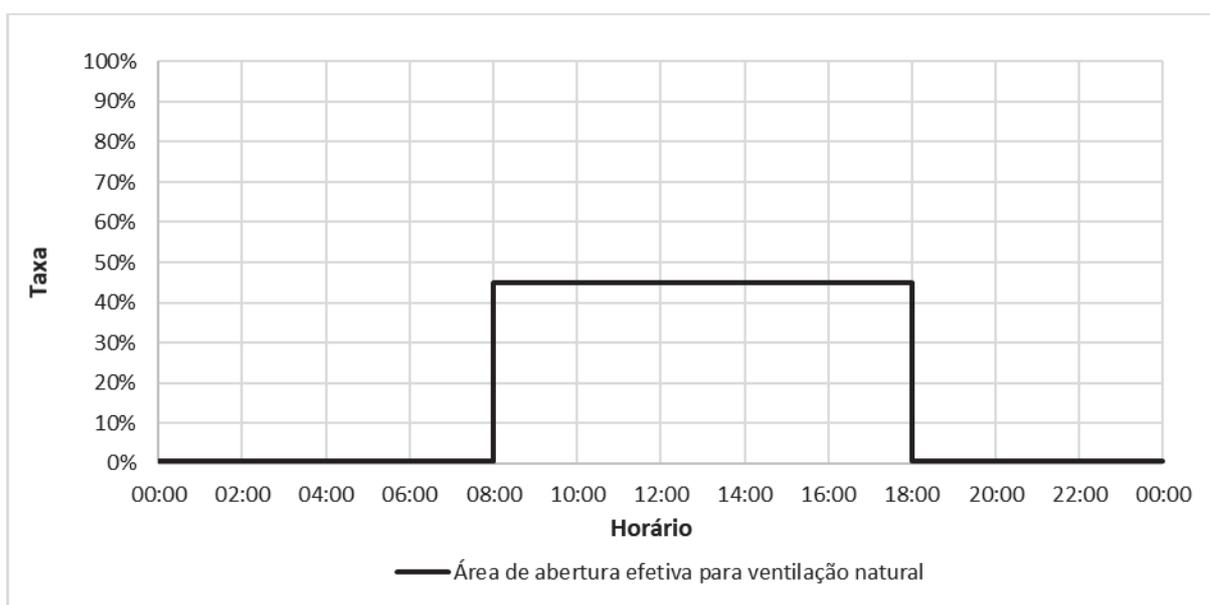


Figura 35 – Padrão de ventilação nos cenários de ventilação natural diurna

Fonte: autor.