



UNIVERSIDADE  
ESTADUAL DE LONDRINA

---

GUILHERME VILELA SANCHES

**ANÁLISE DE MÉTODOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR  
ATRAVÉS DO SOLO EM SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS  
DE EDIFICAÇÕES**

---

Londrina  
2021

GUILHERME VILELA SANCHES

**ANÁLISE DE MÉTODOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR  
ATRAVÉS DO SOLO EM SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS  
DE EDIFICAÇÕES**

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

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Thalita Gorban Ferreira Giglio

Londrina  
2021

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

S211a Vilela Sanches, Guilherme .

Análise de métodos de transferência de calor através do solo em simulações computacionais de edificações / Guilherme Vilela Sanches. - Londrina, 2021. 153 f. : il.

Orientador: Thalita Gorban Ferreira Giglio.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual de Londrina, Centro de Tecnologia e Urbanismo, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2021.

Inclui bibliografia.

1. Simulação termoenergética - Tese. 2. Calibração - Tese. 3. EnergyPlus - Tese. 4. Monitoramento - Tese. I. Gorban Ferreira Giglio, Thalita . II. Universidade Estadual de Londrina. Centro de Tecnologia e Urbanismo. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

CDU 62

GUILHERME VILELA SANCHES

**ANÁLISE DE MÉTODOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR  
ATRAVÉS DO SOLO EM SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS  
DE EDIFICAÇÕES**

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

**BANCA EXAMINADORA**

---

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Thalita Gorban  
Ferreira Giglio  
Universidade Estadual de Londrina – UEL

---

Prof. Dr. Eneir Ghisi  
Universidade Federal de Santa Catarina –  
UFSC

---

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Camila Gregório Atem  
Universidade Estadual de Londrina – UEL

Londrina, 18 de maio de 2021.

## **AGRADECIMENTOS**

À prof<sup>a</sup>. Dr.<sup>a</sup> Thalita, pela orientação desta pesquisa e deste pesquisador. Levarei para a vida seu profissionalismo e dedicação como exemplo a ser seguido.

Aos professores Dr. Enedir Ghisi e Dr.<sup>a</sup> Camila Gregório Atem, pelas profundas contribuições a esta pesquisa.

Ao Gustavo, Vanessa, Nádia, Jéssica, Mateus, Guilherme e aos amigos e amigas que fiz no E3sLab, que fizeram parte de uma etapa da minha vida que guardarei na memória com muito carinho. Todos e todas foram muito importantes por torná-la especial.

Ao Miguel e ao “Paraguaio”, servidores da prefeitura do campus da UEL, que realizaram as perfurações no piso da edificação. Seu trabalho cuidadoso e impecável contribuiu muito com a pesquisa.

À minha companheira Luísa, pelo amor, apoio e incentivo diários. Sua presença acalmou os dias mais corridos, e trouxe sorrisos para os dias difíceis.

Aos meus pais, por não terem medido esforços na minha educação e terem me ofertado as melhores condições para estudar e me desenvolver. Isso foi fundamental para que pudesse chegar até a realização desta pesquisa.

À CAPES, pelo apoio financeiro.

*“Terra para o pé, firmeza.  
Terra para a mão, carícia.”*  
(Caetano Veloso)

SANCHES, Guilherme Vilela. **Análise de métodos de transferência de calor através do solo em simulações computacionais de edificações**. 2021. 153 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2021.

## RESUMO

A análise do desempenho termoenergético de edificações por meio de simulação computacional envolve diferentes variáveis que representam as características do edifício e de seu entorno, bem como as condições climáticas às quais ele está submetido. Uma das variáveis de grande influência no desempenho termoenergético de edificações é a temperatura da interface entre o piso e o solo. O programa *EnergyPlus* disponibiliza diferentes métodos para calcular a temperatura do solo abaixo da edificação, que atua como condição de contorno para a resolução dos balanços térmicos das superfícies. As particularidades de cada um deles podem influenciar significativamente os resultados da simulação. Uma mesma edificação pode alcançar diferentes níveis de eficiência energética ou diferentes indicadores de conforto quando simulada com cada um dos métodos. Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo analisar a temperatura da superfície externa do piso obtida pelos métodos disponíveis no programa *EnergyPlus* e compará-la às temperaturas medidas em um protótipo habitacional de interesse social. Para isso, a temperatura de interface entre o piso dos ambientes de permanência prolongada e o solo foi monitorada durante o período de um ano, assim como as temperaturas do ar interno e externo. Com base nas temperaturas monitoradas, um modelo computacional do protótipo habitacional foi calibrado, e a raiz do erro quadrático médio (RMSD) obtida para um dos ambientes foi igual a 0,75°C. O modelo computacional calibrado foi validado para cada mês de análise, com a maior RMSD obtida igual a 1,09°C, para o mês de maio. Posteriormente, o modelo foi simulado com a utilização de diferentes métodos de transferência de calor através do solo: programa *Slab*; objeto *GroundDomain:Slab*, com os modelos de temperatura de solo não perturbado *KusudaAchenbach*, *FiniteDifference* e *Xing*; e o objeto *Foundation:Kiva*. Os resultados das temperaturas da interface entre piso e solo e das temperaturas operativas dos ambientes simulados foram comparados com as temperaturas monitoradas. O objeto *GroundDomain:Slab* com o modelo de temperatura de solo não perturbado *FiniteDifference* apresentou o comportamento mais próximo ao medido na edificação, com RMSD anual igual a 0,59°C na análise da temperatura de interface entre piso e solo, e de 0,88°C na análise da temperatura operativa. Desta forma, considera-se oportuno o emprego do objeto *GroundDomain:Slab* utilizando-se do modelo *FiniteDifference* em análises de desempenho termoenergético de edificações por simulação computacional. Salienta-se ainda a importância da consideração das propriedades termofísicas do solo, devido à sua grande influência nos resultados da simulação.

**Palavras-chave:** Simulação termoenergética. Calibração. *EnergyPlus*. Monitoramento. *Slab*. *GroundDomain*. *Kiva*.

SANCHES, Guilherme Vilela. **Analysis of ground heat transfer methods in whole building energy simulation**. 2021. 153 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2021.

## ABSTRACT

The analysis of thermal and energy performance of buildings through computer simulation involves different variables that represent the characteristics of the building and its surroundings, as well as the climatic conditions to which it is subjected. One of the variables of great influence on the thermal and energy performance of buildings is the temperature at the interface between the floor and the ground. The EnergyPlus software offers different methods for calculating the temperature of the ground beneath the building, which acts as a boundary condition for solving the surface heat balances. The particularities of each of these methods can significantly influence the simulation results. A same building can achieve different energy efficiency levels or different comfort indicators when simulated with each method. In this context, this paper aims to analyze the outside surface temperature of the floor obtained by the methods available in the EnergyPlus software and compare it to the temperatures measured in a social housing prototype. For this purpose, the interface temperature between the rooms floor and the ground was monitored during a one-year period, as well as the indoor and outdoor air temperatures. Based on the monitored temperatures, a computational model of the housing prototype was calibrated, and the RMSD obtained for one of the rooms was equal to 0.75°C. The calibrated computational model was validated for each month of analysis, with the highest RMSD obtained equal to 1.09°C, for May. Subsequently, the model was simulated using different ground heat transfer methods: *Slab* program; *GroundDomain:Slab* object, with the undisturbed ground temperature models *KusudaAchenbach*, *FiniteDifference* and *Xing*; and the *Foundation:Kiva* object. The results of the floor-ground interface temperatures and the operating air temperatures of the simulated rooms were compared to the monitored temperatures. The *GroundDomain:Slab* object, with the undisturbed ground temperature model *FiniteDifference* presented the closest behaviour to the one measured in the building, with annual RMSD equal to 0.59°C in the analysis of the operating air temperature, and 0.88°C in the analysis of the operating air temperature. Thus, it is considered appropriate to use the *GroundDomain:Slab* object using the *FiniteDifference* model in thermal and energy performance analysis of buildings by computer simulation. It is also important to consider the thermophysical properties of the ground, due to their great influence on the simulation results.

**Key-words:** Thermal and energy simulation. Calibration. *EnergyPlus*. Monitoring. *Slab*. *GroundDomain*. *Kiva*.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema da temperatura do solo não perturbado .....	22
Figura 2 - Domínio de solo considerado pelo programa <i>EnergyPlus</i> .....	32
Figura 3 - Condições de contorno da ferramenta <i>Kiva</i> .....	37
Figura 4 - Protótipo habitacional em estudo .....	55
Figura 5 - Planta baixa e corte da edificação .....	55
Figura 6 - (a) perfuração do piso; (b) piso perfurado .....	57
Figura 7 - Pisos perfurados nos ambientes: .....	57
Figura 8 - Sensores S-TMB-M006 .....	58
Figura 9 - Teste inicial para verificar discrepância entre os sensores para medição de temperatura do solo .....	59
Figura 10 - Esquema da instalação do sensor para medição da temperatura do solo .....	60
Figura 11 – (a) sensor S-TMB-M006 com haste para facilitar sua inserção sob o piso; (b) furo e tampa de EPS para isolamento; (c) sistema de monitoramento montado com registrador de dados HOBO U30 .....	61
Figura 12 - a) HOBO® U12-012; b) HOBO® U10-003 .....	64
Figura 13 - Detalhe do abrigo para monitoramento externo .....	65
Figura 14 - Medição da temperatura e umidade relativa do ar interno: (a) Sala; (b) Dormitório 1; (c) Dormitório 2. ....	66
Figura 15 - Localização dos equipamentos de medição na edificação .....	67
Figura 16 - Sensores utilizados nas medições .....	67
Figura 17 - Modelo computacional da edificação .....	69
Figura 18 - Distância entre o protótipo habitacional e a estação meteorológica automática do IAPAR .....	71
Figura 19 – (a) Fachada norte e oeste, dia 23/05/2020, 10h00; .....	72
Figura 20 - Configuração dos elementos da envoltória .....	73
Figura 21 - Representação esquemática do processo de calibração .....	78
Figura 22 - Processo de calibração do modelo computacional .....	82
Figura 23 - Resultados do monitoramento da temperatura da superfície externa do piso .....	100
Figura 24 - Temperaturas da superfície externa do piso e do ar externo .....	101
Figura 25 - Resultados da simulação do modelo computacional <i>v0</i> , para a	

sala/cozinha, dormitório 1 e dormitório 2, respectivamente.....	104
Figura 26 – Gráficos de temperaturas medidas e simuladas, dos ambientes monitorados, modelo <i>v0</i> .....	105
Figura 27 – Resultados da simulação do modelo computacional <i>v1</i> , para a sala/cozinha .....	106
Figura 28 - Resultados da simulação do modelo computacional <i>v2</i> , para a sala/cozinha .....	108
Figura 29 – Gráfico de temperaturas medidas e simuladas, da sala/cozinha, modelo <i>v2</i> .....	108
Figura 30 - Resultados da simulação do modelo computacional <i>v6</i> , para a sala/cozinha .....	110
Figura 31 - Gráfico de temperaturas medidas e simuladas, da sala/cozinha, modelo <i>v6</i> .....	110
Figura 32 - Resultados da calibração.....	111
Figura 33 - Resultados da validação preliminar do modelo calibrado para a sala/cozinha .....	113
Figura 34 - Gráfico de temperaturas medidas e simuladas, da sala/cozinha, na validação preliminar do modelo calibrado .....	114
Figura 35 - Temperaturas medidas e simuladas para a sala/cozinha, na etapa de validação final.....	116
Figura 36 – $RMSD_{m,a}$ calculada com as médias mensais da temperatura da superfície externa do piso .....	119
Figura 37 - Sala/cozinha: Médias mensais da temperatura da superfície externa do piso simulada e $RMSD_m$ calculada para os casos.....	119
Figura 38 - Dormitório 1: Temperatura da superfície externa do piso simulada e $RMSD_m$ calculada para os casos.....	121
Figura 39 - Dormitório 2: Temperatura da superfície externa do piso simulada e $RMSD_m$ calculada para os casos.....	122
Figura 40 - Resultados do caso <i>GroundHeatTransfer:Slab</i> comparados com a média das temperaturas medidas da superfície externa do piso dos ambientes e com a média das temperaturas simuladas pelos casos <i>GroundDomain</i>	124
Figura 41 - Sala/cozinha: Temperatura horária da superfície externa do piso .....	126
Figura 42 - Sala/cozinha: $RMSD$ calculadas com as temperaturas da superfície externa do piso em base horária .....	128

Figura 43 - Dormitório 1: RMSD calculadas com as temperaturas da superfície externa do piso em base horária .....	129
Figura 44 - Dormitório 2: RMSD calculadas com as temperaturas da superfície externa do piso em base horária .....	130
Figura 45 - Sala/cozinha: temperaturas do ar medidas e temperaturas operativas do ar simuladas pelos casos – Grupo 3 .....	131
Figura 46 - Temperaturas operativas do ar simuladas pelos casos para o mês de junho, para a sala/cozinha.....	132
Figura 47 - Temperaturas operativas do ar simuladas pelos casos para o mês de dezembro, para a sala/cozinha .....	133
Figura 48 - Sala/cozinha: RMSD calculadas para a temperatura operativa do ar simulada e a temperatura do ar interno medida em base horária .....	134
Figura 49 - Dormitório 1: RMSD calculadas para a temperatura operativa do ar simulada e a temperatura do ar interno medida em base horária .....	136
Figura 50 - Sala/cozinha: RMSD da temperatura da superfície externa do piso para o caso GD_FD simulado com diferentes propriedades termofísicas .....	139
Figura 51 - Sala/cozinha: RMSD da temperatura operativa do ar para o caso GD_FD simulado com diferentes propriedades termofísicas.....	141

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Erros dos sensores S-TMB-M006 .....	60
Tabela 2 - Propriedades dos registradores de dados.....	64
Tabela 3 - Propriedades termofísicas dos componentes das paredes, cobertura e piso.....	73
Tabela 4 - Propriedades termofísicas do solo .....	88
Tabela 5 - Dados de entrada do objeto <i>GroundDomain:Slab</i> .....	89
Tabela 6 - Dados de entrada do objeto <i>Foundation:Kiva:Settings</i> .....	90
Tabela 7 - Dados de entrada do objeto <i>GroundHeatTransfer:Slab:Materials</i> .....	92
Tabela 8 - Dados de entrada do objeto <i>GroundHeatTransfer:Slab:MatProps</i> .....	92
Tabela 9 - Dados de entrada do objeto <i>GroundHeatTransfer:Slab:BldgProps</i> .....	93
Tabela 10 - Dados de entrada do objeto <i>GroundHeatTransfer:Slab:EquivalentSlab</i>	94
Tabela 11 – Resultados do monitoramento da temperatura do solo .....	102
Tabela 12 - Resultados da Validação final .....	115
Tabela 13 - Temperatura média do ar interno inserida nas propriedades do caso <i>GroundHeatTransfer:Slab</i> no procedimento de convergência.....	125
Tabela 14 - RMSD <sub>m,a</sub> calculadas com diferentes propriedades termofísicas do solo .....	140

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Eventos da calibração entre 19/03/2020 e 23/04/2020 .....	75
--	----

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CA	Consumo relativo para aquecimento
DATec	Documento de Avaliação Técnica
E3sLab	Laboratório de Eficiência Energética e Sustentabilidade em Edificações
EPS	Poliestireno expandido
GHR	Graus-hora para resfriamento
IAPAR	Instituto Agrônômico do Paraná
INI-C	Instrução Normativa para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas
INI-R	Instrução Normativa para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Residenciais
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
RMSD	Raiz do erro quadrático médio
RTQ-R	Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais
UEL	Universidade Estadual de Londrina
UGT	Temperatura do solo não perturbado ( <i>undisturbed ground temperature</i> )

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
1.1	OBJETIVOS .....	18
1.1.1	Objetivos específicos .....	19
1.2	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	19
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>21</b>
2.1	TROCAS DE CALOR ENTRE A EDIFICAÇÃO E O SOLO .....	21
2.2	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL.....	27
2.2.1	Modelos integrados de temperatura do solo não perturbado (UGT) .....	29
2.2.1.1	Site:GroundTemperature:Undisturbed:FiniteDifference .....	29
2.2.1.2	Site:GroundTemperature:Undisturbed:KusudaAchenbach .....	30
2.2.1.3	Site:GroundTemperature:Undisturbed:Xing .....	31
2.2.2	Modelos de transferência de calor através do piso .....	31
2.2.2.1	Site:GroundTemperature:BuildingSurface.....	31
2.2.2.2	Site:GroundDomain:Slab.....	32
2.2.2.3	Site:GroundDomain:Basement.....	33
2.2.2.4	Programa <i>Slab</i> .....	34
2.2.2.5	Programa <i>Basement</i> .....	35
2.2.2.6	Foundation:Kiva .....	36
2.3	INFLUÊNCIA DOS MÉTODOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR ATRAVÉS DO SOLO NOS ESTUDOS DE DESEMPENHO TERMOENERGÉTICO DE EDIFICAÇÕES.....	38
<b>3</b>	<b>PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS .....</b>	<b>52</b>
3.1	MODELO DA EDIFICAÇÃO.....	54
3.2	MONITORAMENTO DA TEMPERATURA DA INTERFACE ENTRE PISO E SOLO .....	56
3.3	CALIBRAÇÃO DO MODELO COMPUTACIONAL .....	61
3.3.1	Medições.....	63
3.3.2	Simulações Computacionais .....	68
3.3.2.1	Configuração do caso base para a calibração do modelo principal .....	68
3.3.2.2	Critério de calibração e validação dos modelos .....	75
3.3.2.3	Etapas da calibração.....	78
3.3.2.4	Validação preliminar do modelo calibrado.....	83
3.3.2.5	Validação final.....	84

3.4	ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS MÉTODOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR ATRAVÉS DO SOLO E MEDIÇÕES.....	85
3.4.1	Modelos de transferência de calor através do solo .....	86
3.4.1.1	Propriedades termofísicas do solo utilizadas na simulação .....	87
3.4.1.2	Configuração dos casos <i>GroundDomain:Slab</i> .....	88
3.4.1.3	Configuração do caso com o objeto <i>Foundation:Kiva</i> .....	90
3.4.1.4	Configuração do caso com o objeto <i>GroundHeatTransfer:Slab</i> .....	91
3.4.2	Comparação das temperaturas do solo simuladas .....	94
3.4.2.1	Grupo 1: Análise das médias mensais da temperatura do solo .....	95
3.4.2.2	Grupo 2: Análise da temperatura do solo em base horária .....	96
3.4.2.3	Grupo 3: Análise da temperatura operativa do ar simulada .....	97
3.4.2.4	Verificação da influência das propriedades termofísicas do solo .....	99
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>100</b>
4.1	MONITORAMENTO DA TEMPERATURA DA INTERFACE ENTRE PISO E SOLO .....	100
4.2	CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO COMPUTACIONAL .....	102
4.2.1	Calibração .....	102
4.2.2	Validação preliminar do modelo computacional calibrado.....	111
4.2.3	Validação final .....	114
4.3	ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS MÉTODOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR ATRAVÉS DO SOLO E MEDIÇÕES.....	117
4.3.1	Grupo 1: Análise das médias mensais da temperatura do solo .....	118
4.3.2	Grupo 2: Análise da temperatura do solo em base horária .....	126
4.3.3	Grupo 3: Análise da temperatura operativa do ar simulada .....	130
4.3.4	Influência das propriedades termofísicas do solo.....	138
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>143</b>
5.1	LIMITAÇÕES.....	145
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	146
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>147</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O setor da construção civil, apesar de ser fundamental para o desenvolvimento econômico do país, causa impactos ambientais consideráveis. Além do grande impacto ambiental na produção e extração de matérias primas e na etapa de construção de um edifício, ao longo do ciclo de vida útil há ainda os impactos decorrentes da etapa de uso e manutenção do empreendimento, dentre os quais se destaca o consumo de energia elétrica. Em 2019, o setor de edificações foi responsável por 52% do consumo final de energia elétrica no Brasil. Além disso, o consumo final de eletricidade no país cresceu 1,3% em relação ao ano anterior, sendo que o setor residencial apresentou o segundo maior aumento entre os setores, tendo sido responsável por 26,1% do crescimento total (BRASIL, 2020).

A eficiência energética está relacionada com a capacidade da edificação em proporcionar conforto ao usuário com o menor consumo de energia possível (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014), e foi incorporada pelo Ministério de Minas e Energia como estratégia de atendimento da crescente demanda a longo prazo. Dentro dessa estratégia, planeja-se que o setor residencial contribua com 27% da economia de energia prevista por meio do ganho de eficiência até o ano de 2050 (BRASIL, 2018). O Brasil possui como ferramenta para avaliar o desempenho energético de edificações residenciais uma regulamentação específica: a Instrução Normativa para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (INI-R) (CB3E, 2020). Dentre os métodos definidos pela INI-R para a avaliação do consumo energético de edificações, destaca-se o método da simulação.

A simulação computacional permite a análise de uma edificação quanto ao seu desempenho termoenergético considerando diferentes parâmetros, como propriedades térmicas do envelope, características das aberturas e o contato das superfícies com o meio exterior (SILVA; GHISI, 2014). Por meio dela, o desempenho da envoltória dos ambientes de permanência prolongada pode ser avaliado quanto ao consumo energético e quanto ao percentual de horas ocupadas em conforto térmico na condição em que a edificação é ventilada naturalmente (CB3E, 2020).

Por meio de pesquisas relacionadas ao desempenho termoenergético de edificações, diversos avanços foram obtidos, especialmente quanto ao entendimento das trocas de calor entre a edificação e o meio externo através de sua

envoltória (KRARTI; IHM, 2009; SPIGA; VOCALE, 2014). Entretanto, em uma análise do balanço térmico total, a parcela das trocas de calor entre a edificação e o solo ainda é pouco compreendida e muitas vezes simplificada, embora seja bastante significativa na carga térmica calculada para edificações térreas (ANDOLSUN *et al.*, 2011; LIBRALATO; DE ANGELIS; SARO, 2019; SPIGA; VOCALE, 2014). Além disso, os parâmetros relativos à transferência de calor entre edificação e solo através do piso estão entre os que apresentam maior influência na determinação da eficiência energética em edificações (ALMEIDA, 2014; ZARA, 2019) e são responsáveis por grande parte da incerteza encontrada nos indicadores de conforto obtidos por meio de simulação computacional (SILVA; ALMEIDA; GHISI, 2017).

O *EnergyPlus* é um programa amplamente utilizado nos estudos de desempenho termoenergético de edificações. Em seu funcionamento, o *EnergyPlus* soluciona os balanços térmicos relativos aos fluxos de calor através das superfícies por meio de um algoritmo matemático que gera funções unidimensionais de transferência condutiva (KRARTI; IHM, 2009). Para superfícies horizontais em contato com o solo, o programa necessita do valor das temperaturas do solo abaixo da edificação, que servem como condição de contorno para a resolução dos balanços térmicos dos fluxos de calor.

O *EnergyPlus* possibilita ao usuário diferentes maneiras de considerar as temperaturas do solo abaixo da edificação. Estudos relacionados à simulação computacional de edificações com diversos enfoques utilizaram o programa *Slab* para determinar a temperatura da interface entre edificação e solo (COSTA; RORIZ; CHVATAL, 2017; LARSEN, 2011; MATEUS; PINTO; GRAÇA, 2014; NUNES *et al.*, 2019; OLIVEIRA *et al.*, 2012), ferramenta implementada no programa que usa diferenças finitas implícitas para encontrar as temperaturas do domínio de solo abaixo da edificação.

Também é possível encontrar na literatura estudos que utilizam o objeto *GroundDomain:Slab*, que utiliza modelos de temperaturas do solo não perturbado para calcular as trocas de calor entre edificação e solo (ELI *et al.*, 2019; NUNES *et al.*, 2019; RESENDE; SOUZA; GOMES, 2019; ZARA, 2019). O programa fornece três opções distintas de modelos: *Finite Difference*, que utiliza um modelo unidimensional de diferenças finitas implícitas; *KusudaAchenbach*, baseado na correlação desenvolvida por Kusuda e Achenbach (1965); e *Xing*, baseado na correlação desenvolvida por Xing (2014) (U.S. DEPARTMENT..., 2020c).

Por fim, há ainda a possibilidade de utilizar o objeto *Foundation:Kiva*, que realiza cálculos de transferência de calor bidimensional por meio de soluções de diferenças finitas (U.S. DEPARTMENT..., 2020b). *Kiva*<sup>TM</sup> é uma ferramenta desenvolvida por Kruis (2015) e verificada em Kruis e Krarti (2015) que, integrada ao *EnergyPlus*, utiliza algoritmos de balanço térmico específicos para diferentes configurações de elementos de fundação de uma edificação.

As particularidades e simplificações embutidas em cada método de determinação da temperatura do solo abaixo da edificação podem influenciar no nível de eficiência energética (NUNES *et al.*, 2019) e nos indicadores de conforto obtidos para uma mesma edificação (COSTA; RORIZ; CHVATAL, 2017; OLIVEIRA *et al.*, 2012). Ao variar os métodos de transferência de calor através do solo, Nunes *et al.* (2019) encontraram grandes diferenças nos indicadores obtidos, ao ponto de uma mesma edificação obter diferentes níveis de eficiência energética a depender do método utilizado. Oliveira *et al.* (2012) encontraram diferenças nos índices de conforto térmico obtidos ao variar o método de consideração do contato da edificação com o solo na simulação. Costa, Roriz e Chvatal (2017) encontraram, entre outros resultados, uma redução de 55,2% no número de horas de desconforto durante um ano com a alteração do método de transferência de calor através do solo adotado na simulação de uma edificação naturalmente ventilada. Por sua vez, Resende, Souza e Gomes (2019) obtiveram, ao variar o método de transferência de calor entre edificação e solo, nível de desempenho mínimo e máximo estabelecidos pela NBR 15575 (ABNT, 2013) para um mesmo ambiente.

Dessa maneira, faz-se fundamental um estudo aprofundado que seja capaz de determinar qual dos métodos de transferência de calor através do solo disponíveis no *EnergyPlus* é o mais adequado para análises de desempenho termoenergético de edificações.

## 1.1 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é determinar qual dos diferentes métodos de transferência de calor entre edificação e solo disponíveis no programa *EnergyPlus* é o mais indicado para a realização de simulações termoenergéticas de edificações térreas, submetidas a um clima com grande amplitude térmica.

### 1.1.1 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Calibrar o modelo computacional do protótipo habitacional instalado no campus da Universidade Estadual de Londrina, para pesquisas em eficiência energética em edificações.
- Validar o modelo computacional calibrado para o período de um ano.
- Levantar os diferentes métodos de transferência de calor entre edificação e solo disponíveis no programa *EnergyPlus*.
- Comparar as temperaturas da interface entre edificação e solo simuladas com as temperaturas medidas na edificação.
- Analisar a influência das propriedades termofísicas do solo na temperatura da superfície externa do piso e na temperatura do ar interno simuladas pelo modelo computacional calibrado e validado.

## 1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está estruturado em cinco capítulos. No primeiro capítulo, foi apresentada uma breve contextualização sobre o tema em estudo e os objetivos buscados com a realização da pesquisa.

O segundo capítulo apresenta a revisão de literatura sobre o assunto, e está dividido em três partes principais. Na primeira, é feita uma abordagem sobre as trocas de calor entre edificação e solo, com detalhes relativos à transferência de calor através da estrutura do solo e sobre particularidades da interação entre as superfícies da edificação e o solo. Na segunda parte apresenta-se como as trocas de calor entre a edificação e o solo são consideradas em simulações computacionais de desempenho termoenergético de edificações. Por fim, na terceira parte são apresentados alguns estudos que demonstram a influência da utilização de diferentes métodos de consideração da transferência de calor entre edificação e solo no resultado de estudos de desempenho termoenergético de edificações.

No terceiro capítulo são apresentados os procedimentos metodológicos adotados para cumprir com os objetivos do trabalho. Este capítulo está dividido em quatro partes. Na primeira, a modelagem computacional da edificação em estudo é detalhada. Em seguida, são apresentados os detalhes do monitoramento da temperatura da superfície externa do piso realizado na edificação. Na terceira parte são detalhadas as etapas realizadas para a calibração do modelo computacional. Na quarta parte, são apresentados os procedimentos para comparação dos diferentes métodos de transferência de calor entre edificação e solo a fim de determinar qual melhor representa as condições reais monitoradas na edificação.

No quarto capítulo são apresentados os resultados da pesquisa. A primeira parte deste capítulo traz os resultados obtidos com o monitoramento da temperatura do solo durante todo o período em análise. A segunda parte apresenta os resultados obtidos com a calibração e validação do modelo computacional. A terceira parte aborda os resultados da simulação do modelo computacional com a utilização de cada um dos métodos de transferência de calor através do solo analisados.

O quinto capítulo traz as conclusões obtidas com o presente estudo, abordando os resultados obtidos, as limitações da pesquisa e sugestões para futuras pesquisas.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

Este capítulo traz um breve delineamento sobre os assuntos abordados neste estudo.

### 2.1 TROCAS DE CALOR ENTRE A EDIFICAÇÃO E O SOLO

O solo possui, dentre outras propriedades, a de transmitir energia térmica através de sua estrutura. De acordo com Kusuda e Achenbach (1965), a temperatura do solo é afetada por fatores geográficos, por características locais e por características do solo, que são suas propriedades físicas e térmicas. As propriedades térmicas do solo dependem, dentre outras variáveis, da sua densidade, do tamanho das partículas sólidas e da sua saturação. O tipo de solo, o tamanho de partículas e a densidade variam de acordo com a localização e, em algumas localizações, variam inclusive de acordo com a profundidade. Já a saturação varia de acordo com a localização, com a profundidade e com o período do ano (KISSOCK; SELVACANABADY; RAGHAVAN, 2013).

Algumas propriedades térmicas são importantes para o entendimento da transferência de calor na estrutura do solo, como a difusividade (RAO; SILVA; MOREIRA, 2005), a umidade (DOS SANTOS; MENDES, 2006; JANSSEN; CARMELIET; HENS, 2004) e a condutividade (KRARTI, 1996; ROCK, 2004). Entretanto, a determinação de tais propriedades é complexa, devido às características peculiares encontradas em cada região e período de análise, o que pode dificultar o entendimento do comportamento térmico do solo.

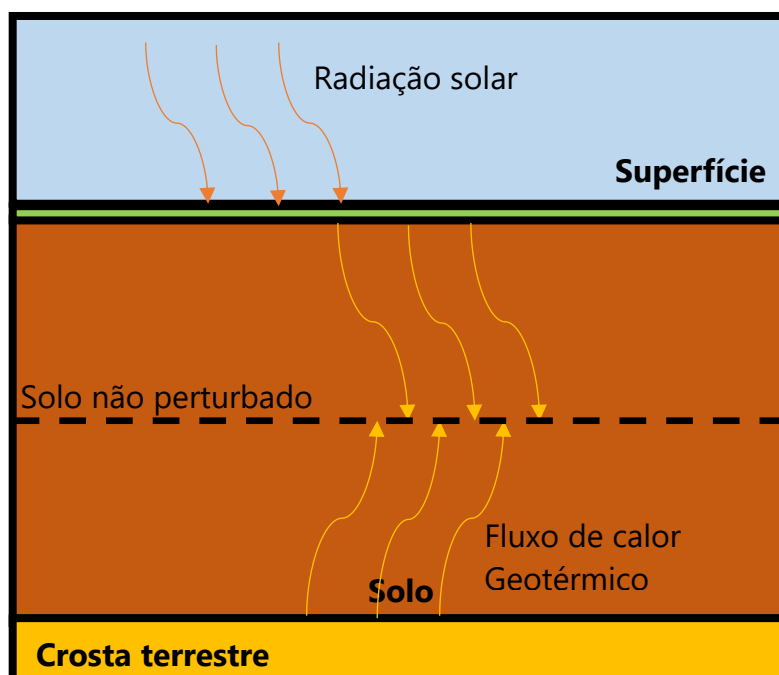
O comportamento térmico do solo influencia na transmissão de calor em sua estrutura. De acordo com Rao, Silva e Moreira (2005), embora complexo, o comportamento térmico do solo pode ser delineado por meio de propriedades como difusividade e condutividade térmica. Essas propriedades podem ser extraídas a partir de observações de temperatura ao longo do tempo, em diferentes profundidades do solo (RAO; SILVA; MOREIRA, 2005).

A transmissão de calor no solo pode acontecer, basicamente, por quatro mecanismos distintos. Estes mecanismos são a condução, a convecção, a radiação e a evaporação ou condensação, e podem atuar de forma isolada ou simultânea

(MACIEL NETO, 2011). A temperatura do solo é, então, uma função da energia solar transferida por radiação, convecção e condução através da estrutura do solo.

A superfície do solo exposta à radiação solar sofre a influência da energia proveniente desta radiação até uma certa profundidade. Conforme a profundidade aumenta, a influência dos fenômenos da superfície passa a ser menor. Conseqüentemente, a amplitude da temperatura do solo diminui progressivamente, até uma determinada profundidade em que se aproxima de  $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$  (KUREVIJA; VULIN; KRAPEC, 2011). À temperatura obtida nesta profundidade dá-se o nome de temperatura do solo não perturbado (UGT)<sup>1</sup>. Kurevija, Vulin e Krapec (2011) apontam que a UGT representa a temperatura encontrada na profundidade em que existe equilíbrio entre a influência da radiação solar proveniente da superfície do solo e a influência do fluxo de calor geotérmico proveniente da crosta terrestre, como esquematizado na Figura 1.

Figura 1 - Esquema da temperatura do solo não perturbado



Fonte: baseado em Kurevija, Vulin e Krapec (2011)

<sup>1</sup> Temperatura do solo não perturbado: tradução livre para *undisturbed ground temperature*. A sigla UGT é utilizada no estudo de Gwadera, Larwa e Kupiec (2017) para se referir a *undisturbed ground temperature*, e será adotada neste trabalho.

Esta definição se diferencia da utilizada por Resende, Souza e Gomes (2019), que consideram a UGT como temperaturas não perturbadas do solo, que representariam as temperaturas caso o solo não estivesse sob a influência de algo como, por exemplo, uma edificação. Costa (2017), por sua vez, considera que o solo denominado imperturbado é aquele que está em condições normais, sem influência de edificações ou outros agentes.

Em situações sem a interferência antropogênica, o solo troca calor naturalmente com a superfície por meio dos mecanismos de condução, convecção, radiação e evapotranspiração. Essa troca é influenciada por fatores como cobertura do solo, incidência de radiação solar, ventos, entre outros. Entretanto, com a inserção de uma edificação sobre sua superfície, o regime térmico do solo é alterado, e pode levar anos para que essa alteração modifique o perfil de temperaturas do solo (U.S. DEPARTMENT..., 2020a). Em relação à edificação, o solo não deve ser considerado como um isolante térmico, devido à sua alta condutividade térmica quando comparada com materiais de isolamento comumente utilizados nas construções (ALKAFF; SIM; EFZAN, 2016). Dessa maneira, o solo passa a trocar calor diretamente com a edificação que, por sua vez, troca calor com o solo (através do piso), e com a atmosfera (através da envoltória).

A troca de calor através do piso em edificações se dá pela diferença entre as temperaturas interna e externa, e depende da condutividade térmica do solo, da capacidade térmica, da geometria do piso, e da presença de isolamento térmico entre o piso da edificação e o solo (KISSOCK; SELVACANABADY; RAGHAVAN, 2013). O solo funciona como um regulador térmico para a edificação, ao amenizar as quedas de temperatura no período frio, e ao dissipar o calor no período quente. Em geral, a temperatura do solo é mais baixa que o ar interno do ambiente no verão, e mais alta no inverno (ALKAFF; SIM; EFZAN, 2016).

Assim como a determinação das propriedades térmicas do solo e a análise da transmissão de calor em sua estrutura é complexa, as trocas de calor entre a edificação e o solo através do piso também o são, pois envolvem variáveis relacionadas tanto ao solo quanto à edificação e seu entorno.

Em relação ao solo, Krarti (1996) observou que não somente a variação das propriedades do solo abaixo da edificação afeta os padrões de transferência de calor, mas também a variação das propriedades no seu entorno. A umidade do solo é determinante na sua condutividade térmica (DERU, 2003). A superfície do piso em

contato com o solo perde calor por condução em quantidade significativa, e esta perda é intensificada caso o solo esteja úmido, uma vez que a condutividade térmica aumenta conforme os poros do solo são preenchidos com água (REMPEL; REMPEL, 2013).

Em relação à edificação, vários fatores podem influenciar na transferência de calor entre piso e solo, como a geometria e constituição do piso, por exemplo. Spiga e Vocale (2014) demonstraram que a geometria do piso influencia significativamente na determinação do coeficiente de transferência de calor. Baglivo e Congedo (2019), ao propor uma metodologia para projetar lajes de piso sobre o solo, concluem que a transmitância térmica do piso é muito importante para reduzir o superaquecimento em ambientes internos de edificações situadas em climas quentes.

Ao longo do tempo, vários pesquisadores se dedicaram a compreender e descrever tal fenômeno. Diferentes algoritmos e métodos de cálculo foram desenvolvidos e aperfeiçoados para estimar a transferência de calor entre o piso de uma edificação e o solo sobre o qual ela se encontra. Mihalakakou *et al.* (1995) apontam que os variados métodos desenvolvidos possuem aplicabilidade limitada, pois envolvem a simplificação, em algum nível, da transferência de calor entre solo e edificação. Ainda assim, mostram-se ferramentas importantes para a análise do fenômeno.

Os modelos desenvolvidos para analisar tal fenômeno são baseados em soluções analíticas ou métodos numéricos (AL-ANZI; KRARTI, 2003; MIHALAKAKOU *et al.*, 1995). Em geral, os métodos analíticos se limitam a configurações simplificadas de piso, enquanto os métodos numéricos permitem configurações de piso mais realistas, embora exijam maior capacidade computacional (AL-ANZI; KRARTI, 2003).

De acordo com Deru (2003), o primeiro modelo analítico para a transferência de calor entre solo e edificação através do piso a ser amplamente reconhecido foi o de Macey (1949). Este modelo trata o fenômeno de maneira bidimensional, e considera o problema a partir de um piso infinito com fatores de correção para pisos retangulares e espessuras de paredes (DERU, 2003).

Wang (1979) aponta que, para a maioria dos cálculos de troca de calor em uma edificação, assumia-se que o fenômeno ocorria de maneira unidimensional, o que, na maioria dos casos, apresentava suficiente precisão. Entretanto, para algumas situações específicas, como no caso do perímetro de pisos de edificações em contato com o solo, a abordagem necessitava ser bidimensional. Wang (1979)

propôs um modelo simplificado para estimar a condução de calor bidimensional através do piso, bem como coeficientes para estimar a perda de calor, que foram amplamente utilizados em diversos estudos. Rock e Ochs (2001) revisaram o estudo de Wang (1979) e determinaram coeficientes de perda de calor para o solo para uma construção em *wood-frame* com diferentes geometrias e variadas composições de piso.

Kusuda e Achenbach (1965) analisaram dados de temperatura do solo de 63 estações localizadas em 50 diferentes locais dos Estados Unidos, e ciclos anuais das temperaturas médias do solo foram utilizados a fim de encontrar correlações com suas médias anuais, amplitudes, ângulos de fase e difusividades térmicas.

Os autores descobriram que uma teoria simplificada de condução térmica baseada na representação da temperatura do solo como distribuição harmônica simples resulta em uma aproximação aceitável da temperatura média mensal do solo em diferentes profundidades (KUSUDA; ACHENBACH, 1965). Por meio da equação desenvolvida por Kusuda e Achenbach (1965), pode-se calcular a temperatura média mensal do solo em um determinado ponto desde que sejam conhecidos a média anual da temperatura do solo, a amplitude e o ângulo de fase da temperatura superficial do solo e sua difusividade térmica. A Equação 1 demonstra a correlação desenvolvida por Kusuda e Achenbach (1965), como apresentada no manual de referência de engenharia do *EnergyPlus* (U.S. DEPARTMENT..., 2020b).

$$T(z, t) = \bar{T}_s - \Delta T_s \cdot e^{-z \cdot \sqrt{\frac{\pi}{\alpha \tau}}} \cdot \cos\left(\frac{2\pi t}{\tau} - \theta\right) \quad (1)$$

Onde:

$T(z, t)$  é a temperatura do solo não perturbado, como uma função do tempo e profundidade;

$\bar{T}_s$  é a temperatura média anual da superfície do solo, em °C;

$\Delta T_s$  é a amplitude térmica do solo durante o ano, em °C;

$\theta$  é a mudança de fase<sup>2</sup> da equação, ou dia de temperatura superficial mínima;

$\alpha$  é a difusividade térmica do solo;

---

<sup>2</sup> A mudança de fase ou *phase shift* está relacionada ao dia em que ocorre a mínima temperatura superficial do solo.

$\tau$  é a constante do tempo, 365.

Em seu estudo, Bahnfleth (1989) utilizou um modelo tridimensional detalhado de uma laje de piso para gerar mais de 90 simulações anuais divididas em grupos paramétricos com o objetivo de analisar os efeitos da forma e tamanho do piso, das propriedades do solo, das condições de contorno, do clima, do isolamento térmico e do sombreamento da edificação. Os resultados mostraram que as propriedades do solo, como sua condutividade térmica e condições de superfície, bem como a forma e dimensão da laje de piso, são elementos essenciais na alteração da taxa de transferência de calor (BAHNFLETH, 1989).

Mihalakakou *et al.* (1995) desenvolveram um modelo para calcular o fluxo de calor para o solo, bem como a temperatura do solo abaixo do edifício em diferentes profundidades. Em seu estudo, o solo foi considerado homogêneo, a temperatura interna constante e a temperatura externa com grande variação temporal. O modelo envolve a solução da equação transiente e tridimensional de condução de calor de Carslaw e Jaeger (1959) e foi validado por meio de comparação com valores medidos (MIHALAKAKOU *et al.*, 1995).

Em seu trabalho, Chen (2013) também propôs um modelo tridimensional para calcular a transferência dinâmica de calor através do piso. Chen (2013) partiu de soluções analíticas bidimensionais para encontrar equações aproximadas de transferência de calor que foram verificadas por comparações com casos teste IEA BESTEST (NEYMARK *et al.*, 2008).

Choi e Krarti (1998) analisaram de maneira numérica a situação de edificações situadas próximas a declives em terrenos de topografia irregular para verificar a influência da modificação da topografia na transmissão de calor da edificação para o solo. Os autores concluíram que a perda total de calor através do piso é afetada principalmente pelas condições das superfícies que estão em contato direto com a fundação.

No trabalho de Kissock, Selvacanabady e Raghavan (2013) encontra-se um método simplificado para determinar uma equação de transferência de calor através do piso em edificações, que considera o solo como um meio capaz de armazenar energia térmica. A equação desenvolvida por Kissock, Selvacanabady e Raghavan (2013) depende da área do piso, do tipo de isolamento térmico, da temperatura do ar interno e da temperatura efetiva do solo. A temperatura efetiva do

solo formulada pelos autores foi uma função atrasada e suavizada da temperatura do ar externo, e se mostrou condizente com a equação desenvolvida por Kusuda e Achenbach (1965).

Xing (2014) desenvolveu uma pesquisa com objetivo de determinar um novo conjunto de dados de temperatura do solo de um ano típico, para aplicações de engenharia, a partir de um modelo simplificado. Para isso, desenvolveu um modelo numérico unidimensional de diferenças explícitas para gerar coeficientes que pudessem ser usados em um modelo simplificado. O modelo simplificado e o modelo numérico foram validados por meio da medição da temperatura do solo em diferentes localidades geográficas (XING, 2014). O modelo desenvolvido por Xing (2014) utiliza como variáveis de entrada os dados climáticos, e implementa na superfície do solo um balanço térmico que inclui radiação solar, convecção, radiação e condução para calcular a temperatura do solo sob diferentes tipos de cobertura.

Existem inúmeras outras pesquisas importantes não citadas nessa revisão e que foram realizadas com o objetivo de compreender e prever o fenômeno de transmissão de calor através do solo, suas variáveis e parâmetros influentes. Isso demonstra o grau de complexidade do tema, bem como os esforços que vêm sendo feitos na comunidade científica para solucionar os problemas existentes.

A seguir, será apresentado como a transferência de calor entre edificação e piso é abordada em simulações computacionais.

## 2.2 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Como visto anteriormente, a transmissão de calor entre edificação e solo através do piso foi assunto de diversas pesquisas, nas quais diferentes modelos foram propostos, cada um com suas particularidades e limitações. Alguns desses modelos foram incorporados em diferentes ferramentas computacionais que calculam os balanços térmicos em edificações por meio de simulações.

As simulações computacionais permitem a análise global do desempenho termoenergético de edificações. Por meio delas, é possível modelar uma edificação de acordo com suas características geométricas, orientação e especificar materiais que constituem seu envelope. Além disso, pode-se inserir variáveis que

representam as condições de entorno, dentre elas a forma de contato da edificação com o solo.

Existem diferentes programas que realizam simulações termoenergéticas de edificações e que utilizam diferentes modelos para resolver o problema da transferência de calor entre os ambientes da edificação e o solo através do piso. O programa *EnergyPlus*, desenvolvido pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos, é um programa gratuito utilizado para modelagem e simulação do comportamento termoenergético de edificações e de seus sistemas integrados. No Brasil, o *EnergyPlus* é amplamente aplicado em estudos de desempenho termoenergético de edificações, uma vez que atende às características básicas exigidas pelo Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (RTQ-R) (INMETRO, 2012), pela Instrução Normativa do Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (INI-R) (CB3E, 2020) e pela Instrução Normativa para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas (INI-C) (INMETRO, 2021).

No *EnergyPlus*, a modelagem do contato da edificação com o solo pode ser realizada de diferentes formas. Em todos os casos, é recomendado pelos manuais de referência de variáveis de entrada e saída (U.S. DEPARTMENT..., 2020c) e dos programas auxiliares (U.S. DEPARTMENT..., 2020a) que não sejam utilizadas as temperaturas do solo encontradas em arquivos climáticos. De acordo com os documentos, essas temperaturas são muito extremas para o solo abaixo de uma edificação condicionada artificialmente, especialmente no caso de edificações residenciais e edifícios de pequeno porte. Sendo assim, para uma análise mais precisa do modelo simulado, é recomendado que sejam especificadas temperaturas do solo apropriadas.

O *EnergyPlus* possui diferentes maneiras para consideração das trocas de calor através das superfícies da edificação que se encontram em contato com o solo. Pode-se inserir diretamente os valores de temperatura em médias mensais, utilizar modelos matemáticos e correlações embutidas no próprio programa ou utilizar programas auxiliares para determinar temperaturas do solo abaixo da edificação.

A seguir, uma breve explicação sobre alguns dos métodos será apresentada.

### 2.2.1 Modelos integrados de temperatura do solo não perturbado (UGT)

O programa *EnergyPlus* possui diferentes modelos integrados à sua estrutura que calculam a temperatura do solo não perturbado (UGT) por meio da inserção de diferentes parâmetros. Como explicado anteriormente, a UGT é a temperatura encontrada em uma profundidade tal onde existe equilíbrio entre a influência da radiação solar proveniente da superfície do solo e a influência do fluxo de calor geotérmico proveniente da crosta terrestre (KUREVIJA; VULIN; KRAPEC, 2011).

A UGT é utilizada pelos modelos de transferência de calor do programa para calcular perfis de temperatura no domínio de solo e determinar as temperaturas do solo que são utilizadas como condição de contorno nos balanços térmicos das superfícies da edificação que possuem contato com o solo. A seguir, apresentam-se os modelos de determinação da UGT disponíveis no programa.

#### 2.2.1.1 Site:GroundTemperature:Undisturbed:FiniteDifference

Este objeto do *EnergyPlus* utiliza um modelo unidimensional de diferenças finitas de transferência de calor (U.S. DEPARTMENT..., 2020c). A base utilizada para o modelo foi obtida em Xing (2014), e os métodos numéricos foram adaptados de Lee (2013) (U.S. DEPARTMENT..., 2020b). Por meio deste modelo, o programa utiliza o arquivo climático do local analisado para obter as condições de contorno das superfícies da edificação, como médias diárias de radiação solar global, temperatura e umidade relativa do ar, e velocidade do vento (U.S. DEPARTMENT..., 2020b).

Quando se utiliza este objeto, o modelo computacional da edificação passa por um processo de inicialização, em que uma simulação anual com intervalos de cálculo diários é feita até que o perfil anual de temperaturas do solo atinja um comportamento periódico consistente (U.S. DEPARTMENT..., 2020c). A simulação prossegue, então, com a utilização das temperaturas do solo obtidas no processo de inicialização como condição de contorno para as superfícies externas da edificação que estejam em contato com o solo (U.S. DEPARTMENT..., 2020b).

A utilização deste objeto permite ao usuário inserir valores referentes às características do solo sobre o qual a edificação está situada, como condutividade térmica, densidade, calor específico e umidade (U.S. DEPARTMENT..., 2020c). Além disso, pode-se considerar a evapotranspiração da cobertura do solo no entorno do edifício, a partir do que é descrito em Allen *et al.* (2005) (U.S. DEPARTMENT..., 2020b). Em seu trabalho, Allen *et al.* (2005) realizam a padronização da equação de evapotranspiração de referência.

O modelo não permite a consideração dos efeitos de alguns parâmetros relativos ao entorno, como cobertura vegetativa, escoamento superficial, cobertura por neve, transporte de umidade pelo solo, e fluxo de águas subterrâneas (U.S. DEPARTMENT..., 2020b).

#### 2.2.1.2 Site:GroundTemperature:Undisturbed:KusudaAchenbach

Este objeto do *EnergyPlus* utiliza a correlação desenvolvida por Kusuda e Achenbach (1965) para fornecer temperaturas do solo não perturbado (UGT) (U.S. DEPARTMENT..., 2020b). A correlação utilizada por este objeto considera a temperatura do solo como função da profundidade e do tempo e depende de três parâmetros de entrada relacionados à temperatura do solo na superfície: temperatura média do solo, diferença média entre as temperaturas máxima e mínima do solo (amplitude), e a mudança de fase (U.S. DEPARTMENT..., 2020c).

Caso o usuário não insira os três parâmetros necessários para a correlação de Kusuda e Achenbach (1965), há a opção de gerá-los automaticamente por meio da inserção de temperaturas da superfície do solo no objeto *Site:GroundTemperature:Shallow* (U.S. DEPARTMENT..., 2020c) ou por meio de um programa auxiliar chamado *CalcSoilTemp* (U.S. DEPARTMENT..., 2020a). Estas duas opções são utilizadas para edificações que utilizam sistema de trocador de calor acoplado ao solo, em que o perfil de temperatura do solo é importante para a correta simulação do comportamento do sistema.

Para a utilização deste objeto é necessário inserir alguns parâmetros referentes às propriedades do solo, como condutividade térmica, densidade e calor específico (U.S. DEPARTMENT..., 2020c).

### 2.2.1.3 Site:GroundTemperature:Undisturbed:Xing

Este objeto utiliza a correlação desenvolvida por Xing (2014) para determinar temperaturas do solo não perturbado. A correlação utiliza parâmetros que foram desenvolvidos a partir da criação e validação de um modelo numérico de diferenças finitas que utilizou arquivos climáticos como condição de contorno (U.S. DEPARTMENT..., 2020b; XING, 2014).

## 2.2.2 Modelos de transferência de calor através do piso

Como mencionado, o *EnergyPlus* permite que o usuário insira diretamente temperaturas médias mensais do solo para realizar o cálculo da transferência de calor através do piso. Além disso, o programa pode calcular estas temperaturas, com auxílio dos modelos de UGT, para utilizá-las no balanço térmico das superfícies da edificação acopladas ao solo. Uma terceira opção é a utilização de programas auxiliares que calculam perfis de temperaturas para as superfícies externas dos pisos das edificações, ou seja, das superfícies que estão em contato com o solo. A seguir, algumas opções serão apresentadas.

### 2.2.2.1 Site:GroundTemperature:BuildingSurface

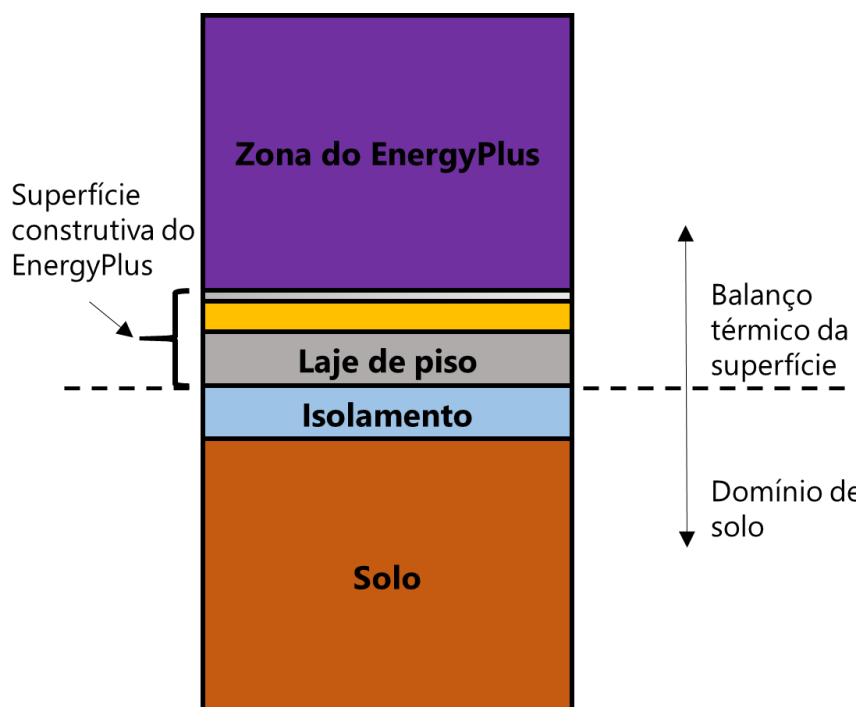
*Site:GroundTemperature:BuildingSurface* é um objeto do *EnergyPlus* que permite a inserção de valores de temperatura média mensal do solo. Os valores definidos para essa variável são entendidos pelo programa como temperatura das superfícies externas cuja condição de contorno seja o contato com o solo (U.S. DEPARTMENT..., 2020c).

Estas temperaturas são utilizadas pelo programa para simular a transferência de calor através do piso da edificação. O *Site:GroundTemperature:BuildingSurface* deve ser utilizado quando se dispõe de valores confiáveis de temperatura do solo logo abaixo da edificação ou, de preferência, valores medidos.

## 2.2.2.2 Site:GroundDomain:Slab

O objeto *Site:GroundDomain:Slab* possui um modelo geral de diferenças finitas que simula a transferência de calor que ocorre nas superfícies horizontais da edificação em contato com o solo (U.S. DEPARTMENT..., 2020c). Para isso, o programa considera que as zonas térmicas das edificações e suas respectivas superfícies trocam calor com um domínio de solo<sup>3</sup>, conforme pode ser observado na Figura 2.

Figura 2 - Domínio de solo considerado pelo programa *EnergyPlus*



Fonte: adaptado de U.S. Department... (2020b).

O modelo permite simular a transferência de calor em superfícies horizontais através do domínio de solo que interage com as zonas térmicas modeladas para a edificação (U.S. DEPARTMENT..., 2020b). Além disso, o modelo permite considerar diferentes configurações de disposição da laje de piso em relação ao nível do solo (U.S. DEPARTMENT..., 2020c).

<sup>3</sup> Tradução livre para *ground domain*, que representa a porção de solo e elementos de isolamento térmico presentes abaixo da superfície construtiva de uma zona térmica e que exercem influência em seu balanço térmico.

A utilização deste objeto demanda a inserção de alguns parâmetros relativos ao solo, como profundidade e largura do domínio de solo que será considerado na edificação (U.S. DEPARTMENT..., 2020c). Além disso, devem ser inseridas as propriedades do solo, como condutividade térmica, densidade, calor específico, parâmetros relativos à umidade do solo e consideração de evapotranspiração da cobertura do solo. Por fim, deve-se definir qual modelo de UGT será utilizado no cálculo, bem como as características do isolamento térmico do piso, caso ele esteja presente na edificação (U.S. DEPARTMENT..., 2020c).

Na simulação, o domínio de solo é dividido em células. Então, a superfície de cada célula é tratada como superfície de balanço térmico, na qual os mecanismos de radiação de ondas longas e curtas, condução e convecção são considerados (U.S. DEPARTMENT..., 2020b). Uma vez que o modelo de solo é simulado, as células que estão em contato com a superfície de condição de contorno das zonas térmicas são atualizadas e fornecem as temperaturas que são usadas nos cálculos de balanço térmico do próximo passo da simulação (U.S. DEPARTMENT..., 2020b).

#### 2.2.2.3 Site:GroundDomain:Basement

Este objeto é utilizado para considerar a transferência de calor que ocorre entre ambientes subterrâneos e o solo. Os cálculos de transferência de calor utilizados por este objeto seguem o mesmo modelo utilizado pelo *Site:GroundDomain:Slab*, abrangendo, neste caso, superfícies que estão abaixo da superfície do solo (U.S. DEPARTMENT..., 2020b).

O modelo utiliza uma formulação de diferenças finitas implícitas para calcular as temperaturas do solo. Assim como no objeto *Site:GroundDomain:Slab*, deve-se inserir a profundidade e largura do domínio de solo, bem como propriedades relativas ao entorno da edificação e o modelo de UGT a ser utilizado (U.S. DEPARTMENT..., 2020c). Além disso, devem ser inseridos parâmetros relativos às condições de contorno das superfícies de paredes e piso do ambiente subterrâneo (U.S. DEPARTMENT..., 2020c). Por meio deste objeto, pode-se calcular o fluxo de calor e as temperaturas das superfícies externas do piso e das paredes do ambiente

subterrâneo. Estes valores são utilizados pelo *EnergyPlus* nos balanços térmicos das zonas da edificação (U.S. DEPARTMENT..., 2020c).

#### 2.2.2.4 Programa *Slab*

De acordo com o manual de referência de programas auxiliares do *EnergyPlus* (U.S. DEPARTMENT..., 2020a), há dois problemas relacionados com a abordagem dos cálculos de transferência de calor através do solo realizados pelo programa. Os cálculos de transferência de calor por condução no *EnergyPlus* são unidimensionais, enquanto os cálculos de transferência de calor através do solo são bidimensionais ou tridimensionais. Independentemente do método de cálculo de transferência de calor através do solo adotado, esta diferença causa graves problemas à modelagem e simulação do fenômeno. Além disso, de maneira geral, a escala temporal dos cálculos de balanço térmico das zonas da edificação e dos cálculos de transferência de calor através do solo é muito distinta (U.S. DEPARTMENT..., 2020a). Em geral, os balanços térmicos das zonas da edificação ocorrem em períodos horários ou diários, enquanto os balanços térmicos dos cálculos de transferência de calor através do solo ocorrem em base mensal (U.S. DEPARTMENT..., 2020a).

Para contornar esse problema, os desenvolvedores do *EnergyPlus* separaram o procedimento de cálculo da transferência de calor através do solo do procedimento de cálculo térmico das zonas (U.S. DEPARTMENT..., 2020a). Como o parâmetro mais importante para o cálculo da zona térmica é a temperatura da face externa da superfície da edificação que está em contato com o solo, esta temperatura é utilizada como plano de separação para os dois procedimentos de cálculo (U.S. DEPARTMENT..., 2020a).

A partir da premissa desse plano de separação para os procedimentos de cálculo, os programas de transferência de calor tridimensionais para lajes de piso desenvolvidos por Bahnfleth (1989) foram modificados por Clements (2004) para retornar valores de temperatura da face externa por meio do programa auxiliar *Slab* (U.S. DEPARTMENT..., 2020a). Dessa maneira, o *EnergyPlus* torna possível uma abordagem mais satisfatória das trocas de calor entre a edificação e o solo sobre o qual ela está situada.

O modelo foi desenvolvido por Bahnfleth (1989) a partir de um estudo tridimensional de diferenças finitas em que o fator de escala para a transferência de calor para pisos retangulares e em forma de L foi adotado como o quociente área/perímetro (LARSEN, 2011). Dessa maneira, toda a resolução do problema se resumiu à solução de condições de contorno tridimensionais. Posteriormente, Clements (2004) modificou o modelo para integrá-lo ao funcionamento do *EnergyPlus* (LARSEN, 2011).

O programa *Slab* produz perfis de temperatura para as superfícies externas da edificação por meio de um processamento que precede a simulação da edificação. As temperaturas obtidas pelo programa *Slab* podem ser integradas à simulação da edificação no *EnergyPlus* como temperaturas médias mensais do solo, que são utilizadas para cálculo dos balanços térmicos das zonas da edificação (U.S. DEPARTMENT..., 2020a).

A utilização do programa *Slab* demanda a inserção de alguns parâmetros relativos ao entorno da edificação, como albedo, emissividade da superfície do solo e sua rugosidade (U.S. DEPARTMENT..., 2020a). Também devem ser inseridos parâmetros referentes às características do solo e da laje de piso, como densidade, calor específico e condutividade térmica, além de ser possível inserir propriedades de materiais isolantes para edificações cujo piso possui isolamento térmico (U.S. DEPARTMENT..., 2020a).

#### 2.2.2.5 Programa *Basement*

O programa *Basement* é utilizado para calcular as temperaturas nas superfícies externas do piso e das paredes de ambientes subterrâneos de edificações. Ele pode ser ativado dentro do *EnergyPlus*, por meio do objeto *GroundHeatTransfer:Basement*, ou de forma externa, sendo rodado separadamente para calcular as temperaturas superficiais que são posteriormente incluídas à simulação (U.S. DEPARTMENT..., 2020a).

O programa *Basement* utiliza soluções numéricas implícitas baseadas em um modelo tridimensional de diferenças finitas. Isto permite ao programa retornar uma resposta rápida e suficientemente precisa para o problema de transferência de calor através do solo (CLEMENTS, 2004). O modelo de cálculo foi proposto a partir

do método desenvolvido por Bahnfleth (1989) e Cogil (1998), e modificado por Clements (2004) (ANDOLSUN *et al.*, 2011).

O programa permite inserir as propriedades dos materiais que constituem as paredes, piso e cobertura do ambiente subterrâneo, como densidade, calor específico e condutividade térmica. Além disso, devem ser inseridos dados de entrada referentes ao arquivo climático, às características da edificação e de seu entorno (RESENDE; SOUZA; GOMES, 2019).

#### 2.2.2.6 Foundation:Kiva

O *Kiva* é uma ferramenta de cálculo de transferência de calor através da fundação de edificações integrada ao *EnergyPlus* na versão 8.7 e que utiliza um modelo bidimensional de diferenças finitas para realizar os cálculos. Esta ferramenta é resultado do trabalho de Kruis (2015) e Kruis e Krarti (2015), em que fica demonstrado que os cálculos de transferência de calor através de fundações podem ser realizados de maneira ágil sem que haja perda de precisão (U.S. DEPARTMENT..., 2020b).

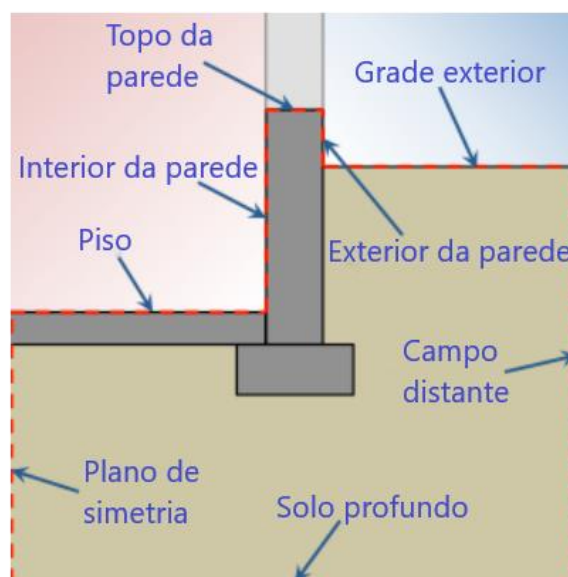
No *EnergyPlus*, o *Kiva* utiliza o arquivo climático, a posição solar e as temperaturas e radiação de cada zona térmica como condições de contorno para seus cálculos de ganhos térmicos por convecção e de temperaturas de superfície para os pisos e paredes que constituem o elemento de fundação (U.S. DEPARTMENT..., 2020b). Sua utilização permite a consideração de diferentes tipos de fundação no cálculo de transferência de calor entre edificação e solo, como lajes de piso e paredes de ambientes subterrâneos.

Como o *Kiva* realiza cálculos de diferença finitas bidimensionais e o *EnergyPlus* utiliza funções de transferência por condução unidimensionais, as superfícies da fundação calculadas pelo *Kiva* utilizam algoritmos de balanço térmico diferentes do restante do modelo simulado (U.S. DEPARTMENT..., 2020b).

A partir de uma relação entre a área (ou área de piso) e perímetro da fundação, a ferramenta *Kiva* realiza uma aproximação bidimensional do fenômeno. Isto permite uma análise representativa da transferência de calor pela fundação sem que para isso seja necessário realizar cálculos tridimensionais (KRUIS; KRARTI, 2015).

A ferramenta apresenta algumas condições de contorno específicas, conforme apresentado na Figura 3. No “topo da parede”, assume-se que o fluxo de calor na direção vertical é nulo, o que significa que apenas é considerado fluxo de calor na direção horizontal. O “solo profundo” representa um ponto de temperatura constante ou de fluxo vertical de calor nulo. O “campo distante” e o “plano de simetria” representam o ponto em que o fluxo horizontal de calor é nulo. Nas superfícies externas e internas são utilizados algoritmos do *EnergyPlus* para calcular a convecção e a radiação (U.S. DEPARTMENT..., 2020b).

Figura 3 - Condições de contorno da ferramenta *Kiva*



Fonte: Adaptado de U.S. Department... (2020b).

No caso de edificações em que não existem elementos de fundação suscetíveis à transferência de calor no perímetro, como no caso de edificações com fundação do tipo radier, o *Kiva* utiliza como condição de contorno apenas o “solo profundo”. Neste caso, o fluxo de calor através da superfície do piso é calculado por meio de uma fórmula unidimensional de diferenças finitas que considera a configuração da laje de piso e a condição de contorno do “solo profundo” (U.S. DEPARTMENT..., 2020b). Uma particularidade do *Kiva* é que, devido às particularidades de seu algoritmo, não é possível extrair variáveis de saída referentes às superfícies externas do piso e elementos de fundação.

O processo de inicialização da ferramenta *Kiva* acontece de forma independente do restante da simulação e se difere das tradicionais etapas de

aquecimento<sup>4</sup> da simulação no *EnergyPlus*. O *Kiva* traz um método de inicialização acelerada desenvolvido por Kruis (2015) que utiliza o arquivo climático para calcular uma longa série histórica do solo sem a necessidade de simular todo o modelo do edifício (U.S. DEPARTMENT..., 2020b).

### 2.3 INFLUÊNCIA DOS MÉTODOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR ATRAVÉS DO SOLO NOS ESTUDOS DE DESEMPENHO TERMOENERGÉTICO DE EDIFICAÇÕES

Existem inúmeros fatores que influenciam no desempenho térmico de uma edificação, que envolvem características do envelope construtivo, condições climáticas locais e carga térmica presente nos ambientes do edifício. Quando se analisa a envoltória da edificação, geralmente a transferência de calor entre edificação e solo é pequena, a não ser que a edificação seja relativamente pequena ou possua características especiais (U.S. DEPARTMENT..., 2020a).

Entretanto, o avanço das técnicas construtivas e das preocupações com a racionalização dos projetos pautada por um uso consciente de energia fez com que o desempenho térmico da envoltória da edificação fosse aperfeiçoado. Neste contexto, uma fundação sem isolamento térmico em uma edificação contemporânea bem construída pode contribuir com até metade da carga térmica calculada para este edifício (SPIGA; VOCALE, 2014).

Quando se considera o desempenho da envoltória da edificação, o fluxo de calor através do solo apresenta-se como um importante componente da carga térmica total (LIBRALATO; DE ANGELIS; SARO, 2019). De acordo com Andolsun *et al.* (2011), a transferência de calor entre edificação e solo através de pisos e paredes de fundação pode ser uma parcela importante da carga total para aquecimento ou refrigeração de edificações residenciais térreas.

Uma vez que a troca de calor que ocorre através do piso é responsável por uma parcela considerável da troca térmica do edifício, diferentes formas de abordar o fenômeno podem influenciar nas análises de desempenho térmico de edificações.

---

<sup>4</sup> *Warm-up*: período de aquecimento da simulação que ocorre tradicionalmente pela repetição de um único dia até que o modelo atinja convergência e as temperaturas das superfícies entrem em equilíbrio com o ambiente.

Krarti e Ihm (2009) apontam que os cálculos de fluxo de calor por condução utilizados no *EnergyPlus* são feitos por meio de funções de transferência que consideram uma solução unidimensional para as superfícies da edificação, inclusive para os pisos. Em seu estudo, Krarti e Ihm (2009) desenvolveram e implementaram no *EnergyPlus* um modelo numérico bidimensional considerando o estado transiente do fenômeno de transferência de calor entre edificação e solo. Um modelo simplificado de edificação é simulado utilizando-se o método proposto pelos autores e as funções de transferência do *EnergyPlus*. Por meio da comparação dos valores obtidos, os autores comprovaram a satisfatória integração do método proposto ao *EnergyPlus*. Além disso, os resultados obtidos mostraram que o modelo proposto leva em conta de maneira mais precisa a característica de elevada massa térmica do solo, que funciona como um reservatório térmico. A utilização das funções de transferência do *EnergyPlus* em detrimento do modelo proposto, totalmente integrado ao *EnergyPlus*, pode resultar em superestimação em mais de 20% das cargas para aquecimento e refrigeração de uma edificação residencial típica (KRARTI; IHM, 2009).

Em sua pesquisa, Luo, Moghtaderi e Page (2010) analisaram os efeitos da escolha de diferentes condições de contorno térmico do solo na estimativa da temperatura interna final de ambientes de uma edificação. Os autores propuseram uma nova condição de contorno para a base do solo (camada mais distante em profundidade), em que se considera continuidade do fluxo de calor através do solo até a sua base. Também são analisadas as condições de contorno em que a temperatura na base do solo é definida como constante, e em que a base do solo é definida como adiabática. Todas as abordagens são simuladas e os valores obtidos são comparados com valores medidos em protótipos construtivos (LUO; MOGHTADERI; PAGE, 2010).

Para os autores, estabelecer condições de contorno de temperatura constante ou de fluxo de calor nulo para a base do solo influencia de maneira semelhante na temperatura do ambiente interno. Luo, Moghtaderi e Page (2010) apontam que estas condições de contorno simulam a adoção de uma camada isolante (condição adiabática) no solo que impede o fluxo de calor até as camadas mais profundas, resultando em temperaturas do ar mais elevadas durante a noite. Desta maneira, o método proposto pelos autores objetiva corrigir a condição adiabática garantindo a continuidade do fluxo de calor até a última camada de solo (LUO; MOGHTADERI; PAGE, 2010).

A aplicação do modelo proposto resultou em previsões de temperatura do ar interno mais próximas dos valores medidos experimentalmente (LUO; MOGHTADERI; PAGE, 2010). Além disso, a temperatura do ar interno obtida ao se utilizar a condição de contorno de fluxo de calor contínuo através do solo foi menor do que a temperatura obtida com as outras condições de contorno (LUO; MOGHTADERI; PAGE, 2010). Este resultado corrobora com a hipótese levantada por Luo, Moghtaderi e Page (2010) de que quando se considera temperatura constante ou condição adiabática na base do solo, sua propriedade de reservatório térmico é desconsiderada. Como apontado por Alkaff, Sim e Efzan (2016), o solo não deve ser considerado como um isolante térmico perante à edificação, devido à sua alta condutividade térmica quando comparada com materiais de isolamento comumente utilizados nas construções.

Em relação ao consumo energético da edificação, o uso da condição de contorno de fluxo de calor contínuo através do solo resultou em cargas calculadas para aquecimento mais altas, e para resfriamento mais baixas (LUO; MOGHTADERI; PAGE, 2010). Isto demonstra que as condições de contorno adotadas para a transferência de calor através do solo exercem papel determinante nas temperaturas internas e no consumo energético das edificações (LUO; MOGHTADERI; PAGE, 2010).

No estudo de Mateus, Pinto e Graça (2014) é feita a validação da simulação de uma célula-teste no *EnergyPlus* para verificar o funcionamento de uma fachada dupla com proteção nas janelas. A validação envolveu a inserção de parâmetros de entrada e os resultados da simulação foram verificados com valores medidos na célula teste. Os autores reportam que uma das dificuldades encontradas na modelagem da célula-teste foi a consideração dos ambientes em contato com o solo devido à necessidade de adotar um modelo de acoplamento térmico do piso ao solo.

Para resolver o problema, Mateus, Pinto e Graça (2014) testaram duas maneiras de considerar a transferência de calor pelo piso no *EnergyPlus*: utilização do programa *Slab* e a inserção das temperaturas do solo a 2m de profundidade, extraídas do arquivo climático, no objeto *Site:Ground:BuildingSurface*. No caso deste estudo, a diferença média da temperatura do ar interno medida e simulada utilizando os dois métodos foi a mesma. Mesmo assim, os autores apontam que a utilização do programa *Slab* apresentou valores relativamente melhores, resultando em uma

diferença média da temperatura do piso medida e simulada igual a 0,6°C. A utilização das temperaturas do solo do arquivo climático, por sua vez, resultou em diferença média igual a 0,8°C (MATEUS; PINTO; GRAÇA, 2014).

Larsen (2011) comparou os modelos de transferência de calor entre edificação e solo através do piso utilizados por dois programas de simulação de desempenho termoenergético de edificações (*EnergyPlus* e SIMEDIF) por meio da simulação de um protótipo construtivo e do monitoramento de variáveis por meio de medição. A modelagem do piso no SIMEDIF envolve algumas simplificações e a adoção de condições de contorno para que a transferência de calor possa ser calculada pelo método de diferenças finitas explícitas embutido no programa. Já a modelagem do piso no programa *EnergyPlus* utiliza o programa *Slab*. A simulação no *EnergyPlus* permite incluir a transferência de calor por radiação, enquanto no SIMEDIF é utilizado um coeficiente global de convecção e radiação.

O protótipo monitorado no estudo de Larsen (2011) possui laje de piso de concreto armado de 15 centímetros de espessura, onde o monitoramento foi realizado durante 13 dias, em que os 5 primeiros foram adotados como período de aquecimento da simulação. No período de medição, foram monitorados os valores de temperatura do ar interno e externo, temperatura do solo distante da edificação, e temperatura superficial do piso da edificação em diferentes pontos.

Larsen (2011) encontrou maior aproximação entre as temperaturas superficiais do piso medidas e simuladas quando o programa SIMEDIF foi utilizado, com erro médio de 0,2°C durante o período de monitoramento. A utilização do programa *Slab* nesse estudo resultou em amplitudes térmicas diferentes das que foram observadas na medição. Ainda que o estudo tenha apontado que um programa obteve resultados melhores do que o outro, Larsen (2011) reitera que este resultado não deve ser expandido a outras situações e aponta que os casos devem ser analisados sempre de acordo com suas particularidades, geometrias, clima, entre outras características particulares.

No trabalho de Andolsun *et al.* (2011) é feita a comparação entre o consumo energético calculado para uma edificação térrea por meio de simulação em duas ferramentas computacionais distintas: *EnergyPlus* e DOE-2.1e. A edificação é analisada em duas configurações distintas de piso. A primeira configuração se trata de um ambiente subsolo com condicionamento artificial; a segunda se trata de um porão sem condicionamento artificial. Andolsun *et al.* (2011) realizaram três rodadas

de simulações com cada configuração. As duas primeiras não consideraram o contato da edificação com o solo, sendo que as paredes e pisos dos ambientes subterrâneos foram considerados adiabáticos. Na terceira rodada de simulações, as superfícies que haviam sido consideradas adiabáticas foram configuradas para trocar calor com o solo.

Na simulação realizada no programa DOE-2.1e, Andolsun *et al.* (2011) utilizaram o método de Winkelmann (2002), no qual se considera que a transferência de calor ocorre principalmente no perímetro exposto da superfície em contato com o solo. Neste método, as superfícies da parte subterrânea da construção são consideradas como uma sobreposição de camadas de diferentes materiais, o que objetiva aproximar o efeito de massa térmica do solo que circunda a edificação.

Na simulação realizada no programa *EnergyPlus*, Andolsun *et al.* (2011) realizaram duas simulações distintas para considerar a troca de calor com o solo. Os autores simularam as superfícies em contato com o solo por meio da utilização das camadas do método de Winkelmann (2002), e também por meio do programa *Basement*.

Na comparação entre os programas, ao utilizar o método de Winkelmann (2002) tanto no DOE-2.1-e quanto no *EnergyPlus*, Andolsun *et al.* (2011) observaram que as temperaturas das superfícies internas obtidas foram diferentes e, conseqüentemente, as perdas de calor calculadas diferiram. O *EnergyPlus*, por sua forma de gerar relatórios, apresentou flutuações horárias de perda de calor mais elevadas quando comparado com o DOE-2.1-e (ANDOLSUN *et al.*, 2011).

Em um segundo passo, Andolsun *et al.* (2011) compararam a utilização do método de Winkelmann e a utilização do programa *Basement*, ambos no *EnergyPlus*, a fim de verificar as possíveis diferenças ocasionadas pelos métodos. Na utilização do *Basement*, os autores realizaram iterações entre o programa *Basement* e o *EnergyPlus*. Inicialmente, a simulação foi rodada no *EnergyPlus* para se obter os valores médios mensais da temperatura do ar das zonas da edificação. Esses valores foram utilizados para rodar o programa *Basement*, que calculou as temperaturas médias mensais do solo. A simulação no *EnergyPlus* foi rodada novamente, com os valores de temperatura da interface entre edificação e solo calculados pelo *Basement*. Esse procedimento foi repetido até atingir a convergência das temperaturas do ar das zonas da edificação (ANDOLSUN *et al.*, 2011).

Nessa análise, a utilização do *Basement* resultou em médias mensais de perda de calor para o solo significativamente mais elevadas. Como consequência, ao utilizar o *Basement*, obteve-se menor consumo de energia para resfriamento e maior consumo de energia para aquecimento para a edificação. Entretanto, o consumo geral de energia calculado pelo *Basement* foi menor do que o calculado ao utilizar o método de Winkelmann (ANDOLSUN *et al.*, 2011).

Por fim, Andolsun *et al.* (2011) concluem que as incertezas na modelagem de ambientes subterrâneos devido às trocas de calor entre a edificação e solo são significativos para a simulação termoenergética de edificações residenciais térreas. Os autores apontam que existe uma necessidade urgente de se padronizar a modelagem da transferência de calor em ambientes subterrâneos.

Oliveira *et al.* (2012) analisaram diferentes maneiras de considerar a transferência de calor entre edificação e solo através do piso no programa *EnergyPlus*. Para isso, uma habitação de interesse social localizada no Brasil, na zona bioclimática 2, foi simulada com duas abordagens distintas para a transferência de calor através do piso: inserção de temperaturas do solo presentes no arquivo climático e utilização do programa *Slab*. Além disso, os autores verificaram diferentes configurações para representar edificações com e sem isolamento térmico, por meio da adoção de valores baixos e altos de transmitância térmica, respectivamente, na envoltória da edificação.

Em geral, o número de horas de conforto obtido para a edificação, durante um dia, foi maior quando a simulação foi feita com auxílio do programa *Slab* do que quando a edificação foi simulada utilizando as temperaturas do solo do arquivo climático (OLIVEIRA *et al.*, 2012). Este resultado reforça a recomendação dos manuais de referência de variáveis de entrada e saída (U.S. DEPARTMENT..., 2020c) e dos programas auxiliares (U.S. DEPARTMENT..., 2020a) do *EnergyPlus* de que não se deve utilizar as temperaturas do solo presentes nos arquivos climáticos por serem valores extremos para os ambientes da edificação.

No caso do trabalho de Oliveira *et al.* (2012), as temperaturas da interface entre edificação e solo calculadas pelo programa *Slab* foram até 6°C mais elevadas do que as temperaturas do arquivo climático no período frio, o que explica o maior índice de conforto térmico obtido. Nos meses com temperaturas médias mais elevadas, as temperaturas calculadas pelo *Slab* se aproximam das temperaturas do solo presentes no arquivo climático (OLIVEIRA *et al.*, 2012).

Em relação à envoltória da edificação, Oliveira *et al.* (2012) concluíram que a influência da temperatura do solo foi maior nas configurações de envoltória que apresentavam o menor valor de transmitância térmica, ou seja, nas edificações mais isoladas.

Fabris (2017) analisou o impacto de utilizar diferentes abordagens para a transferência de calor entre edificação e solo na simulação de uma edificação. Para isso, a autora utilizou o objeto *Site:GroundTemperature:BuildingSurface* e o programa *Slab*, ambos vinculados ao *EnergyPlus*. Em geral, as temperaturas do ar interno obtidas pelo programa *Slab* foram mais baixas no verão, com diferença de até 4,5°C, e mais altas no inverno, com diferença de até 2,1°C, em relação ao outro método analisado (FABRIS, 2017).

Costa, Roriz e Chvatal (2017) estudaram o impacto da aplicação de diferentes alternativas de modelagem da transferência de calor entre edificação e solo através do piso por meio da avaliação do desempenho térmico de residências térreas ventiladas naturalmente. Para isso, simularam a edificação no *EnergyPlus* utilizando algumas alternativas deste programa para a transferência de calor através do solo. A pesquisa de Costa, Roriz e Chvatal (2017) se concentrou no funcionamento do programa *Slab*, na sua forma de ativação e uso, na influência dos dados de entrada em seu funcionamento e na comparação com os outros métodos de modelagem de transferência de calor através do solo presentes no *EnergyPlus*.

O programa *Slab* pode ser ativado dentro do *EnergyPlus* ou de maneira separada. Nesta pesquisa, as duas formas de ativação retornaram variáveis de saída com os mesmos valores, o que significa que não existe influência da forma de ativação nos resultados obtidos (COSTA; RORIZ; CHVATAL, 2017). Além disso, os autores ressaltaram a importância de realizar o procedimento de convergência por meio de iteração entre o programa *Slab* e o *EnergyPlus*, como realizado e recomendado por Andolsun *et al.* (2011).

Na comparação entre os métodos, Costa, Roriz e Chvatal (2017) analisaram, além do programa *Slab*, os métodos dos objetos *Site:GroundTemperature:BuildingSurface* e *Site:GroundDomain:Slab*. Os autores observaram que as temperaturas do ar interno foram mais altas na maior parte do ano quando o programa *Slab* não foi utilizado. Estas diferenças de temperatura influenciam na avaliação do conforto proporcionado pela edificação, que foi analisado por meio dos indicadores graus-hora de desconforto por calor, desconforto por frio e

desconforto total. Costa, Roriz e Chvatal (2017) pontuam que cada grau-hora de desconforto representa o desconforto causado quando a temperatura operativa do ar interno está 1,0°C acima ou abaixo do intervalo de conforto, durante o período de uma hora.

Em comparação com o programa *Slab*, os métodos do objeto *Site:GroundDomain:Slab* apresentaram o maior impacto nos indicadores de conforto analisados (COSTA; RORIZ; CHVATAL, 2017). A utilização do *Site:GroundDomain:Slab*, com o método de cálculo de temperaturas do solo não perturbado (UGT) de Kusuda e Achenbach proporcionou uma redução de 55,2% nas horas de desconforto total durante um ano, em relação ao programa *Slab*, embora tenha apresentado um acréscimo relativo de 2313,9% nos graus-hora de desconforto por calor (COSTA; RORIZ; CHVATAL, 2017). Em relação aos graus-hora de desconforto por frio, Costa, Roriz e Chvatal (2017) observaram que a utilização do *Site:GroundDomain:Slab* com o método de cálculo de UGT de Kusuda e Achenbach resultou em uma redução de 58,7% nas horas de desconforto em relação ao programa *Slab*.

Quando o *Site:GroundDomain:Slab* foi utilizado com o método de cálculo de UGT de diferenças finitas, a redução nas horas de desconforto total em relação ao programa *Slab* foi de 44%, sendo que houve decréscimo relativo de 46,7% nos graus-hora de desconforto por frio, e acréscimo relativo de 1751,2% nos graus-hora de desconforto por calor (COSTA; RORIZ; CHVATAL, 2017). Por sua vez, quando se utilizou o objeto *Site:GroundTemperature:BuildingSurface*, Costa, Roriz e Chvatal (2017) encontraram redução de 26,2% nas horas de desconforto total em relação ao programa *Slab*.

Em relação ao funcionamento do programa *Slab*, Costa, Roriz e Chvatal (2017) concluíram que o parâmetro que apresentou maior impacto nos resultados foi o da consideração da evapotranspiração. Na avaliação do conforto térmico, desativar a evapotranspiração no programa *Slab* resultou na redução de 23,8% nas horas de desconforto total durante o ano (COSTA; RORIZ; CHVATAL, 2017). Em relação ao solo, os autores encontraram que o solo seco (baixa condutividade térmica) resultou em uma redução de 57,5% nas horas de desconforto total em um ano, enquanto a consideração de solo úmido (alta condutividade térmica) resultou em acréscimo de 25%, ambos em relação ao caso de referência (condutividade térmica intermediária) (COSTA; RORIZ; CHVATAL, 2017).

Resende, Souza e Gomes (2019) realizaram um estudo para avaliar o impacto de diferentes alternativas de modelagem presentes no *EnergyPlus* para considerar a transferência de calor entre o solo e as superfícies (paredes e piso) de um ambiente subterrâneo de uma residência unifamiliar sem condicionamento artificial e sem isolamento térmico.

Para analisar o impacto das alternativas, os autores simularam a mesma residência variando as formas de consideração das trocas de calor entre a edificação e o solo. Utilizou-se o programa *Basement*, o objeto *Site:GroundDomain:Slab*, com três opções de determinação de UGT (*FiniteDifference*, Kusuda e Achenbach e Xing) (U.S. DEPARTMENT..., 2020b) e o objeto *Site:GroundTemperature:BuildingSurface*, em que foram inseridas temperaturas do solo extraídas do arquivo climático (RESENDE; SOUZA; GOMES, 2019). Além disso, levou-se em conta o impacto das propriedades do solo na simulação, considerando-o em duas condições: seco e saturado.

Os valores de temperatura interna e externa obtidos pela simulação foram analisados para um dia típico de verão e de inverno, conforme o estabelecido na NBR 15575 (ABNT, 2013). Os resultados mostram que as temperaturas do ar interno obtidas por meio do objeto *Site:GroundDomain:Slab* são muito próximas, independente do modelo de UGT utilizado (RESENDE; SOUZA; GOMES, 2019). Isso demonstra que, para este estudo, a simulação não se mostrou sensível ao modelo de UGT adotado.

Por outro lado, os valores de temperaturas do ar interno obtidos pelo uso do programa *Basement* apresentaram grande variação quando comparados aos obtidos pelo *GroundDomain*. Na condição de verão, as temperaturas do ar interno obtidas com o *Basement* foram até 6°C mais baixas do que as do *Site:GroundDomain:Slab*; na condição de inverno, foram até 5,2°C mais elevadas (RESENDE; SOUZA; GOMES, 2019). Quando analisaram as temperaturas nas superfícies externas das paredes e dos pisos do ambiente subterrâneo, Resende, Souza e Gomes (2019) observaram que elas se mostraram, em geral, mais baixas do que as temperaturas do ar interno no verão e mais altas no inverno, o que corrobora com o que foi apontado por Alkaff, Sim e Efsan (2016). Dessa maneira, para alcançar o equilíbrio térmico, no verão o ambiente subterrâneo perde calor para o solo, e no inverno recebe calor proveniente do solo (RESENDE; SOUZA; GOMES, 2019).

As diferenças de temperaturas obtidas por meio dos métodos analisados provocaram impactos significativos na classificação quanto aos níveis de desempenho estabelecidos pela NBR 15575 (ABNT, 2013). Ao utilizar o objeto *Site:GroundDomain:Slab*, o ambiente estudado atingiu nível de desempenho mínimo. Por sua vez, ao utilizar o programa *Basement*, o ambiente analisado atingiu nível de desempenho superior nas condições de verão e inverno (RESENDE; SOUZA; GOMES, 2019).

Em relação ao tipo de solo, as temperaturas internas do ambiente subterrâneo se mostraram sensíveis ao grau de saturação adotado na simulação na condição de verão, em que a consideração de solo saturado resultou em temperaturas 2,8% mais elevadas em relação à consideração de solo seco (RESENDE; SOUZA; GOMES, 2019).

Nunes *et al.* (2019) analisaram o impacto de diferentes métodos de transferência de calor através do solo presentes no *EnergyPlus* no desempenho energético de edificações. Para isso, os autores investigaram três sistemas construtivos em três diferentes climas brasileiros.

A edificação estudada pelos autores é uma habitação de interesse social que segue os padrões do programa Minha Casa Minha Vida, e que foi simulada com três diferentes sistemas construtivos de paredes: blocos cerâmicos, concreto maciço e *wood-frame*. Em relação ao clima, Nunes *et al.* (2019) optaram por investigar três locais com características distintas e, para isso, escolheram Curitiba (zona bioclimática 1), São Paulo (zona bioclimática 3) e Manaus (zona bioclimática 8).

Para considerar a transferência de calor entre a edificação e o solo, Nunes *et al.* (2019) utilizaram o programa *Slab* e o objeto *Site:GroundDomain:Slab*, ambos vinculados ao *EnergyPlus*. A utilização do programa *Slab* envolveu processo iterativo para obter temperaturas do solo estáveis, conforme recomendado no estudo de Andolsun *et al.* (2011) e realizado no trabalho de Costa, Roriz e Chvatal (2017). Já a utilização do objeto *Site:GroundDomain:Slab* considerou dois modelos de temperatura do solo não perturbado: *FiniteDifference* e *KusudaAchenbach*.

Em relação à temperatura do solo obtida por meio dos diferentes métodos utilizados, Nunes *et al.* (2019) não encontraram influência do sistema construtivo das paredes. Isto é, para uma mesma zona bioclimática, as temperaturas do solo obtidas pelos métodos analisados foram muito semelhantes para os sistemas em bloco cerâmico, concreto maciço e *wood-frame*.

Os autores concluíram que, em geral, as temperaturas do solo obtidas por meio do programa *Slab* são menores nos meses com temperatura média do ar mais alta, quando comparadas com as temperaturas do solo obtidas quando se utiliza o objeto *Site:GroundDomain:Slab* para as zonas bioclimáticas 1 e 3. Este comportamento é confirmado para a zona bioclimática 8, onde as temperaturas médias do ar são elevadas durante todo o ano e as temperaturas médias mensais do solo obtidas por meio do programa *Slab* foram até 2,94°C mais baixas (NUNES *et al.*, 2019).

Em relação ao desempenho da edificação na condição de verão, a temperatura do solo causou grande impacto nos resultados das três zonas bioclimáticas analisadas. O índice de desempenho utilizado como parâmetro foi a quantidade de graus-hora para resfriamento (GHR). Nunes *et al.* (2019) demonstraram que o GHR foi fortemente influenciado pelo método de cálculo da temperatura do solo. A utilização das temperaturas do solo obtidas por meio do programa *Slab* gerou valores de GHR até 49,71% mais baixos, resultando em níveis de eficiência energética melhores em alguns casos (NUNES *et al.*, 2019).

O grande impacto do método de cálculo da temperatura do solo também foi apresentado na análise da edificação na condição de inverno, realizada para as zonas bioclimáticas 1 e 3. A utilização dos dois métodos do objeto *Site:GroundDomain:Slab* resultou em valores muito próximos de consumo relativo para aquecimento (CA), indicador de desempenho para a condição de inverno (NUNES *et al.*, 2019). Por sua vez, a utilização das temperaturas do solo obtidas pelo *Slab*, em relação às temperaturas do solo obtidas pelo objeto *Site:GroundDomain:Slab*, resultou em valores de CA com diferenças de até 32,74%. Em alguns casos estudados, essas diferenças resultaram em diferentes níveis de eficiência energética para a mesma edificação (NUNES *et al.*, 2019).

Por fim, Nunes *et al.* (2019) enfatizam que o método de determinação da temperatura do solo é fundamental para a determinação do nível de desempenho termoenergético de edificações por meio de simulação computacional.

González *et al.* (2019) realizaram um estudo para avaliar o impacto de se utilizar diferentes condições de contorno do programa *EnergyPlus* em uma edificação real que possui uma alta taxa de perda de calor pelo piso. Os autores utilizaram três objetos do programa como condição de contorno: *Ground* (que utiliza temperaturas mensais do solo diretamente no modelo de transferência de calor),

*GroundFCfactorMethod* (que demanda a inserção de coeficientes específicos) e *Foundation* (que utiliza o programa *Kiva* integrado ao *EnergyPlus*). González *et al.* (2019) utilizaram um modelo computacional de um edifício educacional, previamente calibrado, e testaram as respostas do modelo às diferentes condições de contorno buscando a otimização dos resultados obtidos. Na utilização do programa *Kiva*, os autores realizaram um procedimento de otimização por meio de um algoritmo para encontrar as propriedades termofísicas do solo a ser utilizadas.

González *et al.* (2019) concluíram que a melhor estratégia foi utilizar o objeto *Ground*, com a inserção de temperaturas do ar interno medidas no edifício subtraídas em 1,5°C, e apontaram que isso nem sempre é viável pois demanda investimento inicial para a medição. González *et al.* (2019) apontam que o objeto *Foundation:Kiva* se apresentou como a segunda melhor estratégia, embora demande do usuário conhecimento mais especializado para ser utilizado. Além disso, a edificação estudada pelos autores possui maior superfície em contato com o solo em seu piso do que em seus elementos de fundação.

Yu, Kang e Zhai (2020) compararam diferentes modelos de transferência de calor através do solo utilizados em simulações para análise energética de edificações subterrâneas. Em seu trabalho, os autores analisaram o modelo do objeto *Site:GroundDomain:Basement*, com UGT de *Xing*, o modelo do pré-processador *Basement* e o modelo do objeto *Foundation:Kiva*. O critério de análise utilizado por Yu, Kang e Zhai (2020) foi a consistência das variáveis de saída do modelo e o tempo de processamento computacional. A validação dos modelos analisados foi realizada de forma analítica, uma vez que não foi possível realizá-la de maneira experimental. Os autores utilizaram o pré-processador *Basement* como parâmetro de avaliação para os outros modelos. O modelo do *Ground Domain* com UGT de *Xing* foi o que apresentou maior acurácia relativa com o menor tempo de processamento, quando comparado com o pré-processador *Basement* (YU; KANG; ZHAI, 2020). Por fim, os autores apontam que a maior limitação da pesquisa foi a necessidade de comparar os modelos com o pré-processador *Basement* para avaliar seus desempenhos. Apontam, ainda, que estudos futuros que utilizem padrões ou dados reais devem ser desenvolvidos (YU; KANG; ZHAI, 2020).

Os estudos citados abordam, de diferentes maneiras, o impacto da transferência de calor através do solo nos resultados de simulações termoenergéticas de edificações. O uso de diferentes métodos para considerar o contato da edificação

com o solo pode influenciar de maneira significativa no resultado do desempenho termoenergético de edificações. Os autores dos estudos ressaltam a importância de melhor compreender o fenômeno a fim de adotar o método que mais se aproxima da realidade e, dessa maneira, não influenciar no resultado de desempenho obtido por meio da simulação.

A análise aprofundada do comportamento das trocas de calor entre as edificações e o solo, especialmente em edificações térreas sem isolamento térmico no piso, e o entendimento da influência de cada um dos parâmetros envolvidos no fenômeno são importantes para a determinação do desempenho térmico e da eficiência energética destas edificações.

A emenda da Norma de Desempenho NBR 15575-1 (ABNT, 2021) estabelece, no procedimento de simulação computacional, que o programa utilizado possua, dentre outras características, a de modelar trocas de calor entre edificação e solo. Entretanto, não estabelece um programa específico, tampouco particularidades dos modelos de transferência de calor. A INI-R (CB3E, 2020), em seu anexo sobre o procedimento de simulação, não traz nenhuma recomendação sobre como deve ser configurada a transferência de calor entre edificação e solo. A recomendação apresentada pela proposta é de que o modelo do edifício na condição real deve ter a mesma condição de contato com o solo que o modelo de referência. Por sua vez, a Instrução Normativa para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas (INI-C) (INMETRO, 2021), recomenda que o programa computacional para a simulação termoenergética deve modelar trocas de calor entre a edificação e o solo, porém sem especificar detalhes.

O Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (RTQ-R) (INMETRO, 2012) recomenda que, para edificações em que o piso dos ambientes estiver em contato com o solo, devem ser calculadas as temperaturas médias do solo para cada mês do ano, com base nos valores médios das temperaturas internas e externas da edificação. Além disso, no RTQ-R (INMETRO, 2012) é informado que as temperaturas do solo utilizadas na simulação do método prescritivo foram obtidas pelo programa *Slab*, o que pode induzir o usuário a utilizá-lo. Entretanto, não existe nenhuma recomendação específica sobre qual modelo de transferência de calor entre edificação e solo deve ser utilizado.

Neste capítulo pôde-se observar que o fenômeno de transferência de calor entre edificação e solo é complexo. Há muito autores buscam criar modelos para

simular o comportamento do fenômeno e otimizar as análises de desempenho termoenergético de edificações. Os modelos, por sua vez, apresentam algumas limitações. Isto pode fazer com que os resultados obtidos nas análises não sejam tão precisos, ou apresentem diferenças a depender do modelo utilizado. Além disso, atualmente nas regulamentações brasileiras, não é definido qual modelo de transferência de calor entre edificação e solo deve ser utilizado nas simulações computacionais para análise de desempenho termoenergético de edificações.

Neste sentido, este trabalho se torna relevante ao buscar se aprofundar no tema, e traz a inovação de comparar os resultados de simulações que utilizam diferentes modelos de transferência de calor através do solo atualmente disponíveis no *EnergyPlus* com valores monitorados em uma edificação real com diferentes zonas térmicas. Com isso, pretende-se determinar qual o método de transferência de calor entre edificação e solo é o mais indicado para ser utilizado em simulações para análise de desempenho termoenergético de edificações localizadas na zona bioclimática 3.

### 3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Esta pesquisa é de natureza exploratória, pois tem como objetivo avançar no conhecimento do tema para aplicação prática direcionada à solução de um problema específico. Quanto à maneira de abordar o problema, a pesquisa é quantitativa, já que interpreta, classifica e analisa os fenômenos através de abordagem numérica.

Para cumprir o objetivo de determinar qual dos métodos de transferência de calor através do solo disponíveis no *EnergyPlus* é mais adequado para ser utilizado em simulações computacionais voltadas para a análise de desempenho termoenergético de edificações, a estratégia de ação envolveu três etapas principais.

A primeira etapa envolveu o monitoramento da temperatura da superfície externa do piso de um protótipo habitacional de interesse social instalado no campus da Universidade Estadual de Londrina. Nessa etapa, sensores foram instalados sob o piso da edificação para monitorar os dados da temperatura da interface entre o piso e o solo. A temperatura da superfície externa do piso medida nessa etapa foi utilizada nas etapas seguintes de diferentes maneiras, em especial visando a sua comparação com as temperaturas geradas pelo *EnergyPlus* por meio dos diferentes métodos de transferência de calor através do solo.

Os métodos de transferência de calor através do solo disponíveis no *EnergyPlus* dependem, dentre outros fatores, da temperatura do ar interno simulada para a zona térmica. Para que as temperaturas do ar simuladas sejam representativas daquelas observadas na realidade, deseja-se que o modelo computacional represente com fidelidade as condições reais da edificação. Sendo assim, a segunda etapa envolveu a calibração do modelo computacional da edificação. Em uma calibração, busca-se a aproximação do comportamento do modelo computacional com o de uma edificação real, geralmente por meio de um processo iterativo em que se variam propriedades e se verifica a resposta do modelo a tais variações. No caso do protótipo habitacional em estudo, o processo de calibração foi especialmente importante pois algumas características particulares da edificação não haviam sido consideradas em seu modelo computacional base, e não se conhecia a influência dessas características no resultado das simulações. Além disso, o protótipo habitacional está submetido a

uma condição particular de sombreamento durante os meses mais quentes do ano, fator que pode influenciar nos resultados da simulação computacional.

A utilização de um modelo calibrado que representasse o modelo real com a maior fidelidade possível foi fundamental para que as temperaturas da superfície externa do piso calculadas por meio dos diferentes métodos de simulação fossem válidas. Dessa maneira, buscou-se que as diferenças encontradas entre os valores simulados e os valores medidos fossem provenientes das particularidades dos métodos de transferência de calor através do solo utilizados, e não de possíveis incoerências do modelo computacional. Uma vez que o processo de calibração envolveu grande esforço de coleta de dados, configuração dos modelos computacionais e análise de resultados, a etapa de calibração seguiu a seguinte estratégia:

- a) Calibração de um modelo computacional: nesse modelo, várias etapas de calibração foram realizadas com o intuito de testar os fatores mais influentes para o protótipo e encontrar o modelo computacional que representasse com maior fidelidade as condições reais. Esse processo foi realizado com dados de 36 dias de monitoramento, incluindo as temperaturas da superfície externa do piso medidas. Dos 36 dias de monitoramento, 4 foram utilizados para aquecimento da simulação computacional. Essa etapa considerou um período em que a edificação esteve na condição de sombreamento, condição esta que é a mais frequente durante o ano.
- b) Validação do modelo computacional para todo o ano: a calibração englobou um pequeno período do ano. Para garantir a validade do modelo computacional durante todo o período de análise, o modelo calibrado foi validado para os dias não contemplados pelo processo de calibração. Para isso, o período total de análise foi dividido em meses, e a validação se deu pela comparação dos valores obtidos por simulação com os valores medidos no protótipo habitacional em cada mês. Com isso, objetivou-se garantir que o modelo calibrado fosse válido para todo período de análise e que se conhecessem os erros obtidos pela simulação. Assim, foi possível analisar com maior fundamento os resultados das etapas posteriores.

A terceira e última etapa envolveu a simulação do modelo computacional calibrado e validado utilizando os distintos métodos de transferência de calor através do solo disponíveis no *EnergyPlus*. Nas simulações dessa etapa, a variável de saída analisada foi a temperatura da superfície externa do piso e a temperatura operativa do ar dos ambientes do protótipo habitacional. Os valores da temperatura da superfície externa do piso obtidos com cada um dos métodos foram comparados com as temperaturas medidas por meio de sensores instalados na superfície externa dos pisos dos ambientes de permanência prolongada da edificação. Com isso, foi possível identificar qual método mais se aproximou dos valores medidos.

Os detalhes dos procedimentos metodológicos utilizados para cumprir com os objetivos deste trabalho são apresentados nas seções a seguir.

### 3.1 MODELO DA EDIFICAÇÃO

O modelo de edificação adotado neste trabalho é um protótipo habitacional de interesse social, unifamiliar isolado, construído de acordo com os padrões do programa Minha Casa Minha Vida. Está localizado no campus da Universidade Estadual de Londrina (UEL), em Londrina, Paraná. O entorno do protótipo habitacional possui arborização abundante, conforme apresentado na Figura 4. A cidade de Londrina está localizada na zona bioclimática 3, caracterizada por apresentar clima ameno, com verões quentes e úmidos, e invernos pouco secos e frios, de acordo com a NBR 15220-3 (ABNT, 2005b).

O protótipo habitacional funciona como sede do Laboratório de Eficiência Energética e Sustentabilidade em Edificações (E3sLab) da UEL, onde alunos de graduação e pós-graduação desenvolvem suas atividades de pesquisa e monitoramento de algumas variáveis climáticas.

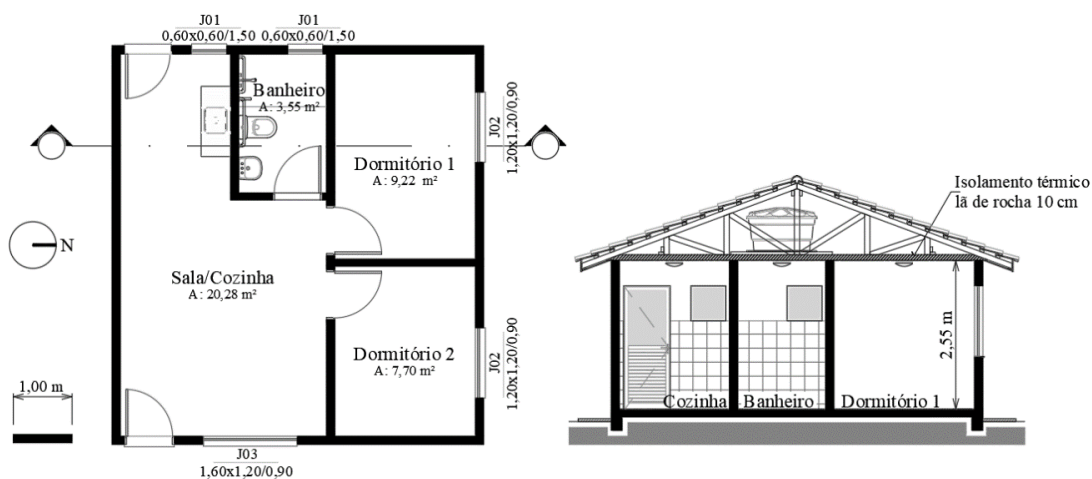
Figura 4 - Protótipo habitacional em estudo



Fonte: elaborado a partir de Google Maps (2020)

O protótipo é constituído por sala integrada com a cozinha, dois dormitórios e um banheiro, possuindo área útil de 40,75 m<sup>2</sup> e pé direito de 2,55 m, conforme a Figura 5.

Figura 5 - Planta baixa e corte da edificação



Fonte: adaptado de projeto cedido pela empresa TecVerde.

A envoltória da edificação é constituída por um sistema construtivo em *wood-frame* – DATec 020-C (BRASIL, 2017). As paredes são formadas por quadros estruturais de madeira serrada auto clavada. As faces externas das paredes da fachada são constituídas de placa cimentícia de 8 mm de espessura com revestimento

de textura acrílica e chapa OSB estrutural de 9,5 mm de espessura, enquanto as faces internas são formadas por chapas de gesso acartonado de 12,5 mm de espessura aplicadas sobre chapas de OSB de 9,5 mm de espessura. Os materiais constituintes da face interna e externa das paredes são fixados ao quadro estrutural. As paredes internas, que dividem os ambientes da edificação, têm suas faces constituídas por chapas de gesso acartonado de 12,5 mm de espessura aplicadas sobre chapas de OSB de 9,5 mm de espessura, fixadas no quadro estrutural.

O contato da edificação com o solo se dá por meio de um radier de concreto de 15 cm de espessura, com camada de concreto magro de 3,0 cm sobre camada de 30 cm de saibro compactado. Abaixo da camada de saibro encontra-se o terreno natural do local, compactado. Todos os ambientes possuem piso cerâmico assentado com argamassa de 5 mm de espessura sobre uma camada de argamassa de regularização de 2 cm.

A cobertura consiste em estrutura de madeira e telhas cerâmicas. O ático é do tipo não ventilado, e a edificação não possui laje. O forro é constituído por régua alveolares de PVC com 10 mm de espessura, sobrepostas por manta de isolamento termo acústico de lã de vidro de 8,9 cm de espessura.

As janelas são compostas por caixilhos metálicos, com 2 folhas de correr e vidro simples incolor de 3 mm, sem a presença de venezianas. Nos dormitórios, possuem dimensão de 1,20 m x 1,20 m; na sala, possui dimensão de 1,60 m x 1,20 m.

### 3.2 MONITORAMENTO DA TEMPERATURA DA INTERFACE ENTRE PISO E SOLO

Conforme apresentado na revisão de literatura, no *EnergyPlus*, alguns modelos de transferência de calor entre a edificação e solo utilizam a temperatura da superfície externa do piso como condição de contorno para realização dos cálculos de balanços térmicos (U.S. DEPARTMENT..., 2020c).

Para atingir o objetivo de compreender a transferência de calor entre a edificação e o solo e o funcionamento dos métodos disponíveis no *EnergyPlus*, foram realizadas medições da temperatura da superfície externa do piso do protótipo descrito anteriormente. Foi necessário perfurar o radier para permitir a instalação de

sensores no local adequado. Houve o cuidado para que os furos tivessem a menor dimensão possível e que permitissem a inserção dos sensores na superfície externa do piso. Na Figura 6 apresenta-se o processo de perfuração do piso.

Figura 6 - (a) perfuração do piso; (b) piso perfurado



As perfurações foram realizadas nos ambientes de permanência prolongada, sendo eles a sala/cozinha e os dois dormitórios, conforme ilustrado na Figura 7.

Figura 7 - Pisos perfurados nos ambientes:  
(a) Sala; (b) Dormitório 1; (c) Dormitório 2



Para realizar o monitoramento da temperatura do solo, foram utilizados sensores do tipo 12-bit *Temperature Smart Sensor*, de código S-TMB-M006, da marca *Onset*. Estes sensores possuem capacidade para medir temperaturas na faixa de -40°C a 100°C (quarenta graus Celsius negativos a cem graus Celsius), com acurácia de  $\pm 0,2^\circ\text{C}$  e resolução de  $0,03^\circ\text{C}$ , quando utilizados na faixa de temperatura entre  $0^\circ\text{C}$  e  $50^\circ\text{C}$ . A ponta do sensor é protegida por uma capa de aço inoxidável. A ponta e o cabo do sensor são classificados para imersão em solo ou água a uma temperatura máxima de  $50^\circ\text{C}$  (ONSET, 2017). O sensor descrito está apresentado na Figura 8.

Figura 8 - Sensores S-TMB-M006



Os sensores disponíveis para monitorar a temperatura do solo foram submetidos a um procedimento de calibração realizado pelo Laboratório de Metrologia SENAI de Londrina, Paraná, em 30/06/2014. De acordo com o laudo do laboratório, os sensores foram calibrados em meio termostático, e foram realizadas medições subsequentes das indicações de um sensor padrão e do termômetro em calibração. A diferença entre o valor de referência (sensor padrão) e o valor indicado do sensor em calibração foi considerado como o erro do sensor.

Após a calibração, os sensores calibrados foram devidamente armazenados e não foram utilizados até a realização desta pesquisa. Os sensores foram instalados no solo no dia 08/11/2019 e o monitoramento foi iniciado.

Cabe ressaltar que não foi possível realizar uma nova calibração dos sensores antes do início desta pesquisa. Dessa maneira, não é possível afirmar que os erros obtidos na calibração de 2014 ainda sejam válidos, sendo esta uma das limitações da pesquisa. Porém, antes de sua instalação no solo, os cinco sensores disponíveis para uso foram testados em conjunto, com o objetivo de verificar qualquer discrepância entre os resultados, conforme apresentado na Figura 9. Os erros de cada sensor, resultado do processo de calibração realizado pelo Laboratório de Metrologia SENAI de Londrina, foram considerados nesta etapa. Dessa maneira, foi possível escolher os três sensores cujas medições foram mais próximas entre si. Os sensores instalados e seus respectivos erros estão apresentados na Tabela 1.

Figura 9 - Teste inicial para verificar discrepância entre os sensores para medição de temperatura do solo

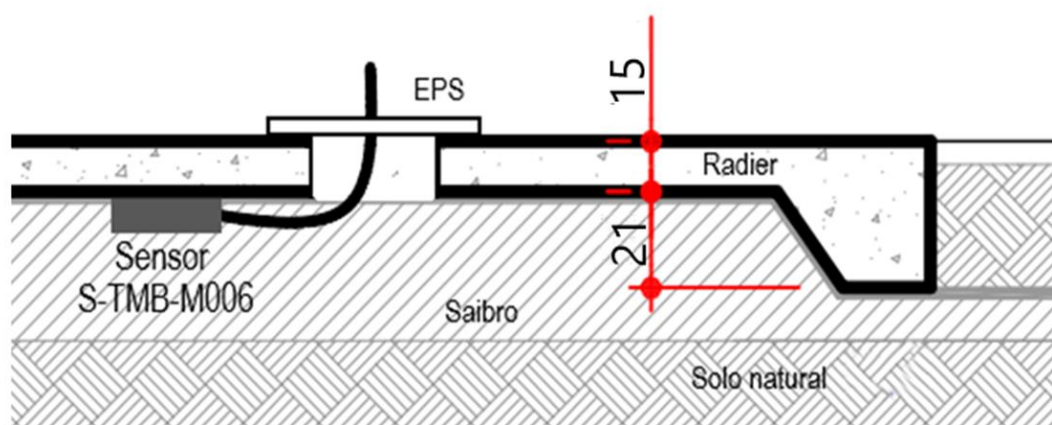


Tabela 1 - Erros dos sensores S-TMB-M006

		Dormitório 1 S-TMB-M006	Dormitório 2 S-TMB-M006	Sala S-TMB-M006
Erro	Até 30°C	0,064°C	0,124°C	0,305°C
	Até 50°C	0,678°C	0,397°C	0,656°C
	Até 70°C	0,650°C	0,260°C	0,528°C

Como descrito anteriormente, para permitir a medição da temperatura da superfície externa do piso da edificação, os sensores foram instalados na interface entre o radier e o solo. A Figura 10 apresenta um esquema da localização dos sensores em relação ao piso da edificação e ao solo.

Figura 10 - Esquema da instalação do sensor para medição da temperatura do solo



Após a instalação dos sensores, a abertura no piso foi fechada com a utilização de tampas de poliestireno expandido (EPS), de modo a garantir o isolamento térmico entre o solo e o ambiente da edificação. Para garantir que o sensor ficasse alocado sob a laje de piso e não sob a tampa de EPS, uma haste plástica foi utilizada como guia para sua inserção. Dessa maneira, garantiu-se que o sensor ficasse afastado cerca de 10 cm do local perfurado no piso.

Nesta etapa, ressalta-se que as condições originais de transferência de calor através do piso foram modificadas com as perfurações para a instalação dos sensores, embora cuidados tenham sido tomados com a vedação e posicionamento dos sensores. Além disso, não foi possível garantir que os sensores estivessem

posicionados em contato com a laje do piso para a medição exata da temperatura superficial. Assim, estas condições apresentam-se também como limitações da pesquisa.

Os sensores de temperatura instalados sob o piso de cada um dos ambientes foram ligados a um sistema de aquisição e armazenamento de dados HOBO U30, configurado para registrar os valores de temperatura do solo medidos a cada minuto. O início do monitoramento e registro das temperaturas do solo se deu em 08/11/2019 e transcorreu até 31/01/2021. O sistema que compõe o monitoramento da temperatura do solo está apresentado na Figura 11.

Figura 11 – (a) sensor S-TMB-M006 com haste para facilitar sua inserção sob o piso; (b) furo e tampa de EPS para isolamento; (c) sistema de monitoramento montado com registrador de dados HOBO U30.



### 3.3 CALIBRAÇÃO DO MODELO COMPUTACIONAL

Em análises de desempenho termoenergético de edificações, a calibração do modelo computacional é importante para diminuir os erros existentes nas simulações e é realizada em diversas pesquisas (PEREIRA, 2009; BATISTA, LAMBERTS, GÜTHS, 2011; COSTA, 2017). De acordo com Westphal (2007), no caso em que se estudam edificações existentes, a calibração envolve o ajuste dos dados de entrada de maior incerteza no modelo, de modo a obter resultados próximos ao desempenho da edificação real, que pode ser medido através de parâmetros, como consumo de energia elétrica e temperatura interna dos ambientes. No caso do protótipo habitacional analisado neste estudo, a calibração é especialmente

importante pois a edificação está submetida a características particulares que podem influenciar significativamente o resultado das simulações.

Neste estudo, a calibração envolveu a medição de variáveis no protótipo habitacional, como a temperatura do solo e a temperatura do ar dos ambientes internos, e a simulação do modelo computacional. Com base na comparação entre os valores obtidos por simulação e os valores medidos para uma mesma variável, foi possível observar a capacidade do modelo computacional em representar a edificação real. O processo de calibração, então, permitiu ajustar parâmetros do modelo computacional de modo a aproximar os valores simulados dos valores medidos.

Para calibrar um modelo computacional é importante determinar uma metodologia que ajude a garantir que o processo se desenvolva de maneira que, a cada etapa de calibração, os resultados do modelo se aproximem dos dados reais. Westphal e Lamberts (2005) propuseram uma metodologia para calibração de um edifício existente em que se analisa o consumo de energia de uso final e se aplica análise de sensibilidade para encontrar quais parâmetros são mais influentes para o resultado da simulação. Dessa maneira, os autores conseguiram classificar os parâmetros e ajustar aqueles que possuem alto nível de influência.

Pereira e Ghisi (2008) também fizeram a calibração de um modelo computacional comparando-o com uma edificação real, através da análise dos valores de temperatura média do ar no interior dos ambientes. A metodologia adotada pelos autores envolveu a escolha de dias significativos para análise, ou seja, dias que apresentaram estabilidade e semelhança no comportamento térmico da edificação. Dessa maneira, os autores realizaram diversas simulações alterando um parâmetro por vez e analisando a diferença média entre os resultados simulados e medidos. Quando o resultado era considerado satisfatório, a alteração era mantida nas simulações seguintes (PEREIRA; GHISI, 2008). Galvarro *et al.* (2013) recomendam o procedimento de alterar os parâmetros de forma gradual, definido pelos autores como calibração em série. No caso da calibração em paralelo, em que os parâmetros são alterados de maneira isolada e, ao fim do processo, todas as alterações são incorporadas em um único modelo, há a possibilidade de acumulação de erros (GALVARRO *et al.*, 2013).

Raftery, Keane e O'Donnell (2011) propuseram uma metodologia de calibração baseada em evidências, em que as mudanças nos parâmetros de entrada devem ser feitas seguindo uma hierarquia de acordo com sua confiabilidade. Os

autores recomendaram que os primeiros parâmetros alterados fossem baseados na observação direta, ou seja, valores que poderiam ser medidos ou observados na edificação existente.

Devido às características particulares às quais a edificação está submetida, o processo de calibração foi dividido em duas etapas principais. A primeira envolveu as medições de variáveis no protótipo habitacional, etapa na qual ocorreu a instalação de sensores e preparação de equipamentos. Na segunda etapa, configurou-se um modelo computacional da edificação, o qual foi submetido a um processo de calibração baseado nas metodologias apresentadas nos estudos citados.

Todas as etapas da calibração serão descritas detalhadamente a seguir.

### **3.3.1 Medições**

O processo de calibração envolveu a comparação de variáveis medidas no objeto de estudo com variáveis obtidas por meio de simulação computacional. Sendo assim, além da medição da temperatura da superfície externa do piso, descrita na seção 3.2, para realizar o procedimento de calibração do modelo computacional foi realizado o monitoramento da temperatura e umidade relativa do ar nos ambientes internos do protótipo habitacional, bem como em seu exterior.

O período de monitoramento da edificação para o procedimento de calibração do modelo computacional principal foi de 36 dias, entre 19/03/2020 e 23/04/2020.

Para realizar as medições, foram utilizados dois modelos de registradores de dados da marca *Onset*: HOB0® U12-012, para monitorar os ambientes internos, e HOB0® U10-003 para monitorar o exterior. Os equipamentos estão apresentados na Figura 12. As principais características dos registradores são apresentadas na Tabela 2.

Figura 12 - a) HOBO® U12-012; b) HOBO® U10-003

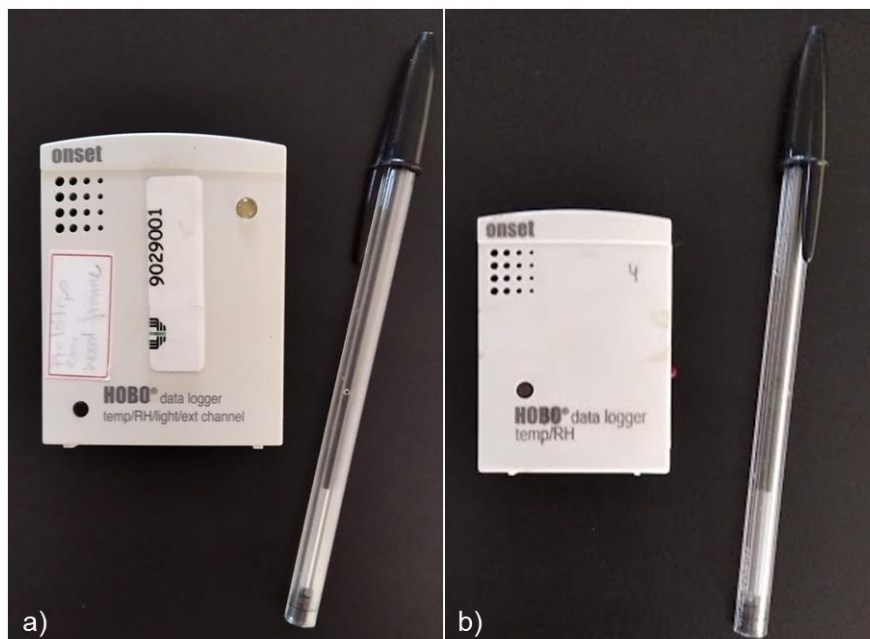


Tabela 2 - Propriedades dos registradores de dados

	HOBO U12-012		HOBO U10-003	
	Acurácia	Resolução	Acurácia	Resolução*
Temperatura	± 0,35°C	0,03°C	± 0,53°C	0,14°C
Umidade relativa (UR)	± 2,5%	0,05%	± 3,5% (25%-85%) ± 5,0% (25%-95%)	0,07%

\*condições: 25°C e UR=30%

Fonte: ONSET (2016) e ONSET (2012)

O registrador de dados HOBO® U10-003, utilizado para monitorar e registrar a temperatura e umidade relativa do ar externo, foi configurado para medir e registrar os valores a cada 15 minutos. Como no ambiente externo o registrador de dados fica submetido às intempéries e ao efeito da radiação solar, o que pode influenciar na precisão dos dados medidos, utilizou-se um abrigo para sua proteção. O abrigo foi criado a partir da adaptação de uma luminária para ambientes externos, cujas superfícies laterais de vidro foram substituídas por placas opacas de cor branca na parte externa. Em sua base foi instalada uma malha feita com fitas adesivas para proteger o registrador de dados de eventual queda.

O abrigo permite a circulação de ar em torno do registrador, uma vez que possui aberturas na parte superior, em todos os lados, e na parte inferior. Ao mesmo

tempo, o abrigo protege o registrador da incidência direta da radiação solar. O abrigo foi instalado na fachada leste da edificação, sobre a porta da sala, e está apresentado na Figura 13.

Figura 13 - Detalhe do abrigo para monitoramento externo



Os registradores de dados HOBO® U12-012 foram utilizados para monitorar a temperatura e umidade relativa do ar interno dos dormitórios e da sala, e foram configurados para medir e registrar os dados a cada 15 minutos. Os sensores foram instalados sem nenhum tipo de proteção contra radiação, fixados ao forro dos ambientes por meio de cabos, a uma distância aproximada de 1,80 m do piso, conforme apresentado na Figura 14.

Figura 14 - Medição da temperatura e umidade relativa do ar interno:  
(a) Sala; (b) Dormitório 1; (c) Dormitório 2.



Os sistemas de aquisição e armazenamento dos dados foram alocados em pontos estratégicos da edificação, conforme descrito anteriormente, de modo a permitir o monitoramento das variáveis temperatura e umidade relativa do ar. A Figura 15 apresenta um esquema ilustrativo da localização dos sensores na edificação, enquanto a Figura 16 resume os equipamentos utilizados em cada ambiente.

Figura 15 - Localização dos equipamentos de medição na edificação

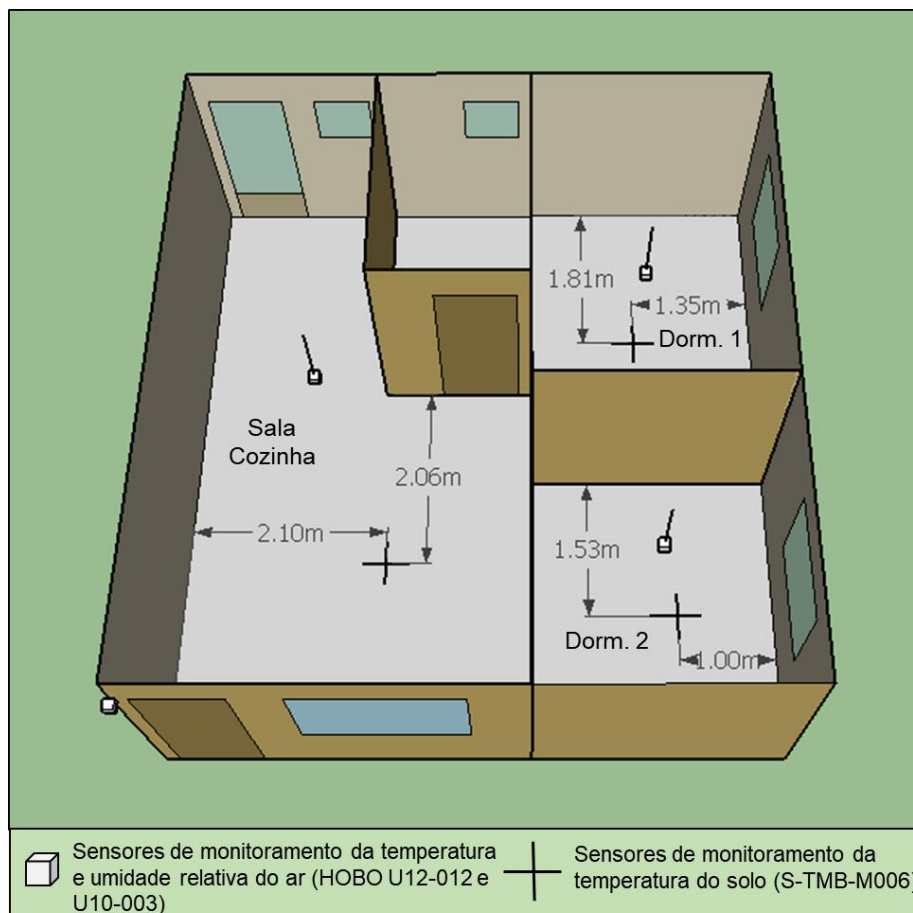


Figura 16 - Sensores utilizados nas medições



Durante o início do período de monitoramento, eventos relativos ao uso e ocupação do protótipo habitacional foram registrados. Operação de portas e janelas, utilização de iluminação artificial, presença de pessoas nos ambientes e equipamentos elétricos em uso foram monitorados diariamente. Posteriormente, devido ao período de pandemia vivenciado ao longo deste estudo, o uso do protótipo ficou condicionado apenas ao desenvolvimento da pesquisa, o que facilitou o controle da operação do espaço.

### **3.3.2 Simulações Computacionais**

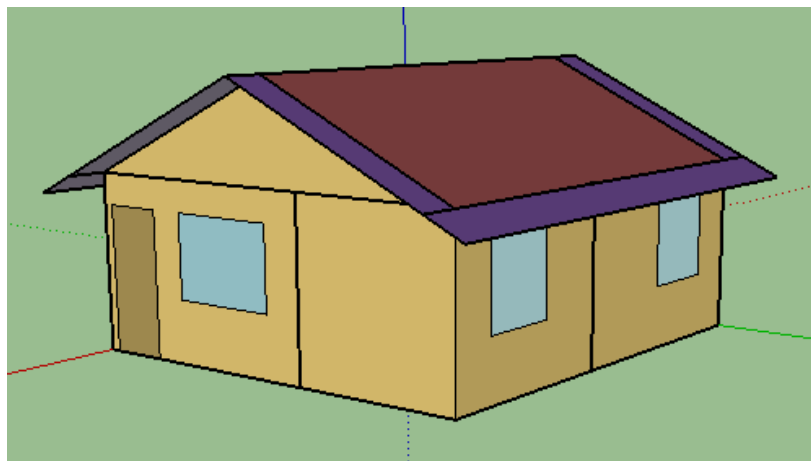
As simulações foram realizadas no programa *EnergyPlus* a partir de um caso base, que é o modelo computacional que descreve o protótipo habitacional conforme o monitoramento realizado entre os dias 19/03/2020 e 23/04/2020. Este caso base foi alterado conforme o processo de calibração avançou, buscando representar da maneira mais fiel possível o protótipo habitacional.

#### **3.3.2.1 Configuração do caso base para a calibração do modelo principal**

O caso base foi modelado com base nas informações das propriedades termofísicas dos materiais constituintes da edificação presentes no DATec 020-C (BRASIL, 2017). Além disso, o caso base levou em consideração os eventos ocorridos durante o período de monitoramento.

A edificação foi modelada no programa *Sketchup*, versão 2017, de acordo com suas características geométricas, conforme Figura 17. Com o auxílio do *plugin OpenStudio*, versão 2.9, foi possível configurar zonas térmicas para cada ambiente e criar um arquivo do modelo computacional configurável dentro do programa *EnergyPlus*.

Figura 17 - Modelo computacional da edificação



Em simulações computacionais para análise de desempenho termoenergético, é comum a utilização do arquivo climático do local onde a edificação em estudo está localizada. Quando a cidade em análise não possui arquivo climático, utilizam-se arquivos climáticos de cidades com climas semelhantes para estimar o comportamento da edificação. Há ainda a possibilidade de inserir algumas variáveis climáticas de maneira manual no modelo computacional.

No caso desta pesquisa, optou-se por inserir as variáveis climáticas manualmente, baseadas nas medições ocorridas no período de realização do estudo. Para isso, o modelo computacional necessitou de alterações específicas. A mais importante delas, com relação à inserção de variáveis climáticas, foi a utilização do objeto *SizingPeriod:DesignDay*, por meio do qual o *EnergyPlus* permite que o usuário configure dias completos com agendas horárias de dados meteorológicos, especificamente temperatura e umidade relativa do ar, radiação solar, pressão barométrica e velocidade e direção do vento (U.S. DEPARTMENT..., 2020c). Para a calibração do modelo computacional, as variáveis climáticas temperatura e umidade relativa do ar e radiação solar, registradas nos dias de monitoramento, foram inseridas em agendas específicas com periodicidade horária. Já a velocidade e direção do vento e pressão barométrica foram inseridas em médias diárias. Então, a simulação é rodada para cada dia de monitoramento conforme as agendas configuradas.

Quando se utiliza o objeto *SizingPeriod:DesignDay*, no início do primeiro dia do período a temperatura da zona e das superfícies são reconfiguradas para 23°C, enquanto a umidade relativa das zonas é reconfigurada para o valor da umidade relativa externa (U.S. DEPARTMENT..., 2020b). No funcionamento do programa, este

primeiro dia é repetido até que as temperaturas atinjam uma determinada convergência de tolerância, num processo chamado de *warmup convergence*. Em simulações com grande número de dias, como simulações de período anual, possíveis problemas de convergência inicial serão corrigidos durante os dias da simulação, e os efeitos serão minimizados. Entretanto, em simulações com menor número de dias, problemas de convergência no início da simulação podem resultar em grandes erros (U.S. DEPARTMENT..., 2020b).

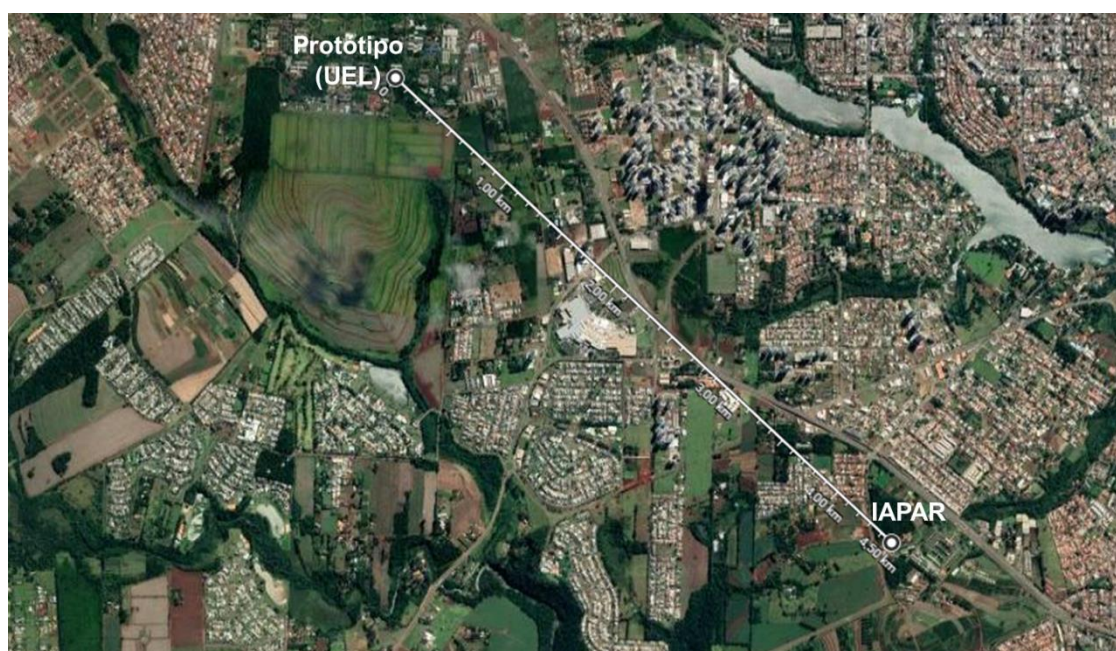
Embora o *EnergyPlus* possua um processo de checagem de convergência integrado à sua rotina de cálculos, neste estudo optou-se por adotar na calibração do modelo principal uma sequência de quatro dias de monitoramento que antecedem o período de calibração, com intuito de minimizar os erros provenientes de problemas na convergência da simulação. Desta forma, o período efetivo de calibração contempla 32 dias, entre 23/03/2020 e 23/04/2020.

A temperatura e umidade relativa do ar inseridos no modelo computacional foram medidos por um registrador de dados HOBO® U10-003 instalado em um abrigo na parte externa do protótipo habitacional, conforme descrito na seção 3.3.1.

Os dados de pressão barométrica, inseridos nas agendas do objeto *SizingPeriod:DesignDay* em média diária, foram obtidos a partir de medição em estação meteorológica convencional localizada em Londrina, Paraná, cujos dados são disponibilizados no banco de dados do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET.

Os dados de velocidade e direção do vento, inseridos em valores horários nas agendas do objeto *SizingPeriod:DesignDay*, foram obtidos por meio de medição na estação meteorológica automática do Instituto Agrônomo do Paraná - IAPAR, localizada na cidade de Londrina, Paraná. A estação meteorológica do IAPAR está localizada em um terreno a cerca de 4,5 km do local onde está situado o protótipo habitacional em estudo, conforme pode ser observado na Figura 18. Na impossibilidade de medir a velocidade e direção do vento no entorno da edificação, os dados provenientes da estação do IAPAR foram considerados representativos para este estudo.

Figura 18 - Distância entre o protótipo habitacional e a estação meteorológica automática do IAPAR



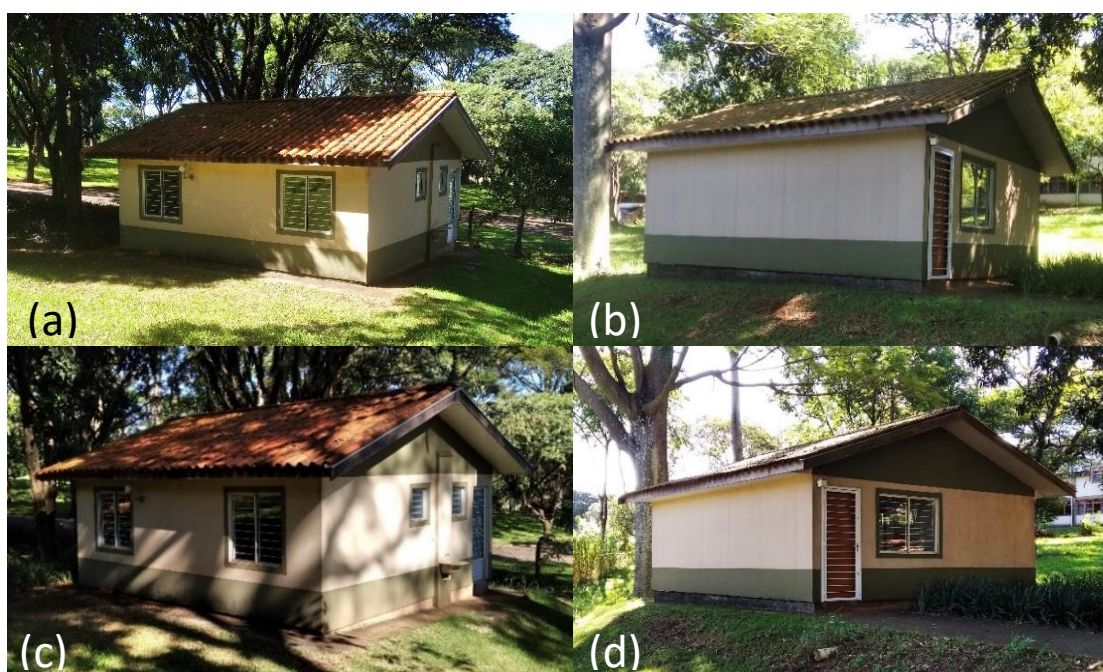
Fonte: Elaborado a partir de Google Maps (2020)

Os dados de radiação solar global no plano horizontal também foram obtidos da estação meteorológica automática do IAPAR. Porém, o objeto *SizingPeriod:DesignDay* demanda a inserção de agendas específicas para a parcela de radiação solar difusa e para a parcela de radiação solar direta. Existem alguns métodos que permitem estimar as parcelas da radiação solar a partir da radiação global, como a correlação de Erbs *et al.* (1982), que depende basicamente do dia do ano, da latitude do local analisado, e do índice de claridade horário (DUFFIE; BECKMAN, 2006). O *EnergyPlus* também fornece ao usuário a opção de calcular as parcelas difusa e direta da radiação solar a partir da radiação global por meio do modelo de Perez, embutido em um programa auxiliar chamado *Weather Converter* (U.S. DEPARTMENT..., 2020a).

No caso do protótipo habitacional em estudo, no período de monitoramento desta etapa da calibração, foi observado que as árvores do entorno eram responsáveis pelo sombreamento da maior parte da envoltória, durante todas as horas do dia, conforme mostra a Figura 19. Dessa maneira, considerando que as correlações e métodos para desmembrar as parcelas difusa e direta da radiação solar a partir da radiação global são estimativas desenvolvidas em regiões de

características geográficas diferentes do local do presente estudo, optou-se por arbitrar que a radiação solar que atinge a envoltória do edifício é composta por 80% de radiação solar difusa e 20% de radiação solar direta. Sendo assim, a radiação solar global no plano horizontal, obtida da estação automática do IAPAR foi utilizada seguindo a relação 80/20 para radiação difusa/direta.

Figura 19 – (a) Fachada norte e oeste, dia 23/05/2020, 10h00;  
(b) Fachada sul e leste, dia 23/05/2020, 10h00;  
(c) Fachada norte e oeste, dia 04/04/2020, 16h00;  
(d) Fachada sul e leste, dia 04/04/2020, 16h00.



Em relação à envoltória da edificação, os painéis de paredes, cobertura, pisos e aberturas foram configurados de acordo com as características descritas na seção 3.1. Como o *EnergyPlus* realiza os cálculos apenas para camadas homogêneas, as camadas heterogêneas do sistema *wood-frame* foram transformadas em camadas homogêneas de resistência equivalente, conforme Zara, Santos e Giglio (2018).

Uma vez que não foi possível medir a absorvância solar das superfícies da edificação, os valores adotados nesta pesquisa foram os definidos pela NBR 15220-2 (ABNT, 2005a). A absorvância solar da cobertura foi definida como 0,75, para telha de barro. A absorvância solar das paredes foi adotada como 0,46, valor adotado por meio da ponderação das áreas da fachada que possuem duas cores de textura:

verde escuro, com absorvância solar 0,70; e bege, com absorvância solar 0,25, que representa o valor intermediário entre as cores branca e amarela.

Os valores de transmitância e capacidade térmica foram obtidos conforme a NBR 15220-2 (ABNT, 2005a), e as propriedades termofísicas dos componentes da edificação que foram utilizadas para a configuração do modelo computacional estão apresentados na Figura 20 e na Tabela 3.

Figura 20 - Configuração dos elementos da envoltória

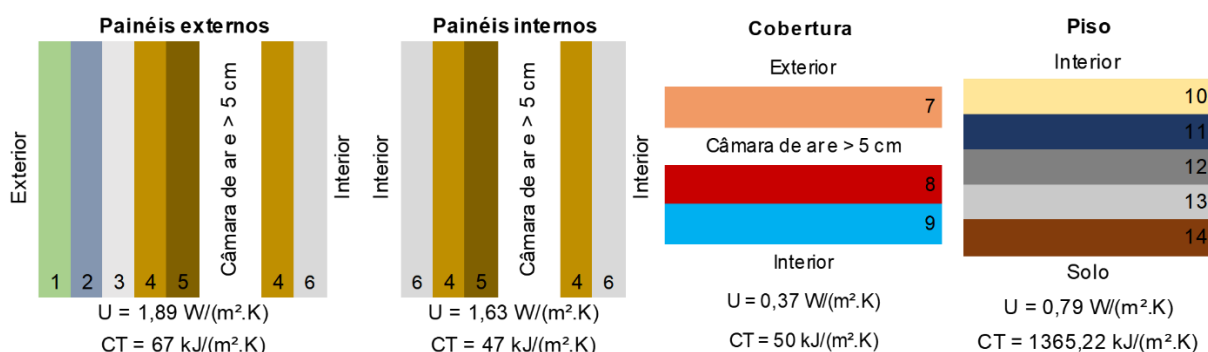


Tabela 3 - Propriedades termofísicas dos componentes das paredes, cobertura e piso

	Material	Espessura [m]	Condutividade térmica [W/(m·K)]	Calor específico [kJ/(kg·K)]	Densidade [kg/m <sup>3</sup> ]
1	Acabamento em textura acrílica	0,003	1,15	1,00	2.000,00
2	Argamassa polimérica base coat	0,003	1,15	1,00	2.000,00
3	Placa cimentícia	0,008	1,75	1,00	1.700,00
4	Placa OSB	0,0095	0,17	2,30	681,00
5	Madeira Pinus (equivalente)	0,0019/ 0,0023	0,15	1,34	664,00/ 831,00
6	Gesso acartonado	0,0125	0,35	0,84	750,00
7	Telha cerâmica	0,02	0,90	0,92	2.000,00
8	Lã de vidro	0,089	0,045	0,70	10,53
9	Forro PVC	0,01	0,20	0,96	1.300,00
10	Piso cerâmico	0,01	0,90	0,92	1.600,00
11	Argamassa de assentamento do piso	0,025	1,15	1,00	2.000,00
12	Concreto do radier	0,15	1,75	1,00	2.200,00
13	Brita	0,03	0,70	0,80	1250,00
14	Saibro	0,3	0,30	2,09	1500,00

Fonte: Baseado em (ABNT, 2005a) e Zara, Santos e Giglio (2018)

Para a consideração do contato da edificação com o piso, utilizou-se o objeto *Site:GroundTemperature:BuildingSurface*. Neste objeto, deve-se inserir um único valor mensal de temperatura do solo, que será representativo de todos os ambientes que possuem contato direto com o solo. As temperaturas da superfície externa do piso medidas no período de monitoramento foram utilizadas. A utilização deste objeto foi adotada uma vez que a temperatura do solo abaixo da edificação não apresentou grandes amplitudes dentro de um mês.

Como a medição da temperatura do solo foi realizada de forma independente para cada ambiente de permanência prolongada da edificação, o valor adotado no modelo computacional foi a média simples das temperaturas medidas para cada ambiente. A opção pela adoção da média simples se deu pelo fato de que a variação da temperatura do solo entre os ambientes foi pouco significativa. As temperaturas médias do solo adotadas para a simulação do modelo foram de 24,72°C e 23,53°C, para os meses de março e abril, respectivamente.

Por fim, no objeto *Schedule:Compact* foram inseridos os eventos relativos à ocupação da edificação, abertura de portas e janelas, utilização de equipamentos e iluminação artificial. Durante o período de monitoramento, o protótipo habitacional foi mantido fechado na maior parte do tempo devido à pandemia do novo coronavírus. A ocupação ocorreu apenas nos dias de retirada de dados dos registradores, realizada sempre por apenas uma pessoa. Dessa maneira, foi possível controlar minuciosamente o manuseio de portas e janelas, os equipamentos em uso e a utilização da iluminação artificial, conforme apresentado no Quadro 1.

A iluminação artificial, constituída por duas lâmpadas LED de 12W de potência, foi utilizada apenas na sala/cozinha. Em relação à utilização de equipamentos, o protótipo habitacional possui um frigobar (70W) e um filtro de água (154 W) na cozinha, um registrador de dados ligado a uma fonte de alimentação (25W) no dormitório 1, e um aparelho roteador de internet wireless (30W) no dormitório 2, todos funcionando ininterruptamente durante o período de monitoramento. Além destes, foi utilizado um notebook (95W) durante os dias de coleta de dados, conforme apresentado no item (3) do Quadro 1.

Quadro 1 - Eventos da calibração entre 19/03/2020 e 23/04/2020

Aquecimento				Calibração					
	Dia 01 19/mar	Dia 02 20/mar	Dia 03 21/mar	Dia 04 22/mar	Dia 05 23/mar	Dia 06 24/mar	Dia 07 25/mar	Dia 08 26/mar	Dia 09 27/mar
(1)	x	10h-11h	x	x	9h-10h	x	16h-18h	x	8h-10h
(2)	x	10h-11h	x	x	9h-10h	x	16h-18h	x	8h-10h
(3)	x	10h-11h	x	x	9h-10h	x	16h-18h	x	8h-10h
(4)	x	10h-11h	x	x	x	x	16h-17h	x	x
Calibração									
	Dia 10 28/mar	Dia 11 29/mar	Dia 12 30/mar	Dia 13 31/mar	Dia 14 01/abr	Dia 15 02/abr	Dia 16 03/abr	Dia 17 04/abr	Dia 18 05/abr
(1)	x	x	x	8h-9h	x	x	16h-17h	x	x
(2)	x	x	x	8h-9h	x	x	16h-17h	x	x
(3)	x	x	x	8h-9h	x	x	16h-17h	x	x
(4)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Calibração									
	Dia 19 06/abr	Dia 20 07/abr	Dia 21 08/abr	Dia 22 09/abr	Dia 23 10/abr	Dia 24 11/abr	Dia 25 12/abr	Dia 26 13/abr	Dia 27 14/abr
(1)	9h-10h	9h-10h	x	x	15h-16h	x	x	9h-10h	x
(2)	9h-10h	x	x	x	x	x	x	x	x
(3)	9h-10h	9h-10h	x	x	15h-16h	x	x	9h-10h	x
(4)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Calibração									
	Dia 28 15/abr	Dia 29 16/abr	Dia 30 17/abr	Dia 31 18/abr	Dia 32 19/abr	Dia 33 20/abr	Dia 34 21/abr	Dia 35 22/abr	Dia 36 23/abr
(1)	9h-10h	x	16h-17h	x	x	x	10h-11h	x	x
(2)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
(3)	9h-10h	x	16h-17h	x	x	x	10h-11h	x	x
(4)	x	x	x	x	x	x	x	x	x

(1) Ocupação  
(2) Iluminação da Sala \*      \* demais ambientes sem iluminação artificial  
(3) Equipamentos \*\*      \*\* equipamentos permanentes funcionaram  
(4) Ventilação \*\*\*      \*\*\* ventilação pela porta da cozinha: 20/mar 10h-11h

Para considerar a ventilação natural utilizou-se o objeto *AirFlow Network*, com as configurações padrão do *EnergyPlus*. As janelas dos ambientes permaneceram fechadas durante todo o período de monitoramento. Foi registrado apenas um evento de ventilação, no dia 20/03/2020, quando houve ventilação durante o período de uma hora, através do postigo da porta da cozinha, localizada na fachada oeste da edificação.

### 3.3.2.2 Critério de calibração e validação dos modelos

Para avaliar a capacidade dos modelos computacionais de representar o comportamento do protótipo habitacional frente às condições climáticas, as

temperaturas do ar dos ambientes monitorados foram comparadas com as temperaturas operativas<sup>5</sup> simuladas no *EnergyPlus* para os mesmos ambientes. Para isso, utilizou-se a raiz do erro quadrático médio (RMSD), conforme a Equação 2:

$$RMSD = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_{sim} - X_{obs})^2} \quad (2)$$

Onde:

$X_{sim}$  é o valor da temperatura operativa do ar, obtido por simulação;

$X_{obs}$  é o valor da temperatura média do ar interno, obtido por medição;

$N$  é o número de amostras.

A RMSD deriva de uma medida comumente usada na verificação da acurácia de modelos numéricos, o Erro Quadrático Médio, que é um indicador sensível aos grandes erros pelo fato de elevar as diferenças individuais ao quadrado (HALLAK; PEREIRA FILHO, 2011). De acordo com Hallak e Pereira Filho (2011), a RMSD é frequentemente utilizada para expressar a acurácia de resultados numéricos de simulações e possui a vantagem de apresentar valores do erro na mesma dimensão da variável analisada.

O caso base foi simulado e, com as temperaturas internas obtidas, foram calculadas as RMSD para cada ambiente da edificação. Então, o processo de calibração consistiu na alteração de parâmetros do modelo computacional e na realização de uma nova simulação, avaliando a RMSD obtida. A redução da RMSD significou aproximação entre os valores medidos e os valores simulados, o que representa aproximação do modelo computacional simulado do protótipo habitacional existente. Portanto, alterações que resultaram em elevação da RMSD foram descartadas, ao passo que alterações que reduziram a RMSD foram mantidas no modelo calibrado.

Para nortear as alterações nas primeiras etapas de calibração, foi feita a adequação do modelo computacional a partir de vistoria no protótipo habitacional em

---

<sup>5</sup> A temperatura operativa é o valor médio entre a temperatura do ar e a temperatura radiante média do ambiente. Como os registradores de dados utilizados nos ambientes internos da edificação não possuem proteção contra a radiação, neste estudo adotou-se que a temperatura operativa é a que melhor representa a temperatura medida. Além disso, análises preliminares foram realizadas e a temperatura operativa do ar simulada se mostrou mais próxima das temperaturas medidas do que a temperatura média do ar simulada.

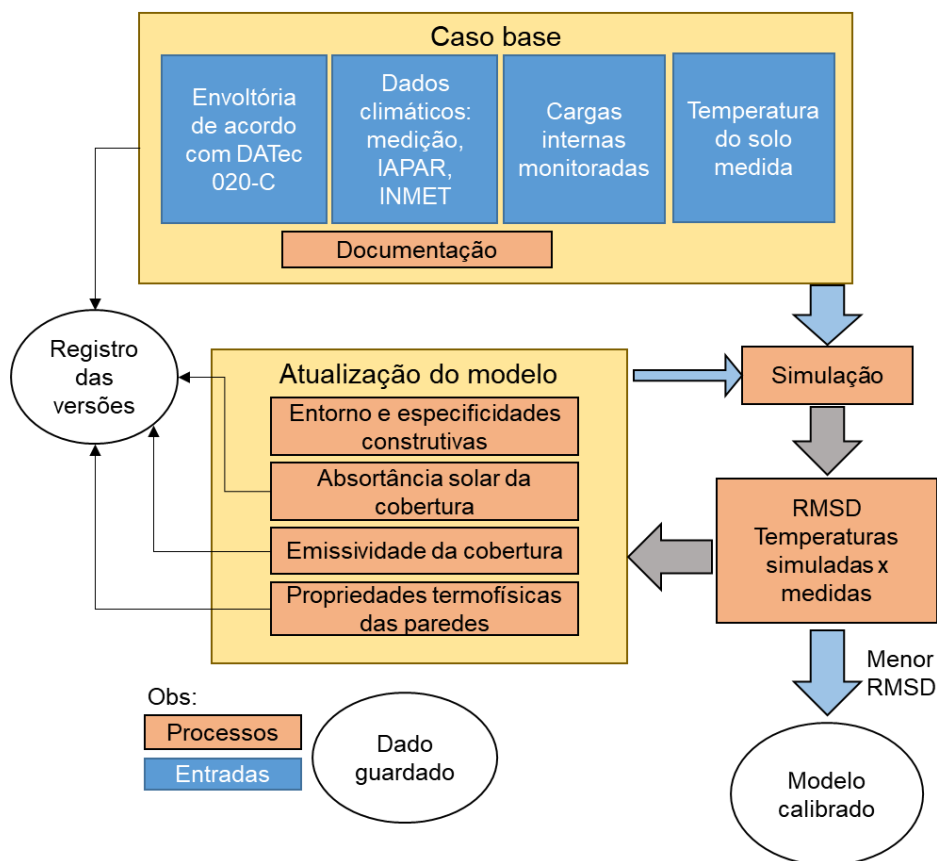
estudo. Particularidades do entorno e especificidades construtivas presentes na edificação e não contempladas no projeto foram incluídas ao modelo computacional, e o resultado foi avaliado. A hierarquia para a alteração dos parâmetros seguiu a confiabilidade dos dados, conforme sugerido por Raftery, Keane e O'Donnell (2011). Ou seja, parâmetros que podem ser medidos ou observados com precisão no modelo real foram alterados inicialmente.

Além disso, as demais alterações foram baseadas em estudos que apontaram quais parâmetros são mais influentes no resultado de simulações termoenergéticas.

Silva e Ghisi (2013) estudaram 15 parâmetros termofísicos por meio de análise de sensibilidade e concluíram que, embora os parâmetros mais influentes no desempenho termoenergético da edificação sejam diferentes para as condições de verão e inverno, em geral a absorvância solar da cobertura e sua emissividade foram os parâmetros mais influentes. Silva, Almeida e Ghisi (2017) analisaram incertezas físicas na simulação computacional de edificações e seu impacto no desempenho térmico. Os autores encontraram que a absorvância solar da cobertura e o calor específico da argamassa das paredes foram influentes no desconforto por calor, e as propriedades termofísicas das paredes foram influentes no desconforto por frio.

Dessa maneira, o processo de calibração envolveu também a modificação dos parâmetros citados. As modificações ocorreram de forma isolada e conjunta. De acordo com os valores de RMSD obtidos para cada etapa, decidiu-se sobre a manutenção ou não das alterações realizadas. O modelo calibrado foi aquele cuja combinação dos parâmetros modificados proporcionou o menor valor de RMSD. A Figura 21 apresenta o esquema do processo de calibração.

Figura 21 - Representação esquemática do processo de calibração



Fonte: baseado em Raftery, Keane e O'Donnel (2011)

O modelo calibrado permitiu uma análise mais representativa dos resultados das etapas seguintes, em que as temperaturas da superfície externa do piso obtidas por simulação foram comparadas com as temperaturas medidas.

### 3.3.2.3 Etapas da calibração

Para organização do processo de calibração, o primeiro modelo testado foi chamado de *v0*. A partir do modelo *v0* foram configurados mais dois modelos: *v0.1* e *v0.2*. Neles, o parâmetro alterado foi a parcela da radiação solar. Enquanto o modelo *v0* utilizou a relação 80/20 para as parcelas difusa/direta, o modelo *v0.1* utilizou a relação 90/10 e o modelo *v0.2* utilizou a relação 100/0.

Durante o período de calibração, as condições relativas à operação das portas e janelas foram totalmente controladas pelo fato de o Laboratório de Eficiência

Energética e Sustentabilidade em Edificações (E3sLab), que funciona no protótipo habitacional em estudo, estar fechado devido à pandemia do novo coronavírus.

Após vistoria em todas as aberturas, em algumas delas foram observadas frestas que não vedavam a passagem de ar. Destaca-se a porta de alumínio, localizada na sala/cozinha, na fachada oeste da edificação, com grandes frestas e vedação insatisfatória. Dessa maneira, decidiu-se modificar os parâmetros de infiltração de ar pelas aberturas para prosseguir com a calibração.

Com base no modelo *v0*, configurou-se o modelo *v1*, no qual algumas propriedades do objeto *Airflow Network* foram modificadas. Para considerar a infiltração de ar pelas frestas, os coeficientes de fluxo de ar quando a abertura está fechada foram alterados. Todos os coeficientes estavam configurados com o valor padrão do *EnergyPlus*, de 0,001 kg/m.s. Para a porta de madeira, localizada na sala/cozinha, na fachada leste, foi atribuído o valor de 0,0016 kg/m.s e para a porta metálica e postigo, na fachada oeste, foi atribuído 0,0332 kg/m.s, conforme descrito em LabEEE (2019). O expoente de fluxo de ar também foi alterado. Para todas as portas adotou-se 0,65, e para as demais aberturas manteve-se o valor padrão igual a 0,5.

Para verificar a influência da ventilação natural, ainda foram testados mais três modelos computacionais: *v1.1*, *v1.2* e *v1.3*. No modelo *v1.1*, foi configurada uma abertura na porta de alumínio da fachada oeste, com 2 cm de altura, e largura igual à da porta. A abertura foi configurada para permitir a entrada de ar durante todo o período da calibração, de modo a simular a condição real da porta no protótipo habitacional. As demais configurações foram mantidas conforme o modelo *v1*. Os modelos *v1.2* e *v1.3* foram configurados para investigar a influência do coeficiente de fluxo de ar nos resultados. Para isso, o coeficiente foi alterado para 0,05 kg/m.s, no modelo *v1.2*, e 0,1 kg/m.s no modelo *v1.3*.

Na etapa seguinte, com base no modelo *v1* foi feita a configuração do modelo computacional *v2* para considerar a influência do sombreamento proporcionado pelas árvores presentes no entorno do protótipo habitacional. Observou-se no local que a fachada leste e a fachada sul, bem como a cobertura, ficam sombreadas durante quase todo o dia. Sendo assim, no objeto *BuildingSurface:Detailed*, as superfícies da cobertura e das fachadas citadas foram configuradas para não serem expostas à radiação solar. O modelo *v2* ainda foi

modificado com a adoção do coeficiente de fluxo de ar igual a 0,1 kg/m.s, gerando o modelo v2.1.

A partir do modelo v2.1, as modificações foram feitas nas propriedades termofísicas dos elementos da envoltória, apontadas como fator de grande influência no resultado de simulações computacionais. Com base no modelo v2, configurou-se um modelo v3 para considerar os diferentes tipos de vidro presentes na edificação. Nos modelos anteriores, todos os vidros foram configurados como sendo do tipo simples, com espessura de 3 mm, transmitância térmica igual a 5,70 W/m<sup>2</sup>.K e Fator Solar igual a 0,87. No protótipo habitacional, entretanto, as janelas da sala/cozinha e do banheiro, bem como o postigo da porta da sala/cozinha, todas na fachada oeste, possuem vidro do tipo impresso/fantasia. Sendo assim, modificou-se o Fator Solar para 0,70.

Com base no modelo v3, foram configurados os modelos v4 e v4.1, nos quais absorvância solar das paredes externas foi alterada. A partir do modelo v4.1 foram configurados os modelos v5 e v5.1, nos quais foram modificadas as propriedades dos materiais constituintes das paredes, especificamente a densidade das placas OSB e a densidade do gesso acartonado, respectivamente. No DATec 020-C (BRASIL, 2017) esses valores não são especificados. O modelo base trazia a densidade do OSB igual a 681 kg/m<sup>3</sup> e do gesso acartonado igual a 750 kg/m<sup>3</sup>.

Para configurar o modelo v5 utilizou-se como referência o catálogo técnico da LP OSB (LP OSB, 2017), no qual placas de OSB de 9,5 mm de espessura possuem densidade igual a 640 kg/m<sup>3</sup>. Com essa modificação, a condutividade térmica do material também se altera, de 0,17 para 0,14 W/m.K. Para configurar o modelo v5.1 utilizou-se o valor máximo de densidade para o gesso acartonado presente na NBR 15220-2 (ABNT, 2005a), igual a 1000 kg/m<sup>3</sup>. Com base nos modelos v5 e v5.1 configurou-se o modelo v5.2, que mesclou as modificações dos dois modelos anteriores. Além disso, os modelos v5, v5.1 e v5.2 também foram testados com o valor de absorvância solar do caso base, igual a 0,46, sendo denominados de modelos v5.3, v5.4 e v5.5.

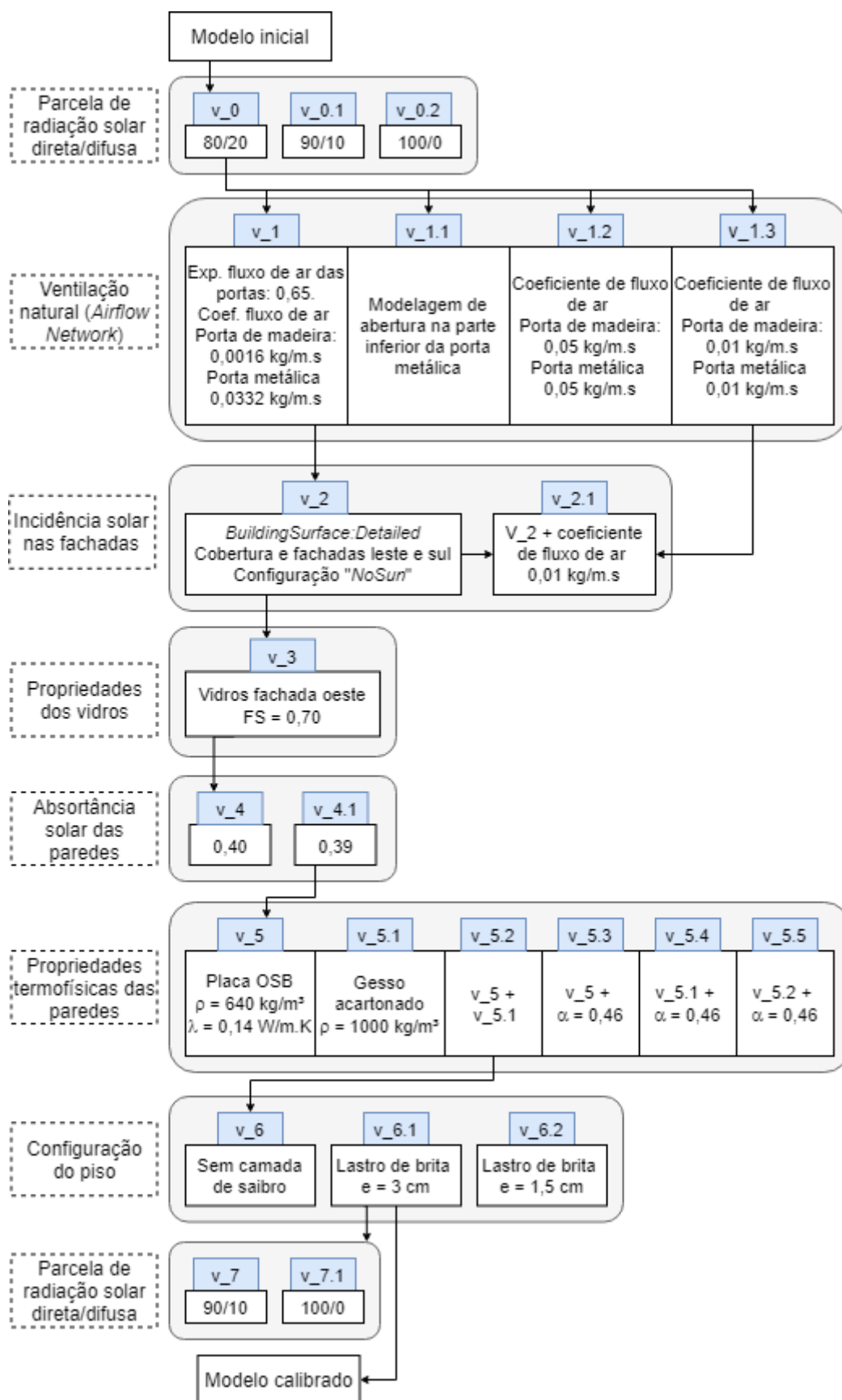
Na etapa seguinte, as propriedades do piso do protótipo habitacional foram alteradas. Desde o modelo v0, o piso foi configurado considerando-se a camada de saibro compactado como parte distinta do solo natural, ou seja, considerando-a como parte construtiva do piso na simulação. Dessa maneira, configurou-se o modelo v6, no qual a camada de saibro compactado deixou de ser considerada. Ainda na

análise da configuração do piso, foram testados mais dois modelos (v6.1 e v6.2) com diferentes espessuras de camada de lastro de brita localizada abaixo do radier.

Por fim, foram configurados mais dois modelos (v7 e v7.1) a partir do modelo v6.1, nos quais a parcelas de radiação solar foram analisadas com o intuito de retificar que a relação de 80/20 para as parcelas difusa/direta da radiação solar seriam as melhores no modelo ajustado. No modelo v7 a relação adotada foi de 90/10, enquanto no modelo v7.1 foi de 100/0.

Na Figura 22 apresenta-se o esquema do processo de calibração, com a sequência dos modelos configurados e as propriedades alteradas em cada etapa.

Figura 22 - Processo de calibração do modelo computacional



#### 3.3.2.4 Validação preliminar do modelo calibrado

Após a definição do modelo calibrado, realizou-se uma validação preliminar do mesmo para um período diferente da calibração, que contemplou 10 dias, entre 21/06/2020 a 30/06/2020. Diferentemente do que foi realizado no modelo principal, nesta etapa não foi adotada uma sequência de dias de monitoramento antecedente ao período de calibração. Essa validação foi adotada para verificar se o modelo, que foi calibrado para um período de intenso sombreamento da envoltória da edificação, responderia bem a condições distintas. Durante o período de validação, houve incidência de radiação solar na cobertura em alguns momentos do dia, devido ao início da queda das folhas das árvores do entorno.

Na validação, as variáveis climáticas foram obtidas pelas mesmas estações utilizadas no procedimento de calibração e inseridas na simulação conforme descrito anteriormente. A temperatura média da superfície externa do piso medida no mês de junho e adotada para a simulação do modelo foi de 20,99°C. Durante o período de validação preliminar do modelo computacional calibrado, registrou-se apenas um evento de ocupação, no dia 30/06/2020, das 16h00 às 17h00, com a utilização de notebook no ambiente sala/cozinha. Os equipamentos permanentes, descritos na seção anterior, funcionaram durante todo o período de validação preliminar. Não foram registrados eventos relativos ao manuseio de aberturas e ventilação natural, bem como não se utilizou iluminação artificial em nenhum dos ambientes.

A RMSD foi calculada para as temperaturas operativas do ar simuladas e para as temperaturas médias do ar medidas. Com isso, foi possível analisar o comportamento do modelo computacional calibrado frente a diferentes condições e compará-lo ao comportamento da edificação. Caso as diferenças entre o modelo calibrado e o monitoramento fossem muito significativas, o modelo computacional poderia ser alterado, por meio da consideração da incidência solar nas superfícies e da verificação do ajuste do modelo frente a estas alterações.

Com a obtenção e validação do modelo calibrado, garantiu-se que as simulações fossem as mais representativas possíveis das condições reais observadas no protótipo habitacional em estudo. Além disso, na validação foi possível observar o comportamento do modelo e entender os erros provenientes da simulação.

Como os métodos de transferência de calor entre edificação e solo dependem, de certa maneira, das condições das zonas térmicas, é fundamental que o modelo simulado represente com a maior fidelidade as condições reais. Com este rigor científico, a comparação das variáveis simuladas com as variáveis medidas pôde ser realizada, e as conclusões puderam ser obtidas com maior respaldo.

#### 3.3.2.5 Validação final

Na comparação entre os métodos de transferência de calor entre edificação e solo, o modelo computacional calibrado foi simulado para o período de um ano com a utilização de um arquivo climático TRY da cidade de Londrina do ano de 1996. Esse arquivo climático foi modificado com a inserção de dados de temperatura e umidade relativa do ar, radiação solar global no plano horizontal, velocidade e direção do vento e pressão barométrica monitorados durante o ano de 2020.

A utilização do arquivo climático TRY de Londrina de 1996, modificado com a substituição de algumas variáveis climáticas monitoradas em 2020, pode ser uma fonte de incertezas. Por esse motivo, realizou-se um procedimento de validação, denominado de validação final, que foi utilizado para analisar o comportamento do modelo calibrado, descrito na seção 3.3, quando simulado para o período de um ano com a utilização do arquivo climático modificado. A variável de resposta obtida por meio da simulação foi a temperatura operativa do ar dos ambientes de permanência prolongada.

No processo de validação final, a configuração do contato da edificação com o solo foi feita por meio do objeto *Site:GroundTemperature:BuildingSurface*, o qual permite a inserção de valores de temperatura média mensal do solo. Os valores inseridos nesse objeto foram obtidos por meio do monitoramento da temperatura da superfície externa do piso da edificação, conforme descrito na seção 3.2. No objeto *Site:GroundTemperature:BuildingSurface* insere-se um valor mensal de temperatura média do solo para toda a edificação. Como as medições foram realizadas de maneira individual em cada ambiente, o valor inserido no *Site:GroundTemperature:BuildingSurface* foi a média simples das temperaturas do solo obtidas para cada ambiente.

Como parâmetro de análise foi utilizada a raiz do erro quadrático médio (RMSD) entre a temperatura operativa simulada e a temperatura média do ar monitorada em cada ambiente da edificação, para cada um dos meses analisados. As RMSD calculadas na validação principal foram comparadas com as obtidas no procedimento de calibração. Com as diferenças obtidas foi possível identificar o impacto, em cada mês, da utilização do arquivo climático modificado na simulação do modelo calibrado. Além disso, as RMSD de cada mês, calculadas na validação principal, permitiram observar os erros do modelo computacional calibrado em simular as temperaturas do ar monitoradas na edificação quando foi utilizado o arquivo climático modificado.

### 3.4 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS MÉTODOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR ATRAVÉS DO SOLO E MEDIÇÕES

Diversos estudos citados na revisão de literatura demonstraram que o método de transferência de calor através do solo pode provocar diferenças significativas no desempenho termoenergético de edificações. Sendo assim, nesse tópico foi analisado o impacto da utilização de cada um dos métodos de transferência de calor através do solo disponíveis no *EnergyPlus* na temperatura da superfície externa do piso obtida na simulação do modelo computacional do protótipo habitacional descrito na seção 3.1.

O período de análise por simulação computacional envolveu um ano completo, com início em 01/01/2020 e fim em 31/12/2020. Durante esse período, o protótipo habitacional foi monitorado por meio de medições da temperatura do ar interno dos ambientes de permanência prolongada. Também foi monitorada a temperatura da superfície externa do piso de cada um dos ambientes, utilizada como referência para comparação com os valores obtidos por meio da simulação com os diferentes métodos de transferência de calor através do solo. Além disso, foi realizado registro dos eventos relacionados à ocupação da edificação, utilização de equipamentos e operação de portas e janelas, que foram inseridos na configuração do modelo computacional.

Diferentemente dos procedimentos de calibração e validação preliminar do modelo computacional, nos quais o objeto *SizingPeriod:DesignDay* foi utilizado, nesta etapa foi utilizado um arquivo climático TRY de Londrina de 1996. Esse arquivo

teve seus valores originais de temperatura e umidade relativa do ar substituídos por valores monitorados entre 01/01/2020 e 31/03/2020 pela estação automática do IAPAR, e entre 01/04/2020 e 31/12/2020 por valores monitorados na edificação. Os dados de velocidade e direção do vento e radiação solar foram substituídos por valores monitorados entre 01/01/2020 e 31/12/2020 pela estação automática do IAPAR. Já os valores de pressão barométrica do arquivo climático foram substituídos pelos valores monitorados no mesmo período pela estação convencional de Londrina, cujos dados são disponibilizados no banco de dados do INMET.

Ainda que o arquivo climático utilizado nas simulações seja modificado com a inserção de dados atuais, o fato de ser um TRY montado com variáveis monitoradas em 1996 faz com que este se torne uma fonte de incertezas, apresentando-se como uma das limitações da pesquisa. Para verificar o impacto da utilização do arquivo climático modificado, foi realizado um procedimento de validação, etapa que foi denominada de validação principal e explicada anteriormente.

A etapa seguinte à validação principal envolveu a configuração de um modelo computacional para cada um dos métodos de transferência de calor entre piso e solo. Os casos que utilizam o *GroundDomain:Slab* foram simulados com os modelos de temperatura do solo não perturbado (UGT) *KusudaAchenbach*, *FinitteDifference* e *Xing*, respectivamente. Além disso, foi simulado um caso que utiliza o objeto *GroundHeatTransfer:Slab*. Por fim, foi simulado um caso que utiliza o objeto *Foundation:Kiva*. Para tornar possível a comparação entre todos os casos, a única modificação entre eles foi a consideração do contato com o solo.

Os detalhes do procedimento adotado nesta seção são apresentados a seguir.

### **3.4.1 Modelos de transferência de calor através do solo**

Conforme apresentado na revisão de literatura, o *EnergyPlus* oferece diferentes possibilidades para tratar do contato da edificação com o solo. Pode-se utilizar o objeto *GroundDomain:Slab*, que permite ao usuário a escolha de três modelos de temperatura do solo não perturbado (UGT), a dizer *KusudaAchenbach*, *FiniteDifference* e *Xing*. Também há a possibilidade de utilizar o objeto

*Foundation:Kiva*. Por fim, pode-se recorrer ao programa *Slab*, que pode ser rodado de maneira integrada ou à parte da simulação.

Sendo assim, para analisar o impacto do método de transferência de calor através do solo na temperatura do ar interno de uma edificação e para analisar a temperatura da superfície externa do piso, o modelo computacional calibrado conforme os procedimentos descritos na seção 3.3 foi simulado para cada uma das possibilidades citadas.

A configurações dos modelos utilizados nas simulações, bem como as especificidades de cada um dos grupos serão apresentadas nas seções a seguir.

#### 3.4.1.1 Propriedades termofísicas do solo utilizadas na simulação

Todos os métodos de transferência de calor através do solo analisados nesta pesquisa necessitam da inserção de propriedades termofísicas do solo como variáveis de entrada na simulação. As propriedades termofísicas, comuns a todos os métodos, são: densidade do solo ( $\text{kg/m}^3$ ), condutividade térmica do solo ( $\text{W/m.K}$ ) e calor específico do solo ( $\text{J/kg.K}$ ).

Cada um dos métodos apresenta seus próprios valores padrão (*default* do *EnergyPlus*) para tais propriedades. Esses valores podem variar de acordo com o método escolhido, como pode ser observado na Tabela 4. Para que a comparação entre os métodos fosse válida, optou-se por adotar o mesmo valor de densidade, condutividade térmica e calor específico do solo para todos os casos analisados.

Uma vez que os procedimentos metodológicos desta pesquisa buscam aproximar o modelo computacional das condições reais observadas na edificação, foram adotadas as propriedades termofísicas para o solo característico de Londrina. De acordo com o Atlas Ambiental de Londrina (BARROS *et al.*, 2008), a cidade é composta majoritariamente por solos do tipo Nitossolo e Latossolo, de característica muito argilosa. Assim, as propriedades termofísicas adotadas para as simulações foram extraídas da NBR 15.220-2 (ABNT, 2005a), que traz valores para solo argiloso, apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Propriedades termofísicas do solo

<b>Métodos</b>	<b>Densidade (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Condutividade térmica (W/m.K)</b>	<b>Calor específico (J/kg.K)</b>
<i>GroundDomain</i> valores padrão	2.800,00	1,50	850,00
<i>Slab</i> valores padrão	1.200,00	1,00	1.200,00
<i>Kiva</i> valores padrão	1.842,00	1,73	419,00
<i>Solo argiloso</i> NBR 15.220-2	1.700,00	0,52	840,00

Fonte: ABNT (2005a); U.S. Department... (2020c)

Vale ressaltar que o solo e suas propriedades podem variar dentro da mesma cidade e de acordo com os processos mecânicos aos quais está submetido ao longo do tempo. Para uma análise mais precisa seria ideal que fossem realizados ensaios para caracterizar o solo abaixo da edificação e, dessa forma, obter suas propriedades termofísicas e inseri-las na simulação, o que não foi possível. Assim, a utilização de propriedades termofísicas extraídas da NBR 15.220-2 (ABNT, 2005a) apresenta-se como uma das limitações da pesquisa.

#### 3.4.1.2 Configuração dos casos *GroundDomain:Slab*

Para o objeto *GroundDomain:Slab*, foi configurado um modelo computacional para cada modelo de UGT, sendo que as demais variáveis de entrada do objeto permaneceram constantes, conforme apresentado na Tabela 5. Como mencionado na seção anterior, as propriedades termofísicas foram adotadas conforme os valores da NBR 15.220-2 (ABNT, 2005a) para a argila.

Tabela 5 - Dados de entrada do objeto *GroundDomain:Slab*

Dados de entrada	Valor
<i>Name</i> : Nome	GD
<i>Ground Domain Depth</i> : Profundidade do domínio de solo (m)	10*
<i>Aspect Ratio</i> : Proporção das dimensões do piso	1,07
<i>Perimeter Offset</i> : afastamento do perímetro (m)	5*
<i>Soil Thermal Conductivity</i> : Condutividade térmica do solo (W/m.K)	0,52**
<i>Soil Density</i> : Densidade do solo (kg/m <sup>3</sup> )	1.700,00**
<i>Soil Specific Heat</i> : Calor específico do solo (J/kg.K)	840,00**
<i>Soil Moisture Content Volume Fraction</i> : Fração volumétrica do teor de umidade do solo (%)	30*
<i>Soil Moisture Content Volume Fraction at Saturation</i> : Fração volumétrica do teor de umidade do solo quando saturado (%)	50*
<i>Undisturbed Ground Temperature Model Type</i> : Tipo de modelo de temperatura do solo não perturbado	<i>KusudaAchenbach / FiniteDifference/ Xing</i>
<i>Undisturbed Ground Temperature Model Name</i> : Nome do modelo de temperatura do solo não perturbado	Varia conforme UGT
<i>Evapotranspiration Ground Cover Parameter</i> : Parâmetro de evapotranspiração da cobertura do solo	0,4*
<i>Slab Boundary Condition Model Name</i> : Nome do modelo de condição de contorno do piso	OSCM
<i>Slab Location</i> : Localização do piso	<i>OnGrade</i>
<i>Slab Material Name</i> : Nome do material do piso	
<i>Horizontal Insulation</i> : Isolamento horizontal	No
<i>Horizontal Insulation Material Name</i> : Nome do material de isolamento horizontal	-
<i>Horizontal Insulation Extents</i> : Extensões do isolamento horizontal	-
<i>Horizontal Insulation Width</i> : Largura do isolamento horizontal	-
<i>Vertical Insulation</i> : Isolamento vertical	No
<i>Vertical Insulation Material Name</i> : Nome do material de isolamento vertical	-
<i>Vertical Insulation Depth</i> : Profundidade do isolamento vertical	-
<i>Simulation Timestep</i> : Período de tempo da simulação	<i>Timestep</i>
<i>Geometric Mesh Coefficient</i> : Coeficiente de malha geométrica	1,6*
<i>Mesh Density Parameter</i> : Parâmetro de densidade da malha	6*

\*valores padrão do *EnergyPlus*

\*\*valores da NBR 15.220-2

Fonte: ABNT (2005a); U.S. Department... (2020c).

Cada modelo de UGT apresenta suas especificidades, como citado na revisão de literatura. Entretanto, todos eles demandam a inserção dos valores de

propriedades como condutividade térmica, densidade e calor específico do solo, cujos valores adotados são os mesmos presentes na Tabela 5.

### 3.4.1.3 Configuração do caso com o objeto *Foundation:Kiva*

O objeto *Foundation:Kiva* permite ao *EnergyPlus* calcular a transferência de calor através de diferentes tipos de fundação de edificações. Este objeto possui a particularidade de permitir que o usuário simule diferentes tipos de fundação considerando as perdas existentes no perímetro do piso em contato com o meio externo.

Quando se utiliza o objeto *Foundation:Kiva* para considerar a transferência de calor entre a edificação e o solo, devido aos algoritmos de cálculo embutidos, não é possível obter como variável de saída a temperatura da superfície externa do piso. Por isso, foi analisada a temperatura do ar interno dos ambientes obtida por meio da simulação.

As configurações referentes a esse objeto foram definidas no *Foundation:Kiva:Settings*, e os valores adotados na simulação são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Dados de entrada do objeto *Foundation:Kiva:Settings*

Dados de entrada	Valor
<i>Soil Conductivity</i> : Condutividade térmica do solo (W/m.K)	0,52**
<i>Soil Density</i> : Densidade do solo (kg/m <sup>3</sup> )	1.700,00**
<i>Soil Specific Heat</i> : Calor específico do solo (J/kg.K)	840,00**
<i>Ground Solar Absorptivity</i> : Absortividade solar do solo	0,9*
<i>Ground Thermal Absorptivity</i> : Absortividade térmica do solo	0,9*
<i>Ground Surface Roughness</i> : Rugosidade superficial do solo (m)	0,03*
<i>Far-Field Width</i> : Largura do “campo distante” (m)	40
<i>Deep-Ground Boundary Condition</i> : Condição de contorno do “solo profundo”	<i>Autoselect*</i>
<i>Deep-Ground Depth</i> : Profundidade do “solo profundo” (m)	<i>autocalculate*</i>
<i>Minimum Cell Dimension</i> : Dimensão mínima da célula (m)	0,02*
<i>Maximum Cell Growth Coefficient</i> : Coeficiente de crescimento máximo da célula	1,5*
<i>Simulation Timestep</i> : Período de tempo da simulação	<i>Timestep</i>

\*valores padrão do *EnergyPlus* para o *Foundation:Kiva:Settings*

\*\*valores da NBR 15.220-2

Fonte: ABNT (2005a); U.S. Department... (2020c).

Como pôde ser observado na Tabela 6, o objeto *Foundation:Kiva* traz seus próprios valores padrão. Entretanto, para tornar possível a comparação entre os métodos de cálculo de transferência de calor através do solo, os valores referentes às propriedades termofísicas do solo utilizadas foram as consultadas na NBR 15.220-2 (ABNT, 2005a) para a argila.

#### 3.4.1.4 Configuração do caso com o objeto *GroundHeatTransfer:Slab*

O objeto *GroundHeatTransfer:Slab* permite ao *EnergyPlus* calcular de maneira apropriada a transferência de calor entre edificação e solo por meio do programa *Slab*. Seu uso é fortemente recomendado pelo manual de programas auxiliares do *EnergyPlus* (U.S. DEPARTMENT..., 2020a). O programa *Slab* pode ser acionado juntamente com a simulação, bem como de forma independente. Costa, Roriz e Chvatal (2017) demonstraram que as duas maneiras de acionamento apresentaram os mesmos resultados. Nesse estudo, o programa *Slab* foi rodado internamente. Para o funcionamento correto do programa *Slab*, foi realizado procedimento de convergência antes da simulação.

Assim como os outros objetos, o *GroundHeatTransfer:Slab* possui suas variáveis de entrada específicas. Inicialmente, no objeto *GroundHeatTransfer:Control* o usuário especifica se utilizará o *Slab* ou o *Basement* para calcular a transferência de calor. No caso deste estudo, em que a edificação tem laje de piso em contato com o solo, sem ambientes subterrâneos, o *Slab* foi escolhido.

No objeto *GroundHeatTransfer:Slab:Materials*, deve-se definir a quantidade de materiais constituintes do sistema envolvido na troca de calor, ou seja, o piso e o solo. Além disso, propriedades da superfície do solo e do fluxo de calor interno também devem ser definidas, como apresentado na Tabela 7.

Tabela 7 - Dados de entrada do objeto  
*GroundHeatTransfer:Slab:Materials*

Dados de entrada	Valor
NMAT: Número de materiais	2 (piso e solo)
ALBEDO: Albedo da superfície sem neve	0,16*
ALBEDO: Albedo da superfície com neve	0,4*
EPSSLW: Emissividade da superfície sem neve	0,94*
EPSSLW: Emissividade da superfície com neve	0,86*
Z0: Rugosidade da superfície sem neve (cm)	0,75*
Z0: Rugosidade da superfície com neve (cm)	0,25*
HIN: Hconv Interno: Fluxo descendente (W/m <sup>2</sup> .K)	6,13*
HIN: Hconv Interno: Fluxo ascendente (W/m <sup>2</sup> .K)	9,26*

\*valores padrão do *EnergyPlus*

Fonte: U.S. Department... (2020c).

No objeto *GroundHeatTransfer:Slab:MatProps* são definidas as propriedades termofísicas do solo e dos materiais que constituem o piso. As propriedades relativas ao piso são as definidas na seção 3.3.2.1. As propriedades termofísicas do solo, por sua vez, são as propriedades para a argila, consultadas na NBR 15.220-2 (ABNT, 2005a). Os valores estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Dados de entrada do objeto  
*GroundHeatTransfer:Slab:MatProps*

Dados de entrada	Valor
RHO: Densidade do material do piso (kg/m <sup>3</sup> )	2.200,00*
RHO: Densidade do solo (kg/m <sup>3</sup> )	1.700,00**
CP: CP do piso (J/kg.K)	1000,00*
CP: CP do solo (J/kg.K)	840,00**
TCON: k do piso (W/m.K)	1,75*
TCON: k do solo (W/m.K)	0,52**

\*valores conforme seção 3.3.2.1

\*\*valores da NBR 15.220-2

Fonte: ABNT (2005a); U.S. Department... (2020c).

No objeto *GroundHeatTransfer:Slab:BoundConds* o usuário pode definir algumas condições de contorno utilizadas nos cálculos de transferência de calor entre edificação e solo (U.S. DEPARTMENT..., 2020c). Para esse estudo, definiu-se que a evapotranspiração não seria modelada, e que na camada mais inferior das condições

de contorno o fluxo de calor seria considerado nulo. Além disso, nesse objeto foi configurado que o coeficiente de transferência de calor seria calculado pelo próprio programa, com base nas condições do arquivo climático.

No objeto *GroundHeatTransfer:Slab:BoundConds* foram inseridas informações sobre a edificação e suas condições de operação (U.S. DEPARTMENT..., 2020c). Além disso, para cada mês do ano deve-se inserir uma temperatura média do ar interno, que foi definida durante as simulações preliminares para atingir a convergência. Os dados de entrada referentes a esse objeto são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Dados de entrada do objeto  
*GroundHeatTransfer:Slab:BldgProps*

Dados de entrada	Valor
IYRS: Número de anos para iteração	10*
Shape: Forma do piso	0*
HBLDG: Altura da edificação (m)	conforme seção 3.1
TINamp: Amplitude diária da onda senoidal de temperatura interna ( $\Delta^{\circ}\text{C}$ )	6,20
ConvTol: Tolerância de convergência	0,1*

\*valores padrão do *EnergyPlus*

Fonte: U.S. Department... (2020c).

No objeto *GroundHeatTransfer:Slab:Insulation* são inseridas as propriedades referentes ao isolamento térmico, seja ele horizontal, sob o piso, ou vertical, ao redor de seu perímetro. Como a edificação em estudo não possui isolamento, todos os parâmetros desse objeto foram mantidos com valor nulo.

Por fim, no objeto *GroundHeatTransfer:Slab:EquivalentSlab* pode-se modelar lajes de piso que não possuem formato retangular. Por meio da relação entre área e perímetro, o *EnergyPlus* realiza os cálculos para considerar o piso com dimensões equivalentes às de um piso retangular (U.S. DEPARTMENT..., 2020c). Para este estudo, a relação entre perímetro e área de piso, e a espessura do piso foram definidas de acordo com as dimensões da edificação apresentada na seção 3.1. Além disso, foram inseridas as distâncias horizontal e vertical entre a borda do piso e a borda de solo considerada nos cálculos. Os valores definidos para este objeto são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Dados de entrada do objeto  
*GroundHeatTransfer:Slab:EquivalentSlab*

Dados de entrada	Valor
APRatio: Relação área/perímetro do piso (m)	conforme seção 3.1
SLABDEPTH: Espessura do piso (m)	conforme seção 3.1
CLEARANCE: Distância da borda do piso ao limite do domínio (m)	15*
ZCLEARANCE: Distância do fundo da laje ao fundo do domínio (m)	15*

\*valores padrão do *EnergyPlus*

Fonte: U.S. Department... (2020c).

Os parâmetros listados acima são descritos no manual de variáveis de entrada e saída do *EnergyPlus* (U.S. DEPARTMENT..., 2020c), e os procedimentos de cálculo envolvidos são descritos no manual de engenharia do *EnergyPlus* (U.S. DEPARTMENT..., 2020b).

### 3.4.2 Comparação das temperaturas do solo simuladas

A partir da simulação dos casos mencionados nas seções anteriores, foram obtidos os valores da superfície externa do piso dos ambientes monitorados. Por meio desses valores, foi possível realizar a comparação com os valores medidos pelos sensores que estão instalados entre o radier de concreto e o solo. As análises desses casos foram divididas em dois grupos. No primeiro, foi feita a análise a partir das médias mensais da temperatura do solo. No segundo, a análise foi realizada a partir dos valores em base horária.

Um terceiro grupo foi criado para analisar o objeto *Foundation:Kiva*. O objeto *Foundation:Kiva* não permite que o usuário extraia como variável de saída da simulação a temperatura da superfície externa do piso. Para ser possível fazer a análise do caso com o objeto *Foundation:Kiva* e compará-lo com os demais casos, a temperatura interna do ar dos ambientes foi utilizada como parâmetro. Sendo assim, para todos os casos também foram obtidos os valores da temperatura operativa do ar dos ambientes e, por meio desses valores, foi possível realizar a comparação com os valores medidos pelos sensores instalados no centro dos ambientes que monitoraram a temperatura do ar.

### 3.4.2.1 Grupo 1: Análise das médias mensais da temperatura do solo

Neste grupo foi realizada a comparação entre os casos que utilizam o objeto *GroundDomain*, com os diferentes modelos de UGT, e o caso que utiliza o objeto *GroundHeatTransfer:Slab*. Para todos os casos, a variável de saída analisada foi a temperatura da superfície externa (*Surface Outside Face Temperature*, conforme U.S. DEPARTMENT..., 2020c) do piso de cada um dos ambientes de permanência prolongada da edificação.

Os procedimentos de cálculo do objeto *GroundHeatTransfer:Slab* resultam em temperaturas mensais da superfície externa do piso para toda a edificação. Assim, quando se analisam os resultados da simulação anual em base horária, a variável de saída *Surface Outside Face Temperature* para este objeto tem a particularidade de ser uma temperatura constante para cada mês simulado. Por sua vez, para o objeto *GroundDomain*, a variável *Surface Outside Face Temperature* obtida na simulação anual é apresentada em valores horários.

Na análise do grupo 1, foi calculada a média mensal dos resultados horários obtidos para os casos *GroundDomain* com os modelos de UGT *KusudaAchenbach*, *FiniteDifference* e *Xing*. Assim, foi possível realizar a comparação destes casos com o caso que utiliza o objeto *GroundHeatTransfer:Slab*.

A comparação foi realizada por meio da raiz do erro quadrático médio (RMSD) entre a média mensal da variável *Surface Outside Face Temperature* obtida para cada um dos casos e a média mensal da temperatura da superfície externa do piso medida na edificação.

As comparações foram feitas para todo o período, e ainda foram separadas por mês. Para diferenciar cada uma delas, denominou-se  $RMSD_{m,a}$  a raiz do erro quadrático médio calculada com as médias mensais da temperatura da superfície externa do piso, analisada para o período de um ano, como demonstrado na Equação 3.

$$RMSD_{m,a} = \sqrt{\frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} (X_{sim,méd} - X_{obs,méd})^2} \quad (3)$$

Onde:

$X_{sim,méd}$  é a média mensal da temperatura da superfície externa do piso, obtida por simulação (*Surface Outside Face Temperature*);

$X_{obs,méd}$  é a média mensal da temperatura da superfície externa do piso, obtida por medição.

Denominou-se  $RMSD_m$  a raiz do erro quadrático médio de cada mês, como apresentado na Equação 4.

$$RMSD_m = \sqrt{\frac{1}{1} \sum_{i=1}^1 (X_{sim,méd} - X_{obs,méd})^2} \quad (4)$$

Onde:

$X_{sim,méd}$  é a média mensal da temperatura da superfície externa do piso, obtida por simulação (*Surface Outside Face Temperature*);

$X_{obs,méd}$  é a média mensal da temperatura da superfície externa do piso, obtida por medição.

Para cada caso analisado, foram obtidas doze  $RMSD_m$ , uma para cada mês do período, e uma  $RMSD_{m,a}$ , para o período completo de um ano. Assim, foi possível comparar os resultados em média mensal de cada um dos casos e determinar qual deles apresentou menor erro em cada mês. Além disso, foi possível determinar qual caso apresentou o menor erro quando analisado para o período de um ano.

#### 3.4.2.2 Grupo 2: Análise da temperatura do solo em base horária

Neste grupo também foram comparados os casos *GroundDomain* com os modelos de UGT *KusudaAchenbach*, *FinitteDifference* e *Xing*, e o caso *GroundHeatTransfer:Slab*. Como na seção anterior, a variável de saída analisada foi a temperatura da superfície externa (*Surface Outside Face Temperature*) do piso de cada um dos ambientes de permanência prolongada da edificação.

Na análise do grupo 2, a comparação entre os casos foi realizada com os resultados horários obtidos na simulação. A raiz do erro quadrático médio (RMSD) foi utilizada para comparar as temperaturas da superfície externa dos pisos simuladas com as temperaturas monitoradas.

As comparações foram feitas para cada mês, e para todo o período. Denominou-se  $RMSD_{h,m}$  a raiz do erro quadrático médio de cada mês, calculada com

os valores horários simulados e medidos. A  $RMSD_{h,m}$  está apresentada na Equação 5.

$$RMSD_{h,m} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_{sim,h} - X_{obs,h})^2} \quad (5)$$

Onde:

$X_{sim,h}$  é a temperatura obtida por simulação (*Surface Outside Face Temperature*), em base horária;

$X_{obs,h}$  é a temperatura da superfície externa do piso em base horária, obtida por medição;

$N$  é o número de horas do mês, que varia de acordo com o mês analisado.

Denominou-se  $RMSD_{h,a}$  a raiz do erro quadrático médio calculada com os valores horários da temperatura do solo, analisada para o período de um ano. A  $RMSD_{h,a}$  está apresentada na Equação 6.

$$RMSD_{h,a} = \sqrt{\frac{1}{8760} \sum_{i=1}^{8760} (X_{sim,h} - X_{obs,h})^2} \quad (6)$$

Onde:

$X_{sim,h}$  é a temperatura obtida por simulação (*Surface Outside Face Temperature*), em base horária;

$X_{obs,h}$  é a temperatura da superfície externa do piso em base horária, obtida por medição.

Com os doze valores de  $RMSD_{h,m}$  foi possível verificar os erros de cada um dos casos para cada um dos meses analisados. Além disso, foi possível verificar diferenças entre a análise com as médias mensais (grupo 1) e a análise com os valores horários (grupo 2).

Por fim, com o valor de  $RMSD_{h,a}$  foi possível identificar o comportamento dos casos quando analisados para o ano inteiro por meio de valores horários.

### 3.4.2.3 Grupo 3: Análise da temperatura operativa do ar simulada

No grupo 3, foi realizada a comparação dos casos *GroundDomain*, *GroundHeatTransfer:Slab* e *Foundation:Kiva*. Como o objeto *Foundation:Kiva* não permite a análise da variável *Surface Outside Face Temperature*, a análise do grupo 3 foi realizada com a temperatura operativa do ar simulada para cada um dos casos, em base horária.

Utilizou-se a raiz do erro quadrático médio (RMSD) entre as temperaturas operativas do ar simulada e a temperatura média do ar monitorada na edificação para comparar os casos. As comparações foram feitas para cada mês, e para todo o período. Denominou-se  $RMSD_{h,m}$  a raiz do erro quadrático médio de cada mês, calculada com os valores horários simulados e medidos, conforme Equação 7.

$$RMSD_{h,m} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_{sim,h} - X_{obs,h})^2} \quad (7)$$

Onde:

$X_{sim,h}$  é a temperatura operativa do ar obtida por simulação, em base horária;

$X_{obs,h}$  é a temperatura do ar interno obtida por medição, em base horária;

$N$  é o número de horas do mês, que varia de acordo com o mês analisado.

Denominou-se  $RMSD_{h,a}$  a raiz do erro quadrático médio calculada com os valores horários da temperatura do ar interno monitorada e da temperatura operativa do ar simulada, analisada para o período de um ano, conforme Equação 8.

$$RMSD_{h,a} = \sqrt{\frac{1}{8760} \sum_{i=1}^{8760} (X_{sim,h} - X_{obs,h})^2} \quad (8)$$

Onde:

$X_{sim,h}$  é a temperatura operativa do ar obtida por simulação, em base horária;

$X_{obs,h}$  é a temperatura do ar interno obtida por medição, em base horária.

Com a análise do grupo 3 foi possível comparar o caso simulado com o objeto *Foundation:Kiva* com os demais casos. Além disso, foi possível observar a

influência dos métodos de transferência de calor através do solo na temperatura interna simulada.

#### 3.4.2.4 Verificação da influência das propriedades termofísicas do solo

Nessa seção, o caso *GroundDomain* com modelo de UGT *FiniteDifference* foi simulado para diferentes propriedades termofísicas do solo a fim de verificar seu impacto nos resultados obtidos. Nem sempre é possível utilizar dados reais das propriedades termofísicas do solo obtidos por medição. Pode-se, então, recorrer aos valores padrão (*default*) do *EnergyPlus* ou a valores presentes em normas.

Sendo assim, foram utilizados os valores padrão dos métodos de transferência de calor através do solo e os valores trazidos na NBR 15.220-2 (ABNT, 2005a) para a argila, citados anteriormente na Tabela 4. Além desses valores, também foram analisados os valores da NBR 15.220-2 (ABNT, 2005a) para areia seca, para representar o saibro que está localizado abaixo do piso da edificação, cuja densidade é 1.500,00 kg/m<sup>3</sup>, condutividade térmica é 0,30 W/(m.K) e calor específico é 2090 J/(kg.K).

Com essa análise foi possível observar o impacto que diferentes propriedades termofísicas podem proporcionar no resultado das temperaturas da superfície externa do piso obtidas por simulação.

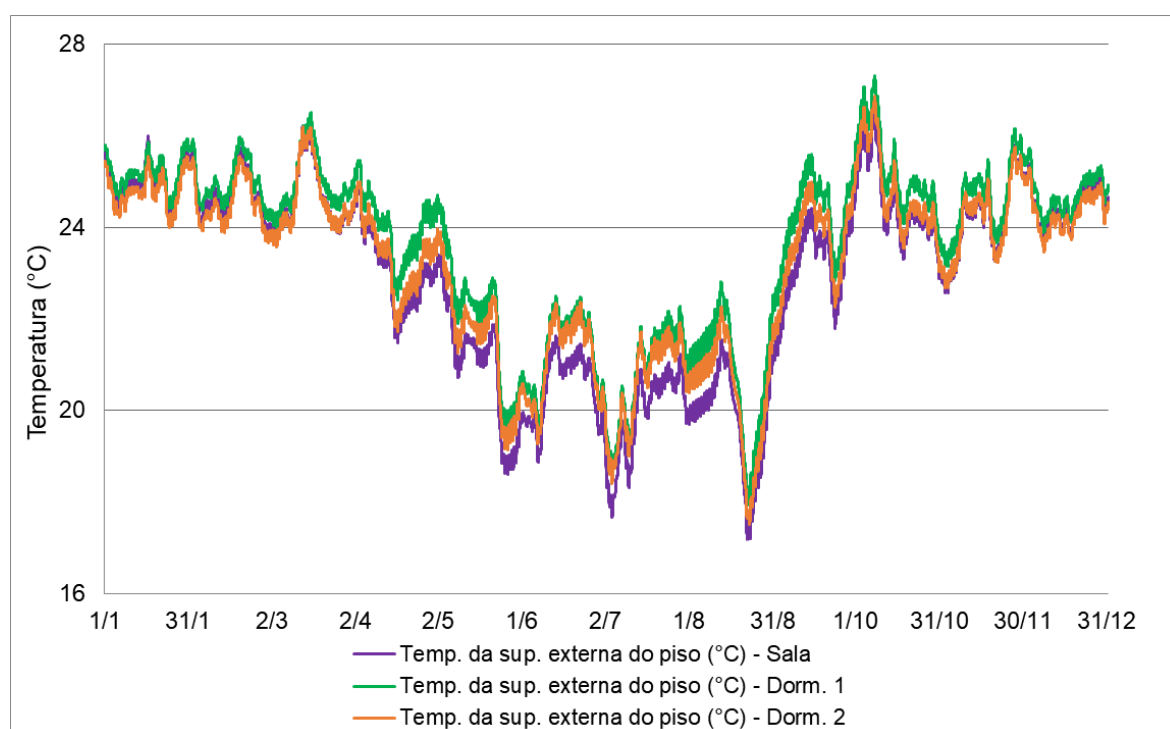
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos em cada uma das etapas do procedimento metodológico.

### 4.1 MONITORAMENTO DA TEMPERATURA DA INTERFACE ENTRE PISO E SOLO

Os dados do monitoramento da temperatura da superfície externa do piso a partir de 01/01/2020 foram utilizados nas análises. Na Figura 23 é possível observar os resultados obtidos ao longo de um ano.

Figura 23 - Resultados do monitoramento da temperatura da superfície externa do piso

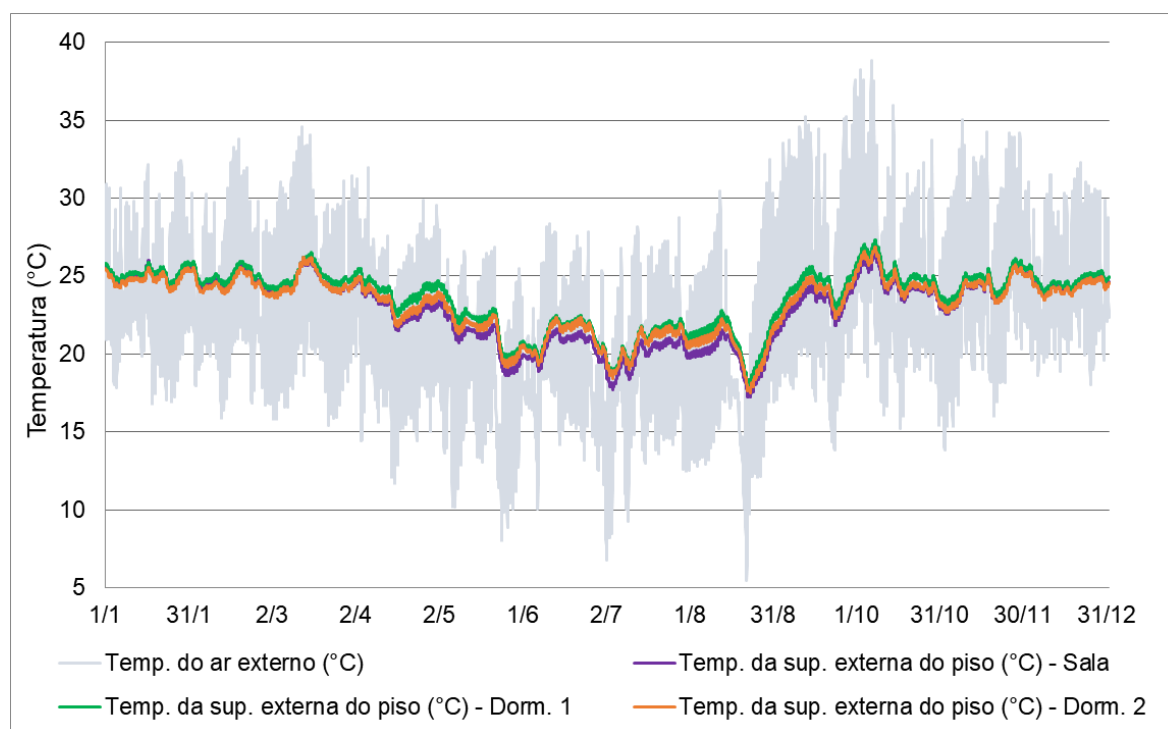


As temperaturas da superfície externa do piso monitoradas em cada um dos ambientes apresentam comportamento semelhante, bem como valores muito próximos. Pequenas diferenças são notadas no mês de abril, a partir do qual as temperaturas monitoradas na sala/cozinha apresentam-se menores do que as

temperaturas monitoradas nos demais ambientes. Também é a partir de abril que as temperaturas da superfície externa do piso apresentam uma queda significativa até o fim de agosto. A partir de agosto as temperaturas voltam a subir, e em outubro observa-se que as temperaturas monitoradas entre os ambientes se aproximam.

Por meio da análise conjunta das curvas de temperatura da superfície externa do piso monitorada e da temperatura do ar externo na Figura 24 pode-se observar que a temperatura do solo abaixo da edificação segue o comportamento do ar externo, porém com menor amplitude e com certo atraso nos valores extremos. Um exemplo é a segunda metade do mês de agosto, no qual se observa uma grande queda na temperatura do ar externo, acompanhada dias depois por uma queda da temperatura da superfície externa do piso com menor amplitude.

Figura 24 - Temperaturas da superfície externa do piso e do ar externo



Na Tabela 11 encontram-se os valores médio, máximo e mínimo da temperatura da superfície externa do piso monitorada, para cada um dos ambientes de permanência prolongada. A temperatura da superfície externa do piso mínima medida foi de 17,18 °C em agosto de 2020 na sala/cozinha. A temperatura máxima monitorada foi de 27,32°C na interface entre o solo e o piso do dormitório 1, em outubro de 2020.

Tabela 11 – Resultados do monitoramento da temperatura do solo

	Temperatura do solo medida (°C)								
	Sala/cozinha			Dormitório 1			Dormitório 2		
	Média	Máxima	Mínima	Média	Máxima	Mínima	Média	Máxima	Mínima
jan/20	25,03	26,00	24,18	25,20	25,95	24,40	24,82	25,55	23,97
fev/20	24,75	25,78	23,72	25,04	25,99	24,08	24,58	25,57	23,57
mar/20	24,60	26,24	23,67	24,96	26,53	23,99	24,57	26,21	23,57
abr/20	23,11	24,88	21,49	24,07	25,46	22,43	23,42	25,01	21,70
mai/20	21,08	23,41	18,58	22,15	24,73	19,54	21,65	23,97	19,15
jun/20	20,51	21,63	18,85	21,33	22,50	19,54	21,12	22,37	19,27
jul/20	19,87	21,23	17,68	20,80	22,28	18,56	20,58	21,93	18,41
ago/20	19,80	21,56	17,18	20,86	22,81	17,95	20,37	22,30	17,51
set/20	23,15	25,00	21,11	24,23	25,83	22,19	23,65	25,35	21,58
out/20	24,58	26,56	22,88	25,32	27,32	23,48	24,82	26,87	23,04
nov/20	24,12	25,80	22,57	24,58	26,17	23,14	24,14	25,77	22,68
dez/20	24,47	25,39	23,55	24,76	25,73	23,89	24,36	25,30	23,47

## 4.2 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO COMPUTACIONAL

As árvores no entorno do protótipo habitacional, com folhagem do tipo caduca, perdem suas folhas nos meses mais frios do ano. Dessa maneira, nos dias de primavera, verão e até no outono, observa-se que o sombreamento é abundante e a incidência direta de radiação solar na envoltória é pequena. Por sua vez, nos dias de inverno, quando as árvores perdem suas folhas, o sombreamento é menor, e a radiação incide diretamente sobre a envoltória, especialmente sobre o telhado.

Essa condição especial à qual o protótipo habitacional está submetido foi determinante na concepção da estratégia de calibração do modelo computacional. De modo a considerar as condições de sombreamento e de incidência de radiação solar, a calibração foi realizada e os resultados são apresentados a seguir.

### 4.2.1 Calibração

A etapa de calibração foi realizada para a condição em que o protótipo habitacional é sombreado pela vegetação presente em seu entorno. Essa condição foi considerada a mais importante pois é a que ocorre com maior frequência durante o ano.

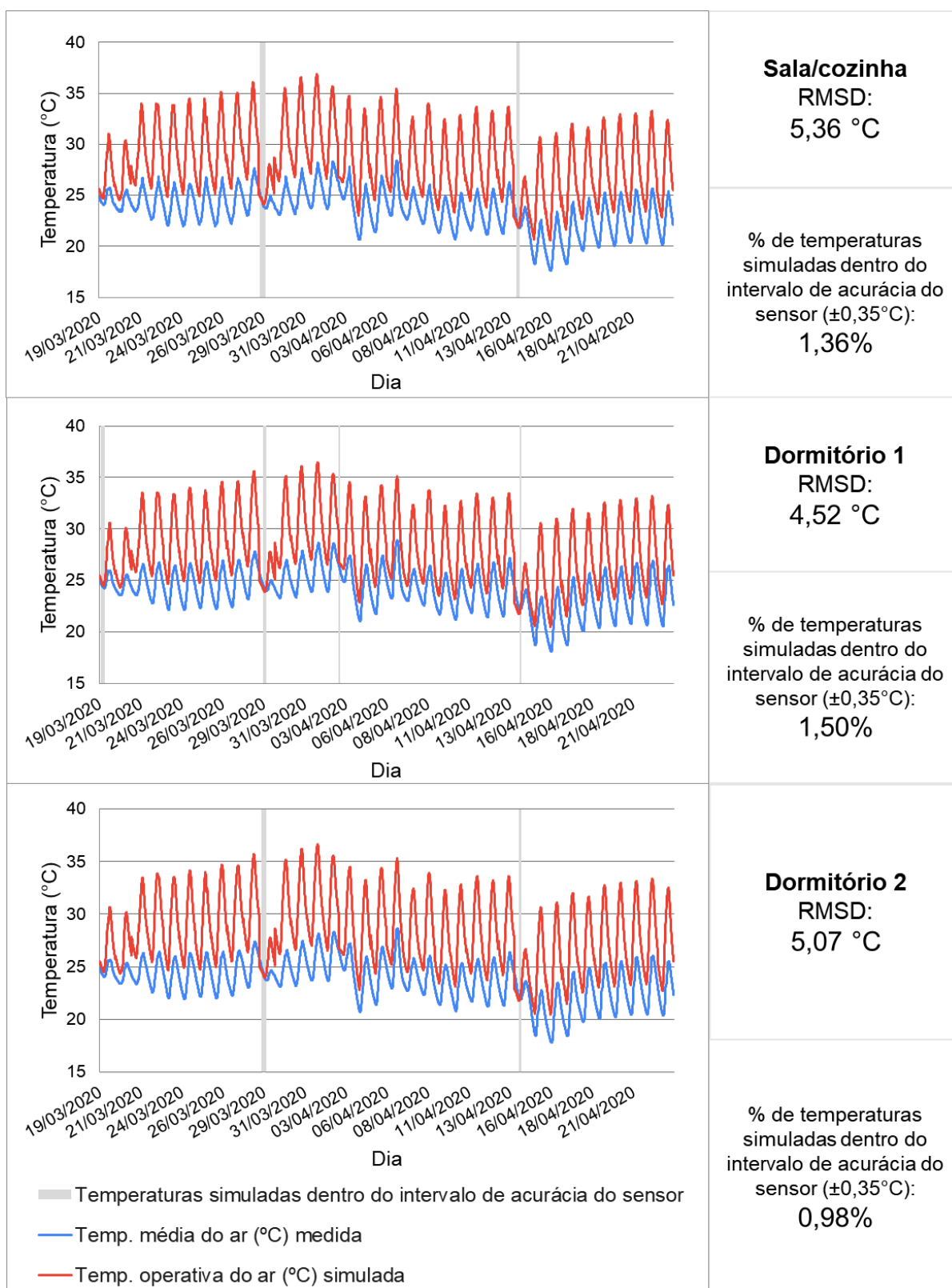
Nessa etapa, foram testados 23 modelos computacionais com diferentes configurações, e os resultados de temperatura operativa do ar interno obtidos pela simulação de cada um deles foram comparados com valores medidos no protótipo habitacional por meio da raiz do erro quadrático médio (RMSD).

O primeiro modelo testado foi chamado de *v0*. Na Figura 25 pode-se observar as curvas de temperatura do ar medida nos ambientes do protótipo habitacional e da temperatura operativa do ar simulada com a utilização do modelo computacional *v0*. O comportamento das duas curvas é semelhante, sendo que os valores máximos e mínimos de cada uma delas acontecem quase sempre no mesmo momento. Entretanto, as temperaturas obtidas por meio da simulação computacional são majoritariamente mais altas do que aquelas monitoradas na edificação.

Em termos absolutos, a diferença máxima encontrada foi de 9,97°C, no ambiente sala/cozinha, às 16h do dia 31/03/2020. A RMSD obtida com o modelo *v0* foi de 5,36°C, 4,52°C e 5,07°C, para a sala/cozinha, dormitório 1 e dormitório 2, respectivamente.

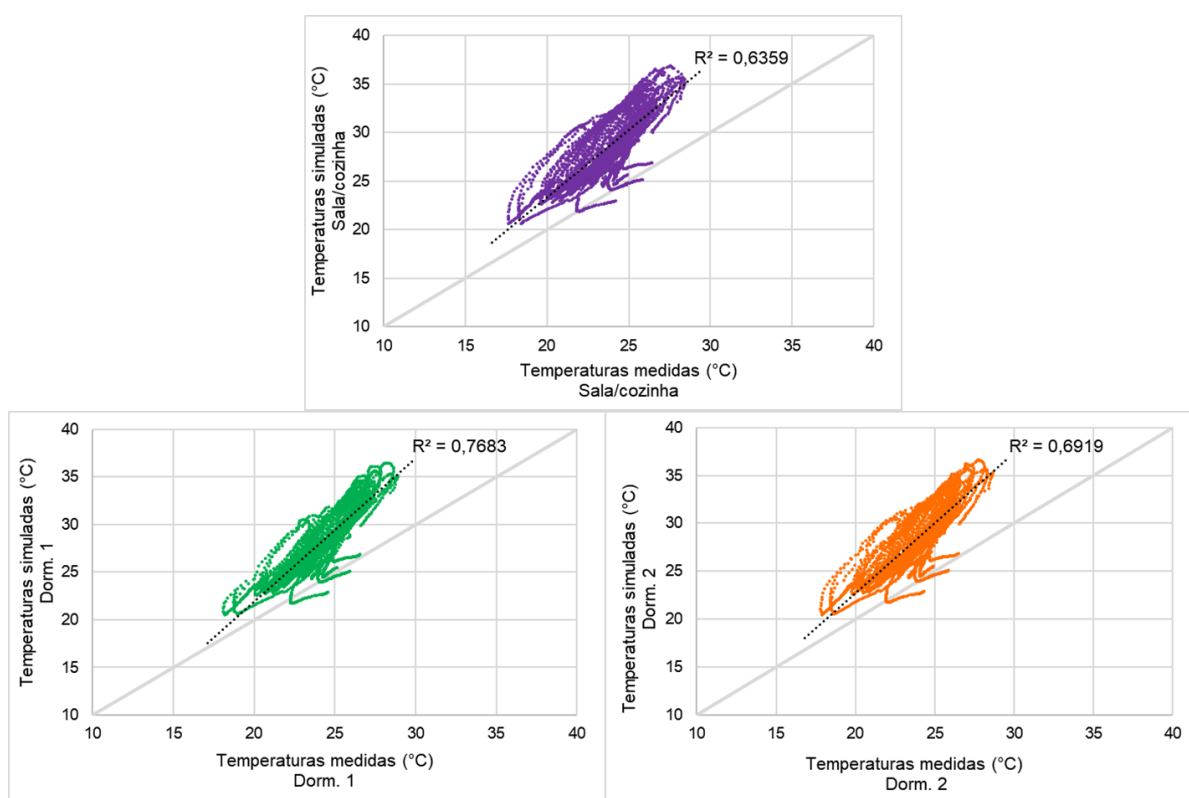
Em pesquisas que envolvem a medição de variáveis, é importante ressaltar que os valores monitorados não são exatos. Foi apresentado na seção 3.3.1 que o equipamento utilizado para medir a temperatura do ar interno do protótipo apresenta acurácia de  $\pm 0,35^\circ\text{C}$ . Dessa maneira, complementa-se a análise para as etapas de calibração com verificação da porcentagem de valores de temperatura operativa do ar simulados que se encontram dentro do intervalo de acurácia do aparelho de medição. Assim, foi possível compreender de maneira mais profunda o comportamento do modelo computacional e embasar as decisões sobre modificações nas etapas da calibração. Para a sala/cozinha, 1,36% das temperaturas simuladas estavam dentro do intervalo; para o dormitório 1, 1,50%; para o dormitório 2, 0,98%. A ocorrência dos horários em que a temperatura simulada esteve dentro do intervalo de acurácia do aparelho de medição estão apresentadas junto das curvas de temperatura, na Figura 25.

Figura 25 - Resultados da simulação do modelo computacional v0, para a sala/cozinha, dormitório 1 e dormitório 2, respectivamente.



Na Figura 26 pode-se observar de maneira mais clara que as temperaturas simuladas estão mais altas do que as temperaturas medidas, em geral. O gráfico mostra as temperaturas do ar medidas (no eixo de abscissas) com as temperaturas operativas do ar simuladas (eixo de ordenadas). Quanto mais próximo o ponto está da linha diagonal, mais ajustado é o modelo computacional. Pontos acima da linha diagonal indicam que as temperaturas simuladas estão mais elevadas do que as medidas. Por sua vez, pontos abaixo da linha diagonal indicam o oposto. Dessa forma, fica evidente que o modelo  $v0$  promove o superaquecimento dos ambientes.

Figura 26 – Gráficos de temperaturas medidas e simuladas, dos ambientes monitorados, modelo  $v0$



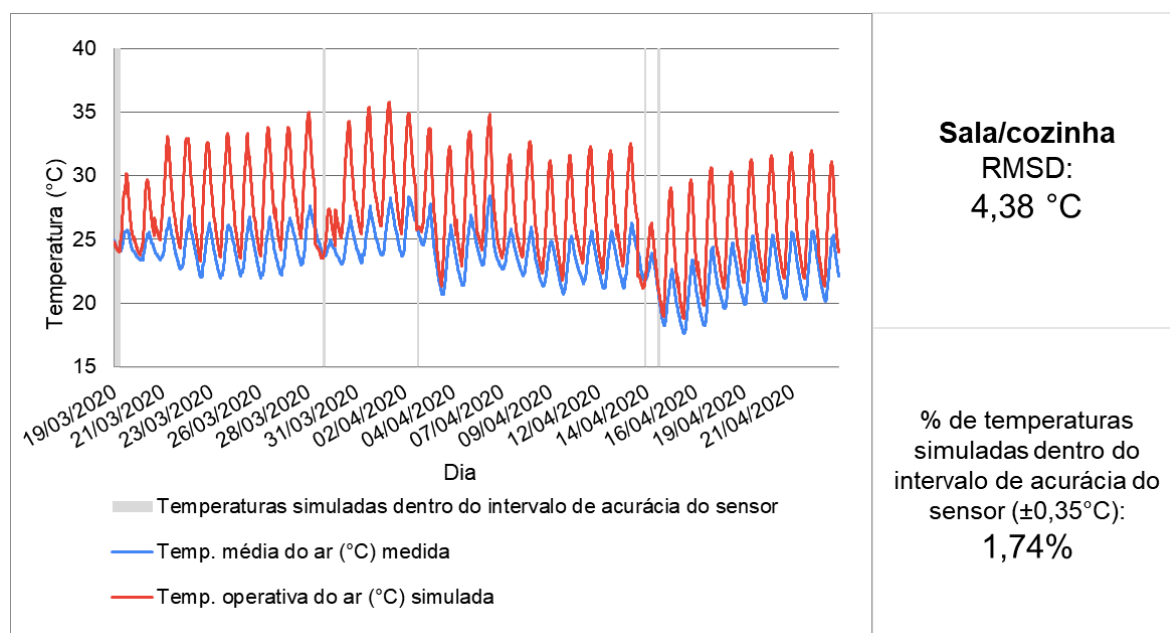
Embora as temperaturas do ar medidas tenham variado entre os ambientes monitorados, bem como as temperaturas simuladas, graficamente as curvas são muito semelhantes. Sendo assim, os resultados das curvas de temperatura para os próximos modelos computacionais serão apresentados apenas para o ambiente sala/cozinha.

Na etapa seguinte, com as modificações realizadas nos modelos *v0.1* e *v0.2*, os resultados obtidos foram piores quando comparados ao modelo *v0*, ou seja, mais distantes dos valores monitorados na edificação.

Com o modelo *v0.1* foi obtido RMSD de 5,59°C para a sala/cozinha, embora a porcentagem de valores simulados dentro do intervalo de medição para este ambiente tenha sido maior, igual a 1,48%. Já com o modelo *v0.2* foi obtido o maior RMSD da calibração, igual a 5,90°C para a sala/cozinha. Dessa maneira, decidiu-se manter para as etapas seguintes da calibração a relação 80/20 para as parcelas difusa/direta da radiação solar.

Posteriormente, com a simulação do modelo *v1*, no qual propriedades relativas à infiltração de ar foram modificadas, houve redução da RMSD para todos os ambientes. Para a sala/cozinha, a RMSD foi igual a 4,38°C; para o dormitório 1, foi igual a 3,75°C; para o dormitório 2, foi igual a 4,22°C. Como pode ser observado na Figura 27, houve aproximação entre as curvas de temperaturas medidas e temperaturas simuladas. Porém, embora o comportamento de ambas as curvas tenha se mantido semelhante, observou-se que nas temperaturas operativas simuladas os picos ainda foram elevados. A diferença absoluta máxima entre valores medidos e simulados foi de 8,82°C, observado também no dia 31/03/2020, às 16h, como ocorreu no modelo *v0*.

Figura 27 – Resultados da simulação do modelo computacional *v1*, para a sala/cozinha

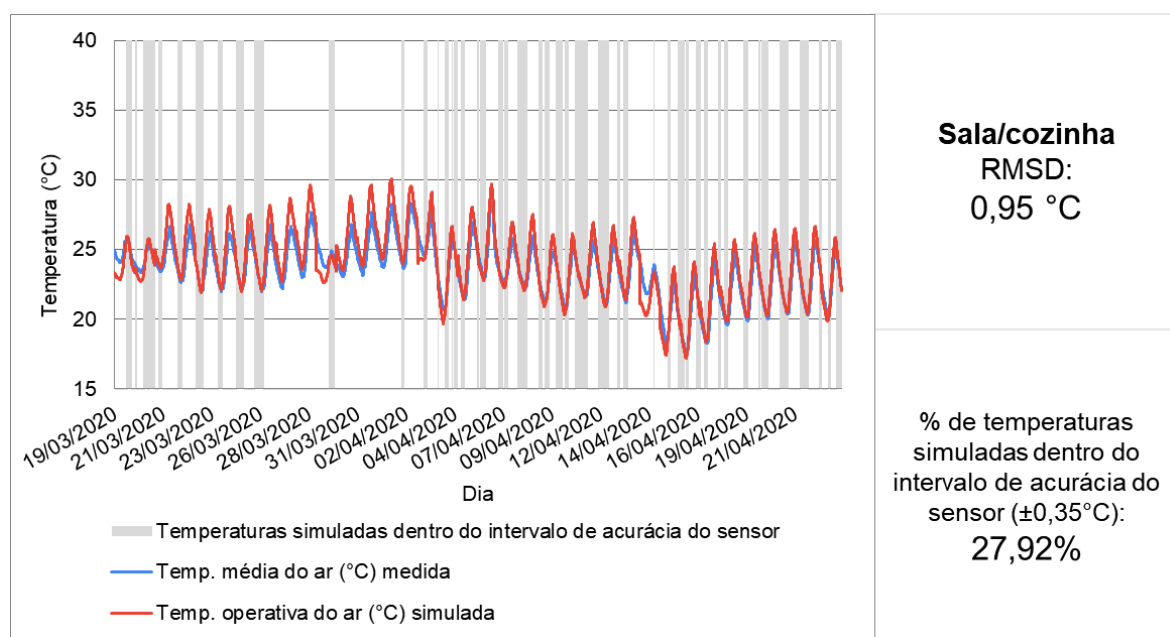


Além disso, as temperaturas simuladas que ficaram dentro do intervalo de acurácia do aparelho de medição foram maiores do que no arquivo *v0*. Obteve-se 1,74% de simulações dentro do intervalo para a sala/cozinha; 2,69% para o dormitório 1; e 2,14% para o dormitório 2.

No modelo *v1.1*, a modificação realizada resultou em valores de temperatura simulada mais distantes do que os obtidos pelo modelo *v1*, de modo que foi desconsiderada para as etapas posteriores. Já os resultados obtidos para os modelos *v1.2* e *v1.3* foram melhores do que os obtidos com o modelo *v1*, embora os valores de coeficiente de fluxo de ar utilizados não tenham sido encontrados em referências. Esse resultado apontou para a importância que os coeficientes de fluxo de ar podem apresentar no resultado de simulações computacionais visando a calibração de modelos.

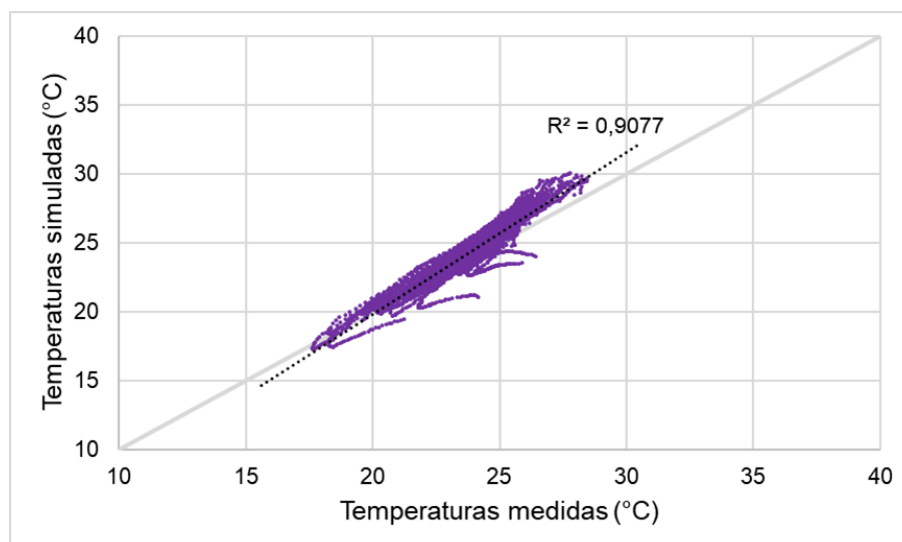
A configuração do modelo *v2*, com a consideração do sombreamento em algumas superfícies da fachada, foi a que proporcionou a maior aproximação entre os valores simulados e medidos, em comparação com os demais modelos. A RMSD obtida foi igual a 0,95°C para a sala/cozinha; 1,20°C para o dormitório 1; e 1,18°C para o dormitório 2. As porcentagens de temperaturas simuladas dentro do intervalo de acurácia do aparelho de medição foram iguais a 27,92%, 23,84% e 21,04% para os ambientes sala/cozinha, dormitório 1 e dormitório 2, respectivamente. Na Figura 28 pode-se observar que as curvas se aproximaram consideravelmente. Também se observa que a maior parte das temperaturas simuladas dentro do intervalo de medição se encontram a partir da metade do período de calibração. Esse comportamento se repetiu para os demais ambientes analisados.

Figura 28 - Resultados da simulação do modelo computacional v2, para a sala/cozinha



Houve maior aproximação entre os valores medidos e simulados, como pode ser observado na Figura 29. Os modelos anteriores resultavam em temperaturas operativas do ar mais elevadas do que as temperaturas medidas. Por meio do gráfico é possível analisar que os valores se aproximaram e o modelo está mais ajustado, embora ainda exista uma grande quantidade de pontos que indicam que as temperaturas simuladas foram mais elevadas.

Figura 29 – Gráfico de temperaturas medidas e simuladas, da sala/cozinha, modelo v2



Já as RMSD obtidas para o modelo *v2.1* foram melhores, até  $0,12^{\circ}\text{C}$  menores para o dormitório 2, porém não tiveram tanto impacto quanto nos testes anteriores. Isto indica que, para a edificação em análise, o sombreamento se apresenta como fator determinante em seu comportamento.

A partir do modelo *v2*, a maioria das demais modificações não resultaram em melhorias significativas no ajuste do modelo computacional. Com a configuração do modelo *v3*, os resultados obtidos foram melhores, com redução na RMSD calculada de  $0,03^{\circ}\text{C}$  para todos os ambientes.

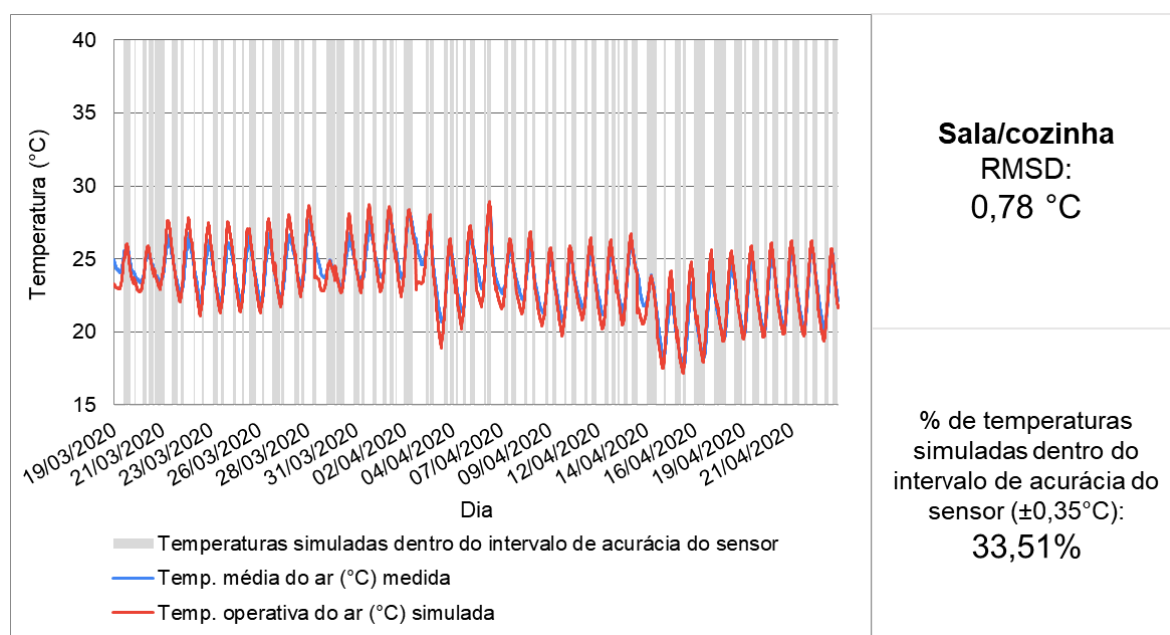
Os modelos *v4* e *v4.1*, com as modificações no valor da absorvância solar das paredes externas, proporcionaram poucas modificações nos resultados, sendo que o modelo *v4.1* se mostrou mais ajustado.

O modelo *v5*, por sua vez, não resultou em mudanças significativas, embora os valores de temperatura simulados tenham se aproximado mais dos valores medidos. Isso foi observado também para o modelo *v5.1*. Os melhores resultados foram obtidos para o modelo *v5.2*. Os resultados obtidos com os modelos *v5.3*, *v5.4* e *v5.5* não foram satisfatórios.

Com a simulação do modelo *v6* houve uma grande aproximação entre os valores medidos e simulados, refletidos na RMSD igual a  $0,78^{\circ}\text{C}$  obtida para a sala/cozinha. A melhora nos resultados decorrentes da mudança da configuração do piso faz sentido com a montagem do experimento. A temperatura do solo medida no protótipo habitacional representa a temperatura da superfície externa do piso. Sendo assim, a camada de saibro fica abaixo do ponto de medição onde está instalado o sensor. Como as trocas de calor entre a edificação e o solo utilizam a temperatura do solo medida como condição de contorno, a camada de saibro não faz parte desses balanços térmicos na simulação.

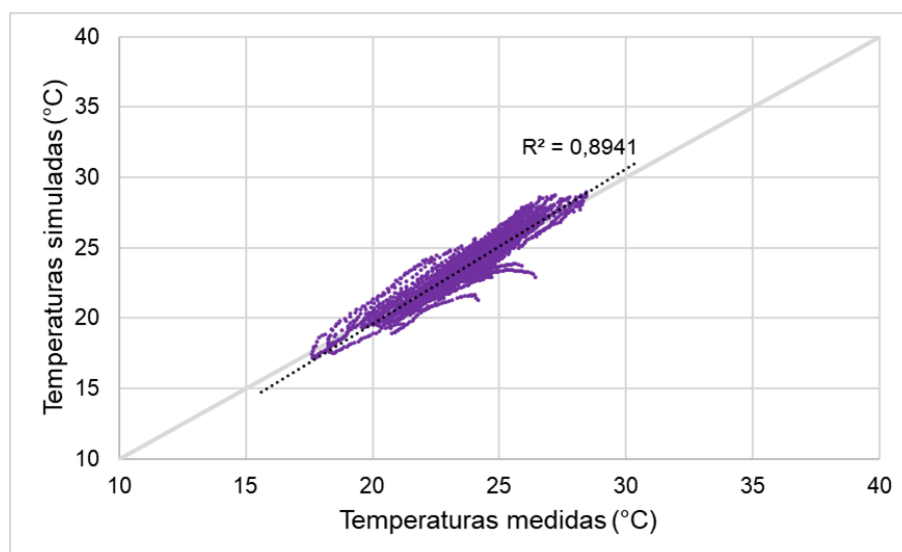
Na Figura 30 é possível observar os resultados obtidos com a simulação do modelo *v6*. Observa-se que os momentos em que a temperatura operativa do ar simulada esteve dentro do intervalo de acurácia do aparelho de medição ocorrem durante todo o período, indicando que o modelo computacional foi capaz de reproduzir satisfatoriamente as condições reais.

Figura 30 - Resultados da simulação do modelo computacional v6, para a sala/cozinha



A aproximação entre as temperaturas operativas do ar simuladas e as temperaturas do ar medidas na edificação pode ser observada na Figura 31. Houve maior concentração de pontos próximos à diagonal do que quando comparado aos outros modelos. Além disso, a tendência do modelo em superaquecer os ambientes deixou de existir.

Figura 31 - Gráfico de temperaturas medidas e simuladas, da sala/cozinha, modelo v6

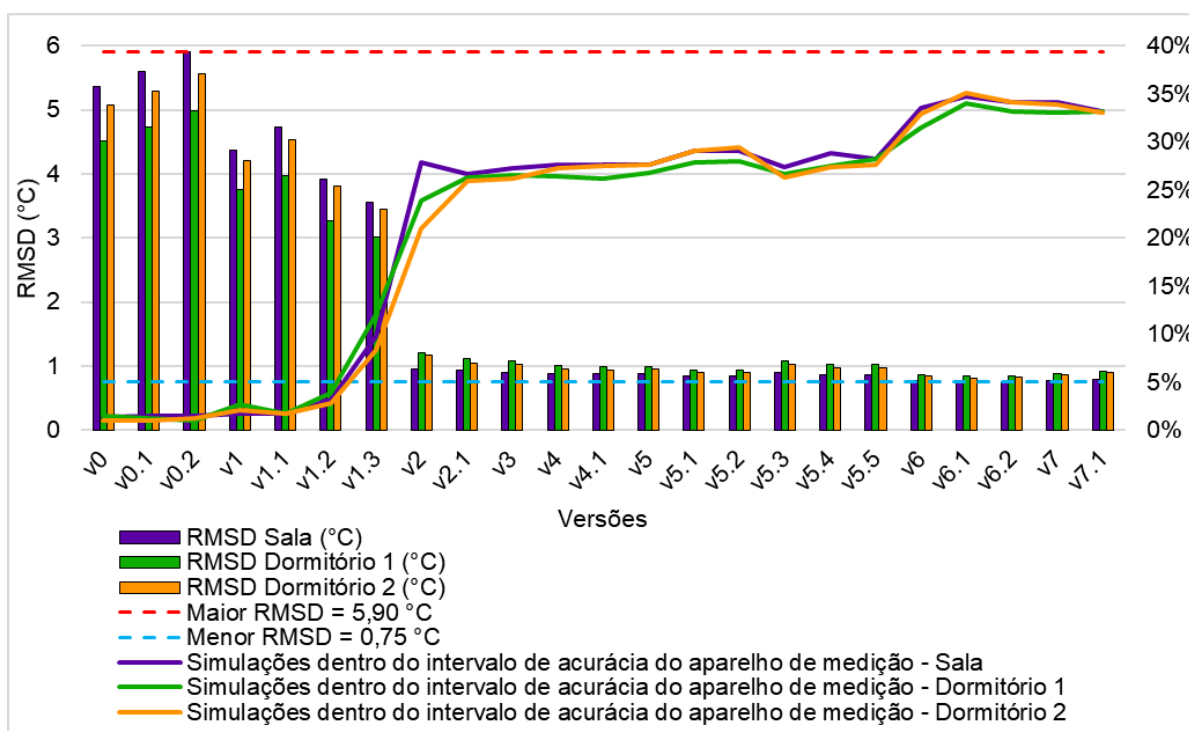


A simulação do modelo v6.1 resultou em RMSD igual a 0,75°C para a sala/cozinha; 0,84°C para o dormitório 1; e 0,82°C para o dormitório 2. Em relação às temperaturas simuladas dentro do intervalo de acurácia do aparelho de medição, para a sala cozinha obteve-se 34,78%; para o dormitório 1, 33,97%; e para o dormitório 2, 35,04%. O modelo v6.2, por sua vez, resultou em valores menos ajustados.

Por fim, os modelos v7 e v7.1 não proporcionaram aproximação entre os valores simulados e monitorados. Dessa maneira, o modelo v6.1 foi definido como modelo calibrado.

Na Figura 32 estão apresentados os resultados do processo de calibração do modelo computacional. É possível observar a evolução da RMSD de cada ambiente em todas as versões simuladas juntamente com as porcentagens de temperaturas operativas do ar simuladas dentro do intervalo de acurácia do aparelho de medição.

Figura 32 - Resultados da calibração



#### 4.2.2 Validação preliminar do modelo computacional calibrado

A validação preliminar da calibração foi realizada para a condição em que as árvores do entorno do protótipo habitacional perdem suas folhas e há

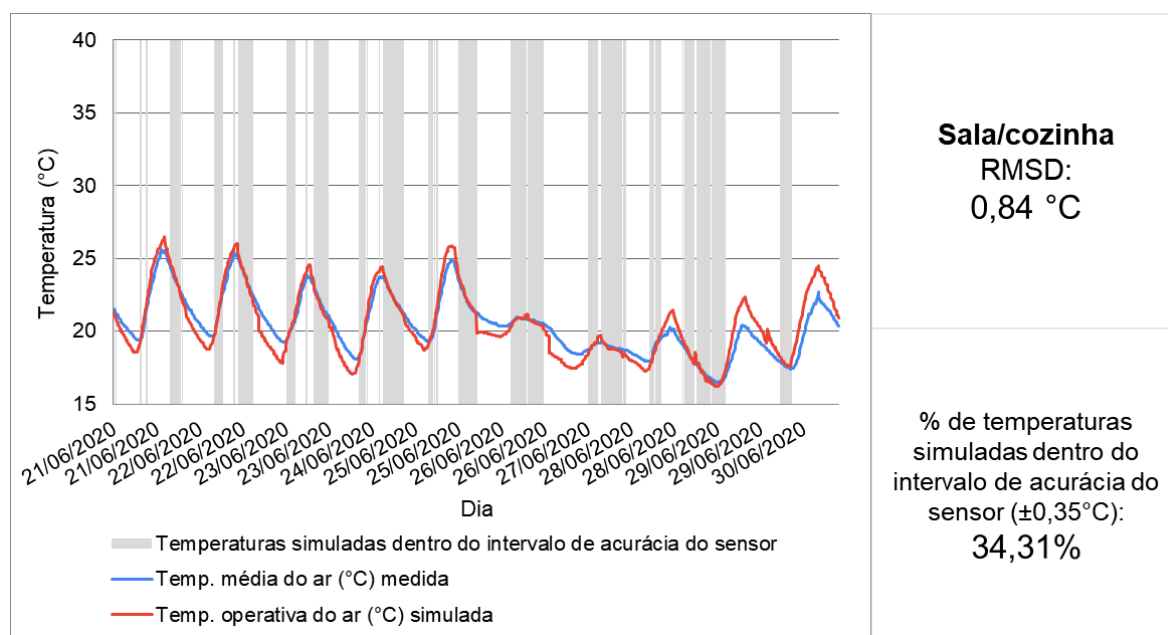
incidência solar nas fachadas. Essa condição ocorre com menor frequência durante o ano, mas pode provocar desvios significativos entre as temperaturas operativas do ar simuladas e as temperaturas medidas.

O modelo calibrado, quando simulado para o período em que não há sombreamento, se mostrou bastante capaz de representar o comportamento real da edificação, embora tenha sido calibrado para a condição em que a edificação está submetida a intenso sombreamento.

Obteve-se, para a sala/cozinha, RMSD igual a  $0,84^{\circ}\text{C}$ ; para o dormitório 1, igual a  $0,87^{\circ}\text{C}$ ; e para o dormitório 2, igual a  $0,86^{\circ}\text{C}$ . A máxima diferença absoluta foi de  $2,70^{\circ}\text{C}$ , para o dormitório 2, no dia 22/06/2020, às 11h45.

Na Figura 33 é possível observar que o comportamento das curvas é semelhante. Diferentemente do início da etapa da calibração, na validação não foram observados grandes picos de temperatura. Além disso, foi possível observar temperaturas simuladas dentro do intervalo de acurácia do sensor durante todo o período. Na sala/cozinha, foi observado que 34,31% das temperaturas simuladas entraram no intervalo de acurácia do aparelho de medição; no dormitório 1, foram 30,55%; e no dormitório 2, foram 37,23%.

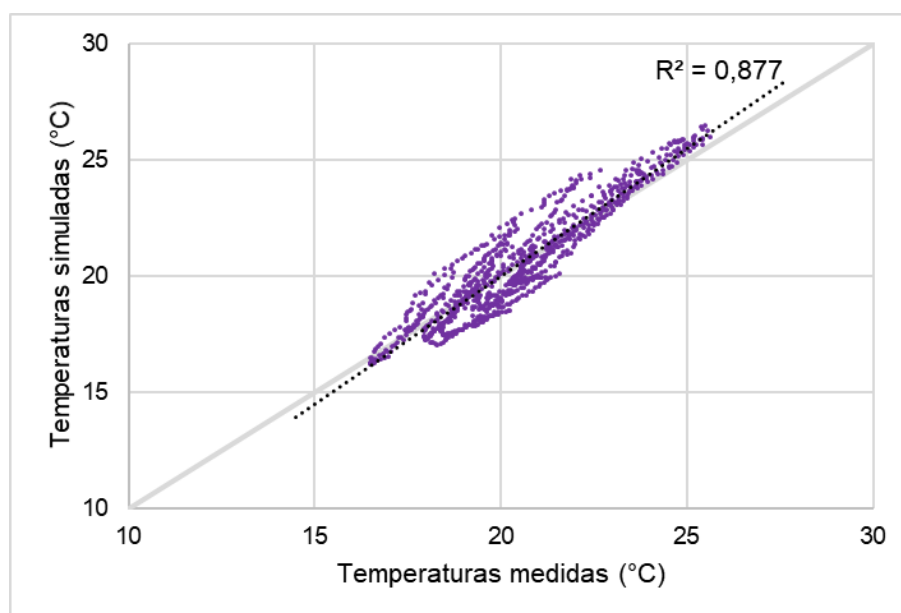
Figura 33 - Resultados da validação preliminar do modelo calibrado para a sala/cozinha



O modelo calibrado, quando submetido a um período diferente, mostrou-se capaz de simular com coerência o comportamento da edificação. Na maior parte do período, especificamente no período da noite, as temperaturas simuladas foram menores do que as temperaturas medidas. Isto pode indicar que o modelo calibrado, que possui a cobertura e as fachadas leste e sul sem incidência de radiação solar (condição *NoSun* no objeto *BuildingSurface:Detailed*), subestima o aquecimento interno dos ambientes durante o dia, resultando em temperaturas simuladas mais baixas durante a noite. Em contrapartida, nos últimos três dias os valores simulados foram superiores aos medidos durante o dia. Dessa maneira, as temperaturas durante a noite foram mais próximas. Embora pequenas, estas diferenças reforçam a necessidade da validação para cada mês analisado.

Na Figura 34 é possível observar que as temperaturas simuladas não apresentaram tendência de superestimar ou subestimar as temperaturas medidas. Por meio do gráfico pode-se concluir que o modelo se mostrou bastante ajustado, com grande número de pontos próximo à linha diagonal, sendo propícia a sua utilização nas simulações com os diferentes métodos de transferência de calor através do solo e posterior comparação com as temperaturas monitoradas.

Figura 34 - Gráfico de temperaturas medidas e simuladas, da sala/cozinha, na validação preliminar do modelo calibrado



#### 4.2.3 Validação final

Os resultados obtidos para a validação final foram separados por mês e comparados com os valores monitorados na edificação no mesmo período. Em geral, os erros encontrados demonstram que a utilização do arquivo climático modificado para a simulação não provocou diferenças significativas, uma vez que as RMSD calculadas para o período são próximas àsquelas obtidas para o modelo calibrado e para a validação preliminar.

Nos meses de janeiro, fevereiro e março, os dados de temperatura e umidade relativa do ar inseridos no arquivo climático foram monitorados pela estação meteorológica do IAPAR. A partir de 19/03/2020 iniciou-se o monitoramento externo da temperatura e umidade relativa do ar na edificação, que foram inseridas no arquivo climático de abril até dezembro.

Na Tabela 12 são apresentados os resultados mensais da simulação do modelo computacional calibrado com o arquivo climático modificado. Assim como no procedimento de calibração e validação, as RMSD são calculadas com os valores simulados e medidos.

Tabela 12 - Resultados da Validação final

	Sala/cozinha		Dorm1		Dorm2	
	RMSD (°C)	% temperaturas simuladas = medidas	RMSD (°C)	% temperaturas simuladas = medidas	RMSD (°C)	% temperaturas simuladas = medidas
Janeiro <sup>1</sup>	1,01	18,71%	1,02	22,34%	0,93	25,44%
Fevereiro <sup>1</sup>	0,87	28,27%	0,95	34,05%	0,92	35,13%
Março <sup>1</sup>	0,99	22,48%	1,09	26,24%	1,04	22,48%
Abril <sup>2</sup>	0,69	38,47%	0,73	36,88%	0,83	40,38%
Maió <sup>2</sup>	0,59	41,05%	0,76	42,80%	0,68	41,05%
Junho <sup>2</sup>	0,56	47,92%	0,70	43,88%	0,73	49,53%
Julho <sup>2</sup>	0,84	24,76%	0,94	28,26%	0,83	24,76%
Agosto <sup>2</sup>	0,73	39,17%	0,79	42,53%	0,81	39,17%
Setembro <sup>2</sup>	0,66	35,97%	0,64	42,66%	0,64	37,95%
Outubro <sup>2</sup>	0,80	37,95%	0,88	36,74%	0,88	37,95%
Novembro <sup>2</sup>	0,87	34,17%	1,00	32,57%	0,97	36,20%
Dezembro <sup>2</sup>	0,62	40,78%	0,89	37,82%	0,83	40,78%

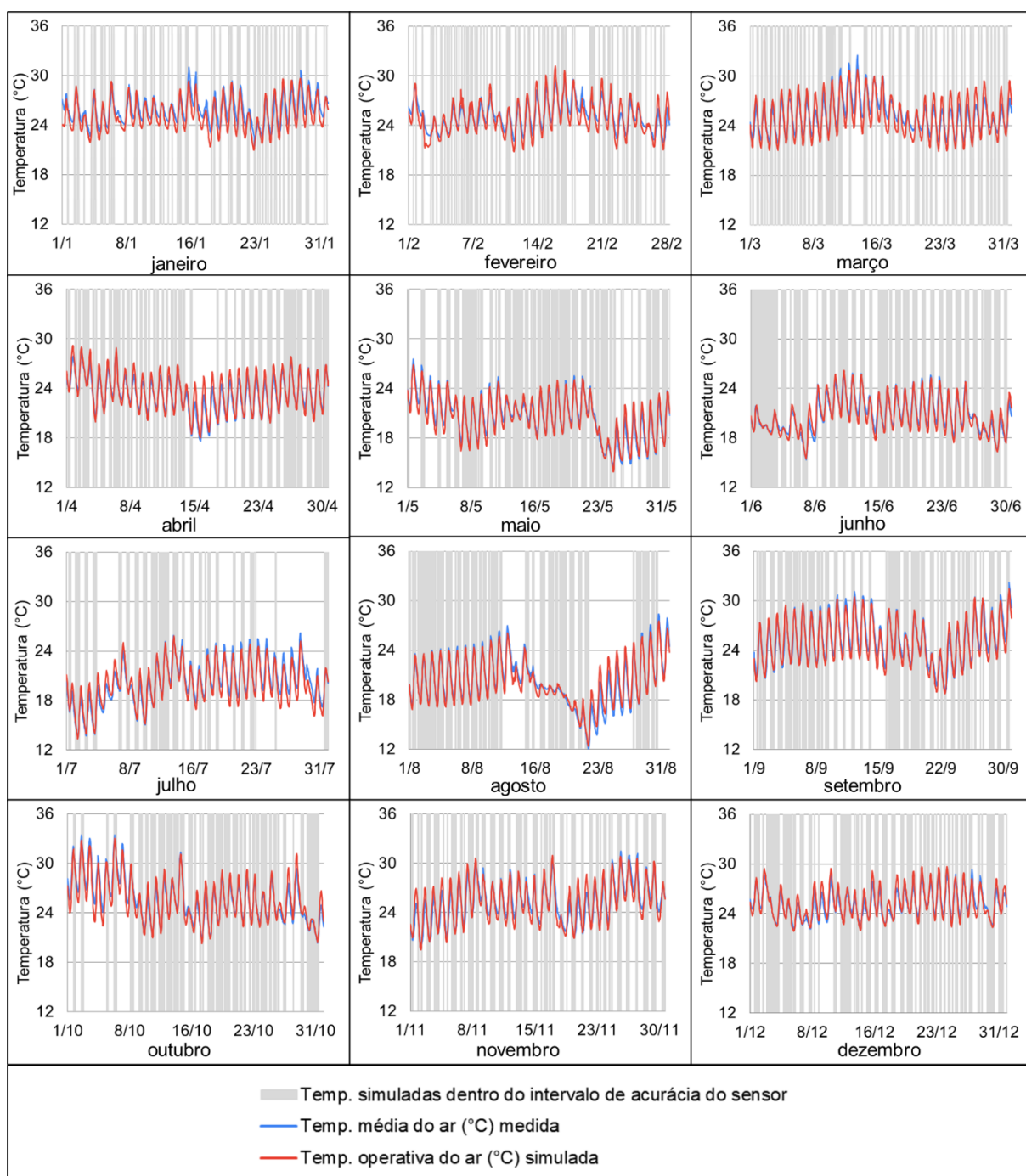
1: temperatura e umidade relativa do ar monitoradas pelo IAPAR

2: temperatura e umidade relativa do ar monitoradas na edificação

Em geral, a simulação da validação final aponta um comportamento adequado do modelo calibrado quando simulado com a utilização do arquivo climático calibrado. As RMSD da validação final superaram as RMSD do modelo calibrado em 50% dos meses para a sala, 58% para o dormitório 1, e 67% para o dormitório 2, ou seja, apresentaram comportamento mais distante do modelo real. Entretanto, as diferenças entre as temperaturas simuladas e medidas foram pequenas. A diferença máxima obtida foi de 0,26°C, 0,25°C e 0,22°C, para a sala, dormitório 1 e dormitório 2, respectivamente.

O comportamento das curvas de temperaturas operativas do ar obtidas na simulação da validação final é ajustado ao comportamento das curvas de temperaturas do ar monitoradas, como pode ser observado na Figura 35, que apresenta os dados obtidos para o ambiente sala/cozinha.

Figura 35 - Temperaturas medidas e simuladas para a sala/cozinha, na etapa de validação final



Nos meses de janeiro, fevereiro e março, embora os valores de RMSD calculados tenham sido superiores aos obtidos nos demais meses, as curvas de temperatura simulada e medida apresentam comportamento semelhante, com as maiores diferenças acontecendo nos pontos de máxima e mínima temperatura. Em julho, mês no qual as RMSD calculadas também foram superiores, é possível observar

que o modelo retornou temperaturas simuladas inferiores às monitoradas. Também é possível observar que nos últimos 10 dias quase não foram registradas temperaturas simuladas dentro do intervalo de acurácia do sensor.

Com as ponderações realizadas, considera-se que o modelo computacional calibrado, quando simulado com o arquivo climático modificado, apresenta comportamento ajustado, com valores de RMSD próximos ou inferiores aos obtidos na calibração e validação. Além disso, em alguns meses as porcentagens de temperaturas simuladas dentro do intervalo de acurácia do sensor foram superiores às obtidas na calibração e validação.

Os resultados obtidos na validação final complementarão as análises das seções a seguir.

#### 4.3 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS MÉTODOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR ATRAVÉS DO SOLO E MEDIÇÕES

Nesta seção apresentam-se os resultados obtidos com a simulação do modelo computacional calibrado, com a utilização do arquivo climático modificado, variando-se os métodos de transferência de calor através do solo.

As análises foram divididas em três grupos. O grupo 1 traz os resultados da análise das médias mensais da temperatura do solo simulada para os casos que utilizam o objeto *GroundDomain:Slab* com os modelos de UGT *KusudaAchenbach*, *FiniteDifference* e *Xing* e o caso que utiliza o objeto *GroundHeatTransfer:Slab*. O grupo 2 apresenta os resultados da análise da temperatura do solo calculada para os mesmos casos, porém em base horária. O grupo 3 apresenta os resultados da temperatura operativa do ar simulada para os mesmos casos, além do caso que utiliza o objeto *Foundation:Kiva*. Os resultados obtidos nos três grupos foram comparados com a temperatura da superfície externa do piso e com a temperatura média do ar, monitoradas na edificação.

Por fim, o caso que utiliza o objeto *GroundDomain* com modelo de UGT *FiniteDifference* foi simulado variando-se as propriedades termofísicas do solo para analisar o impacto destas variáveis no resultado da temperatura do ar e da temperatura da superfície externa do piso dos ambientes.

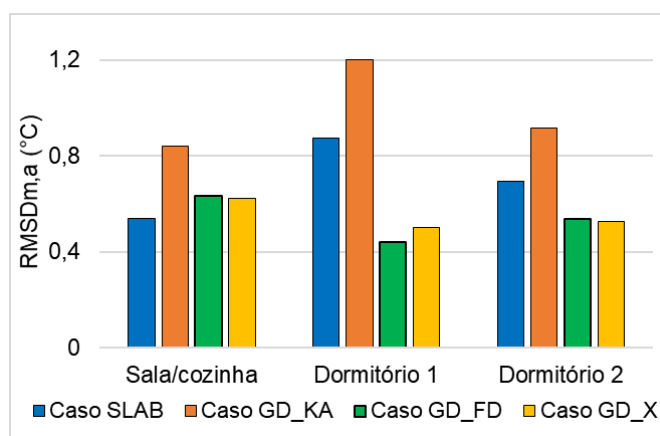
### 4.3.1 Grupo 1: Análise das médias mensais da temperatura do solo

As análises do grupo 1 foram realizadas com base nas médias mensais da temperatura da superfície externa do piso monitorada nos ambientes de permanência prolongada da edificação e da temperatura. Elas são comparadas com as médias mensais da temperatura da superfície externa do piso simulada, que foi obtida pela variável *Surface Outside Face Temperature* para os casos *GroundDomain KusudaAchenbach*, *FiniteDifference* e *Xing*, e para o caso *GroundHeatTransfer:Slab*. Nos gráficos, esses casos são identificados como GD\_KA, GD\_FD, GD\_X e SLAB, respectivamente.

A partir da análise do período completo de um ano foi possível observar diferenças entre a temperatura da superfície externa do piso simulada e a temperatura monitorada na edificação, para todos os casos. Além disso, observou-se que as temperaturas obtidas pela simulação dos casos diferem entre si.

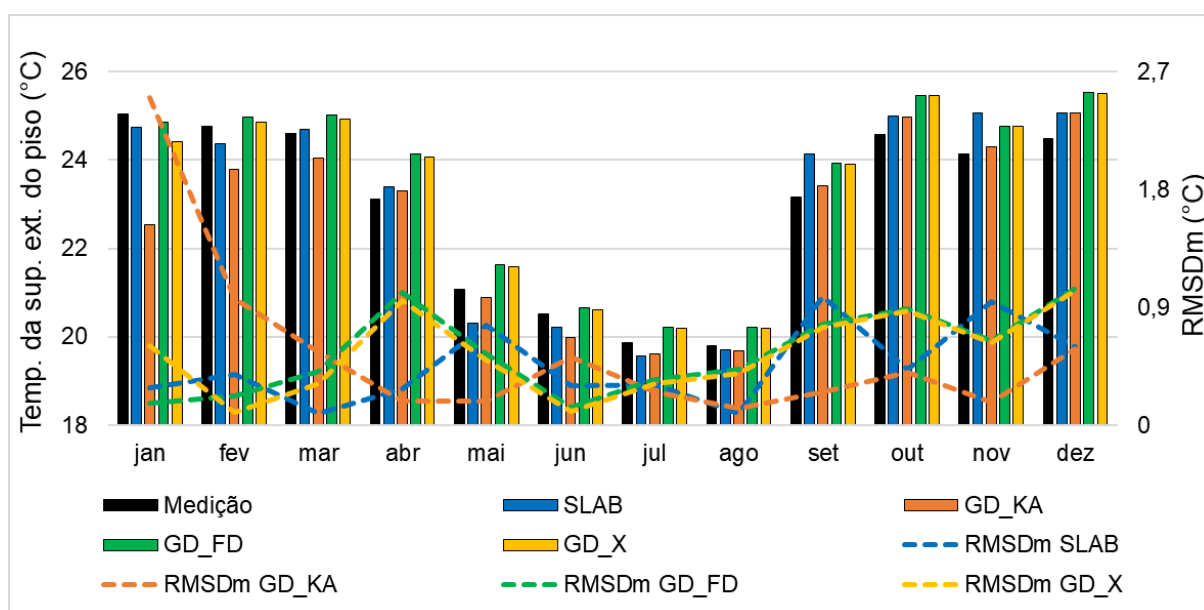
Na Figura 36 estão apresentadas as raízes do erro quadrático médio ( $RMSD_{m,a}$ ) calculadas a partir das médias mensais da temperatura da superfície externa do piso simulada e medida para o período de um ano, para todos os casos. Para todos os ambientes, o caso *GroundDomain* com modelo de UGT *KusudaAchenbach* apresentou os piores resultados, sendo que para o dormitório 1 foi obtido  $RMSD_{m,a}$  igual a  $1,20^{\circ}\text{C}$ . O caso *GroundHeatTransfer:Slab* apresentou os melhores resultados para a sala/cozinha. Os casos *GroundDomain FiniteDifference* e *Xing* obtiveram resultados semelhantes entre si para todos os ambientes, sendo os que apresentaram os melhores resultados para os dormitórios.

Figura 36 –  $RMSD_{m,a}$  calculada com as médias mensais da temperatura da superfície externa do piso



Para compreender melhor o comportamento de cada caso, foi realizada a análise mensal dos dados obtidos. Para a análise mensal adotou-se a  $RMSD_m$  que, por utilizar apenas um valor para cada mês, representa a diferença em módulo entre a temperatura do solo medida e simulada. Na Figura 37 estão apresentados os resultados mensais para a sala/cozinha.

Figura 37 - Sala/cozinha: Médias mensais da temperatura da superfície externa do piso simulada e  $RMSD_m$  calculada para os casos



A temperatura da superfície externa do piso obtida por meio do objeto *GroundDomain* com modelo de UGT *KusudaAchenbach* apresenta as maiores

diferenças em relação à temperatura medida nos dois primeiros meses do ano. Em janeiro observa-se que a média da temperatura do solo obtida pelo *objeto GroundDomain* com modelo de UGT *KusudaAchenbach* foi 2,50°C inferior à média da temperatura monitorada; em fevereiro, a diferença foi de 0,97°C. Nos meses seguintes, entretanto, as  $RMSD_m$  calculadas para o *objeto GroundDomain KusudaAchenbach* são menores. Embora tenha apresentado os piores resultados na análise anual, o *objeto GroundDomain* com modelo de UGT *KusudaAchenbach* apresenta a menor  $RMSD_m$  entre todos os casos em sete meses do ano.

As temperaturas do solo obtidas por meio dos casos *GroundDomain FinitteDifference* e *Xing* são semelhantes ao longo do ano, exceção feita para o mês de janeiro. Neste mês, o caso *GroundDomain FinitteDifference* apresenta  $RMSD_m$  igual a 0,17°C, enquanto o caso *GroundDomain Xing* apresenta  $RMSD_m$  igual a 0,61°C. Em comparação com as temperaturas monitoradas no piso da sala/cozinha, as temperaturas calculadas pelos casos *GroundDomain FinitteDifference* e *Xing* são mais elevadas durante a maior parte do ano.

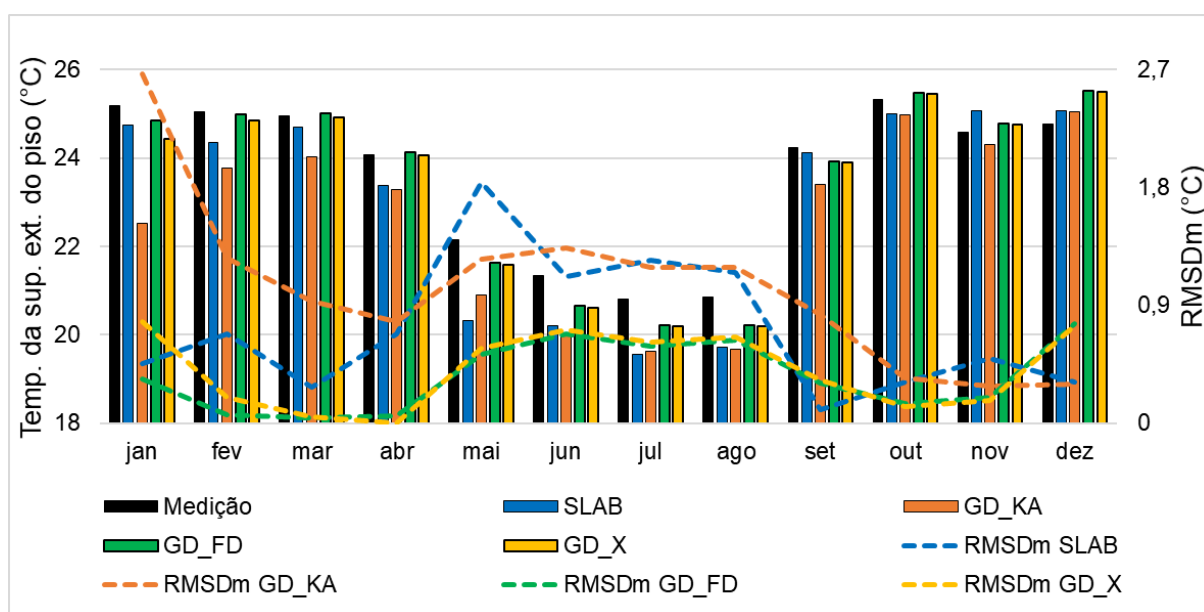
Diferentemente dos casos anteriores, as temperaturas da superfície externa do piso calculadas por meio do caso *GroundHeatTransfer:Slab* são fornecidas em médias mensais. Assim, para cada mês é calculada uma única temperatura do solo. Em dois meses do ano, especificamente março e agosto, o caso *GroundHeatTransfer:Slab* apresentou o melhor resultado dentre os casos, com  $RMSD_m$  igual a 0,09°C.

Os resultados obtidos para o dormitório 1 são apresentados na Figura 38. As temperaturas da superfície externa calculadas pelo *objeto GroundDomain* com modelo de UGT *KusudaAchenbach* foram as que apresentaram as maiores diferenças quando comparadas com a medição. Assim como observado para a sala/cozinha, o *objeto GroundDomain KusudaAchenbach* apresenta as maiores diferenças nos primeiros meses, com temperaturas simuladas menores do que as monitoradas. Entretanto, para o dormitório 1 as diferenças não diminuíram como observado para a sala/cozinha. De janeiro a novembro, as temperaturas calculadas pelo *objeto GroundDomain* com modelo de UGT *KusudaAchenbach* foram menores do que as temperaturas monitoradas. Esse comportamento se alterou apenas no mês de dezembro, no qual o *objeto GroundDomain KusudaAchenbach* apresentou a menor  $RMSD_m$  entre todos os casos, com valor igual a 0,30°C.

Os casos *GroundDomain* com modelo de UGT *FinitteDifference* e *Xing* apresentaram comportamento semelhante ao observado para a sala/cozinha. O caso *GroundDomain FinitteDifference* apresentou a menor  $RMSD_m$  em sete meses do ano, e o caso *GroundDomain Xing* em três meses. Assim como ocorreu para a sala/cozinha, os resultados destes casos foram os piores para o mês de dezembro.

Em relação ao objeto *GroundHeatTransfer:Slab*, as temperaturas da superfície externa do piso simuladas foram menores do que as monitoradas na edificação em grande parte do período. As diferenças são maiores entre maio e agosto, meses nos quais a temperatura do ar externo observada foi menor. O caso *GroundHeatTransfer:Slab* apresentou a menor  $RMSD_m$  para o mês de setembro, com valor igual a  $0,10^\circ\text{C}$ .

Figura 38 - Dormitório 1: Temperatura da superfície externa do piso simulada e  $RMSD_m$  calculada para os casos



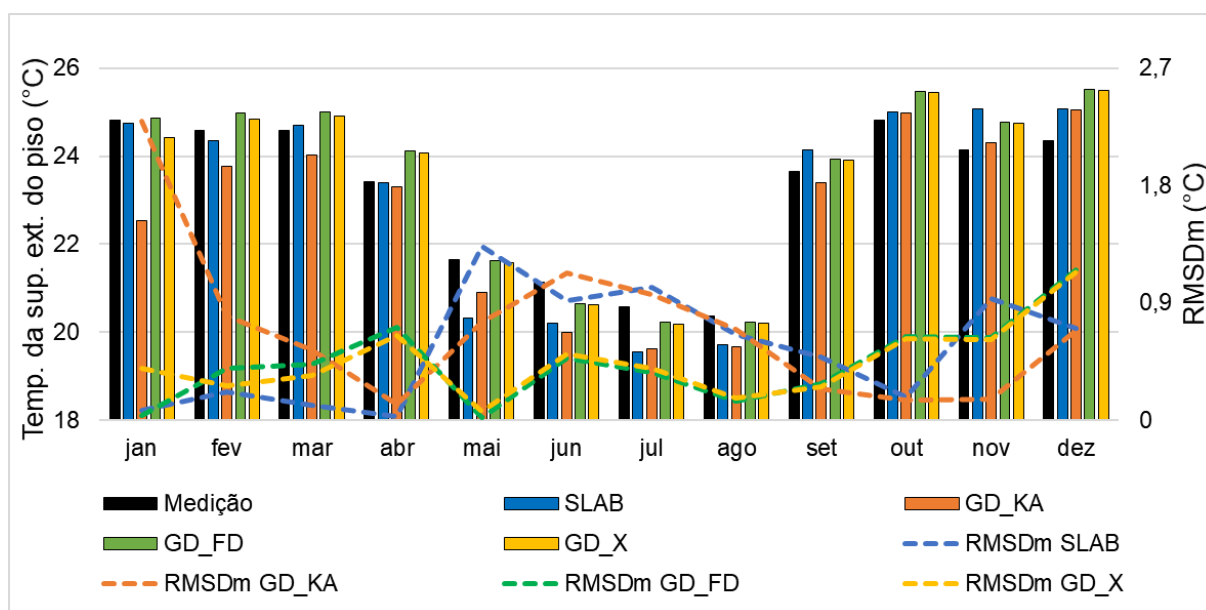
Na Figura 39 são apresentados os resultados obtidos para o dormitório 2. O comportamento observado para o objeto *GroundDomain* com modelo de UGT *KusudaAchenbach* é semelhante ao observado no dormitório 1. As médias das temperaturas simuladas nos primeiros meses apresentam as maiores diferenças, com valores menores do que os medidos. As temperaturas simuladas se aproximam das temperaturas medidas nos últimos meses. Entre setembro e dezembro o objeto

*GroundDomain KusudaAchenbach* apresenta as menores  $RMSD_m$  entre todos os casos.

Os casos *GroundDomain* com modelo de UGT *FiniteDifference* e *Xing* apresentam resultados semelhantes também para o dormitório 2, com pequenas diferenças entre si nos primeiros meses. O caso *GroundDomain FiniteDifference* apresentou a menor  $RMSD_m$  em cinco meses.

O caso *GroundHeatTransfer:Slab* apresentou menor  $RMSD_m$  em três meses, com o menor valor observado igual a  $0,03^\circ\text{C}$ , para o mês de maio. Entretanto, convém ressaltar que as diferenças de comportamento entre os ambientes observadas para o caso *GroundHeatTransfer:Slab* se devem às diferenças das temperaturas monitoradas em cada um dos ambientes. A temperatura da superfície externa do piso calculada pelo *GroundHeatTransfer:Slab* é única para toda a edificação.

Figura 39 - Dormitório 2: Temperatura da superfície externa do piso simulada e  $RMSD_m$  calculada para os casos



De modo geral, os casos *GroundDomain FiniteDifference* e *Xing* apresentaram o melhor comportamento durante todo o período, para todos os ambientes. Embora ambos os casos apresentem resultados semelhantes, o caso *GroundDomain FiniteDifference* é melhor. A maior diferença entre os dois casos é

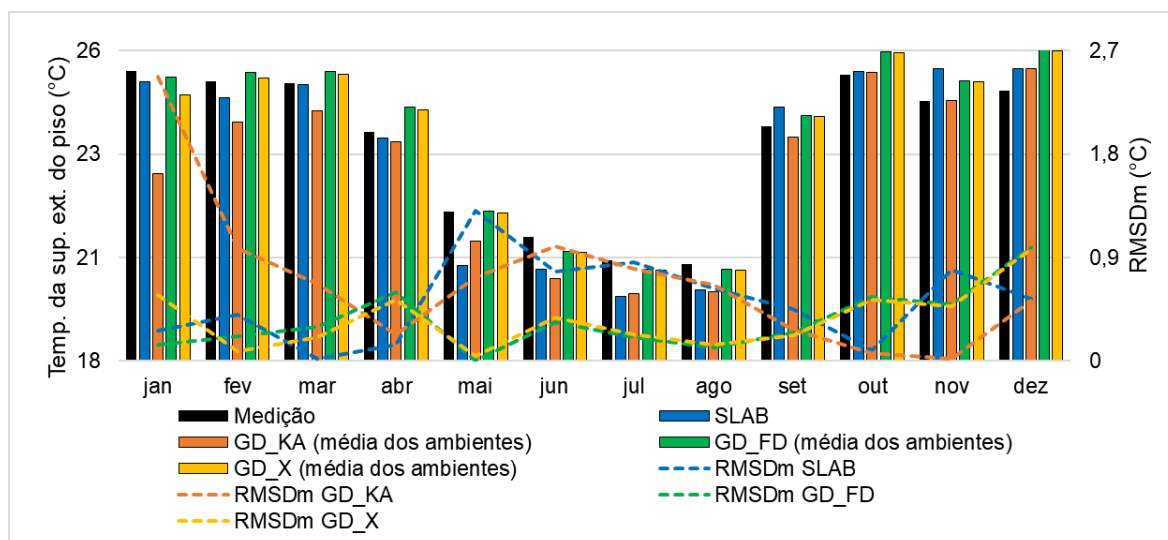
notada para o mês de janeiro, no qual o caso *GroundDomain Xing* apresenta maior  $RMSD_m$  para todos os ambientes.

As médias das temperaturas da superfície externa do piso calculadas pelo objeto *GroundDomain* com modelo de UGT *KusudaAchenbach* apresentam grande diferença quando comparadas com a temperatura monitorada nos primeiros meses. Nos últimos meses, a média das temperaturas simuladas se aproxima da média das temperaturas monitoradas.

Para os casos *GroundDomain KusudaAchenbach* e *GroundHeatTransfer:Slab* foi possível observar as maiores diferenças, para os dormitórios, nos meses mais frios do ano. Ambos os casos retornaram temperaturas da superfície externa simuladas inferiores às monitoradas. Para a sala/cozinha, as temperaturas simuladas pelos casos *GroundDomain KusudaAchenbach* e *GroundHeatTransfer:Slab* também são inferiores às monitoradas, porém mais próximas. No período do inverno, há maior incidência de radiação solar na fachada norte e no solo do entorno da edificação próximo às fachadas norte e oeste. Como os dormitórios estão localizados na fachada norte, a incidência solar no período mais frio do ano pode ter influenciado na medição da temperatura nestes ambientes, resultando nas diferenças obtidas.

Para o caso *GroundHeatTransfer:Slab*, não foi possível identificar nenhum padrão geral de comportamento nas Figura 37, Figura 38 e Figura 39. Ao analisar o caso *GroundHeatTransfer:Slab* por ambientes, as diferenças obtidas são devidas somente às diferenças de medição, uma vez que o *GroundHeatTransfer:Slab* retorna apenas um valor mensal de temperatura da superfície externa do piso para toda a edificação. Assim, para melhor compreensão do comportamento deste caso, foi realizada sua comparação com a média das temperaturas da superfície externa medida dos pisos dos ambientes da edificação. Além disso, também foi calculado o valor médio das temperaturas simuladas pelos casos *GroundDomain* para os ambientes. Os resultados são apresentados na Figura 40.

Figura 40 - Resultados do caso *GroundHeatTransfer:Slab* comparados com a média das temperaturas medidas da superfície externa do piso dos ambientes e com a média das temperaturas simuladas pelos casos *GroundDomain*



Nos primeiros meses do ano, as temperaturas da superfície externa do piso calculadas pelo *GroundHeatTransfer:Slab* são próximas à temperatura monitorada para a edificação, no valor médio entre os ambientes. Em maio, ocorre uma redução na temperatura do solo monitorada. Entretanto, o caso *GroundHeatTransfer:Slab* superestima tal redução durante o período com temperaturas externas mais baixas. Em maio é observada a maior RMSD<sub>m</sub>, igual a 1,31°C. Entre outubro e dezembro, as temperaturas do solo calculadas pelo *GroundHeatTransfer:Slab* são praticamente constantes, diferente do que foi observado no monitoramento.

Nunes *et al.* (2019) apontaram que as temperaturas do solo obtidas pelo programa *GroundHeatTransfer:Slab* foram inferiores às obtidas com a utilização do *GroundDomain*, comportamento que foi observado também no presente estudo. As diferenças observadas no caso *GroundHeatTransfer:Slab* para o período com temperaturas do ar mais baixas, entre maio e agosto, pode ser explicada também pelo procedimento de simulação do objeto *GroundHeatTransfer:Slab*. Durante as simulações de convergência, as temperaturas médias do ar interno da edificação obtidas em cada etapa são inseridas nas propriedades do método, no objeto *GroundHeatTransfer:BldgProps*, e são utilizadas para calcular a temperatura da superfície externa do piso. As temperaturas médias do ar interno utilizadas na última iteração são apresentadas na Tabela 13.

Tabela 13 - Temperatura média do ar interno inserida nas propriedades do caso *GroundHeatTransfer:Slab* no procedimento de convergência

Mês	Temperatura média do ar interno (°C)
Janeiro	25,54
Fevereiro	25,11
Março	25,50
Abril	23,92
Maio	20,48
Junho	20,86
Julho	20,08
Agosto	20,39
Setembro	25,61
Outubro	25,99
Novembro	25,96
Dezembro	25,92

Por meio da Tabela 13 observa-se que a temperatura média do ar interno sofre uma redução em maio, que se mantém até agosto. O mesmo comportamento é observado na Figura 40. Além disso, é possível observar que a temperatura média do ar interno nos últimos três meses do ano sofre pouca variação, comportamento que é refletido na temperatura da superfície externa do piso calculada pelo *GroundHeatTransfer:Slab*. Dessa maneira, observa-se que as temperaturas médias do ar interno utilizadas no objeto *GrondHeatTransfer:BldgProps* são relevantes nos resultados da temperatura do solo calculada pelo *GroundHeatTransfer:Slab*. Com isso, torna-se fundamental que as simulações para obtenção da convergência sejam realizadas para que os resultados obtidos pelo *GroundHeatTransfer:Slab* sejam mais precisos.

Por fim, a análise do caso *GroundHeatTransfer:Slab* para o período de um ano realizada em comparação com a média das temperaturas da superfície externa dos ambientes obteve  $RMSD_{m,a}$  igual a  $0,63^{\circ}\text{C}$ . Os casos *GroundDomain*, com os modelos de UGT *KusudaAchenbach*, *Finittedifference* e *Xing*, quando analisados pela média das temperaturas simuladas para os ambientes, resultaram em  $RMSD_{m,a}$  igual a  $0,94^{\circ}\text{C}$ ,  $0,43^{\circ}\text{C}$  e  $0,45^{\circ}\text{C}$ , respectivamente. Assim, para a análise realizada no grupo 1, para as médias mensais, o caso *GroundHeatTransfer:Slab* se mostrou mais preciso do que o objeto *GroundDomain* com modelo de UGT *KusudaAchenbach*. Os casos que mais se aproximaram das condições monitoradas na edificação foram os

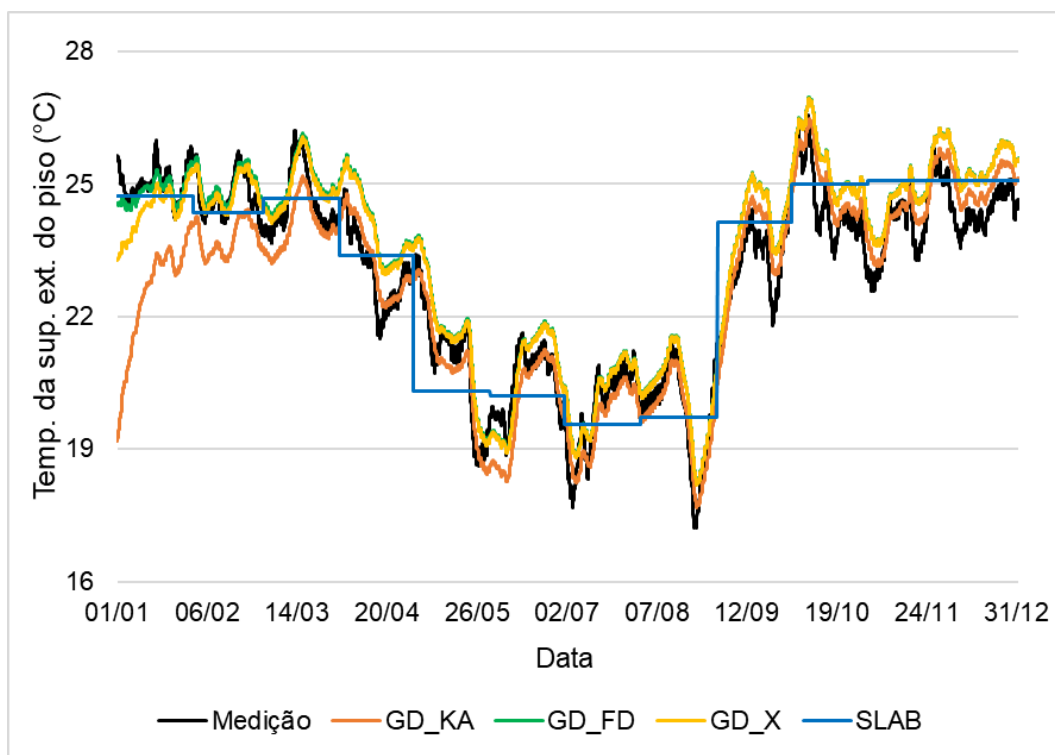
casos *GroundDomain* *FiniteDifference* e *Xing*, sendo que o primeiro apresentou valores mais próximos.

A seguir, serão apresentadas as análises realizadas com base nos dados horários.

#### 4.3.2 Grupo 2: Análise da temperatura do solo em base horária

No grupo 2 são realizadas as análises da temperatura do solo simulada e medida em base horária. Assim como no grupo 1, são analisados os casos *GroundDomain*, com os modelos de UGT *KusudaAchenbach*, *FiniteDifference* e *Xing*, e *GroundHeatTransfer:Slab*. A análise horária permite observar de forma mais precisa o comportamento de cada um dos casos em comparação com a temperatura medida. Na Figura 41 apresentam-se as temperaturas da superfície externa do piso da sala/cozinha simuladas por cada um dos casos, juntamente com a temperatura medida no ambiente no período de um ano.

Figura 41 - Sala/cozinha: Temperatura horária da superfície externa do piso



Na Figura 41 é possível observar que os casos *GroundDomain* foram capazes de simular o comportamento da temperatura monitorada. Em geral, os pontos de temperatura máxima e mínima das temperaturas simuladas pelos casos *GroundDomain* ocorreram próximos aos horários em que foram monitorados na edificação, embora todos tenham apresentado diferenças em algum período.

Porém, é necessário ressaltar que esse comportamento não foi observado no início do período. Nos primeiros dias, as temperaturas simuladas por todos os casos são inferiores à temperatura monitorada. A diferença maior é observada para o objeto *GroundDomain* com modelo de UGT *KusudaAchenbach*. Na primeira hora de janeiro, a temperatura simulada é 6,46°C menor do que a monitorada na superfície externa do piso da sala/cozinha. Entretanto, ainda em janeiro os casos *GroundDomain* com modelo de UGT *FiniteDifference* e *Xing* aproximam-se dos valores medidos.

Na Figura 41 também é possível observar como as temperaturas calculadas pelo caso *GroundHeatTransfer:Slab* se distanciam da temperatura monitorada na maior parte do período, uma vez que não acompanham a variação horária.

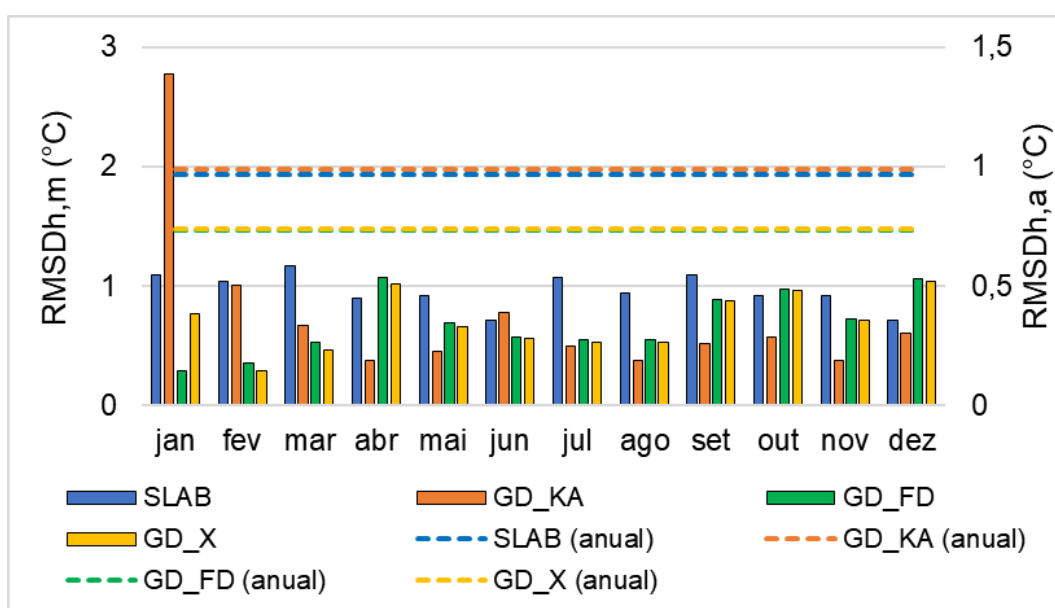
Embora as medições de temperatura da superfície externa do piso tenham resultado em valores distintos para os ambientes, tais diferenças são pequenas e não são diferenciáveis no gráfico de valores horários. Assim, os gráficos para os dormitórios não foram apresentados nos resultados.

Entretanto, quando se analisam as raízes do erro quadrático médio calculadas para cada um dos casos, é possível observar as diferenças entre os ambientes. As raízes do erro quadrático médio foram calculadas com base nos valores horários de temperaturas medidas e simuladas, e analisadas mensalmente e para todo o período, resultando nos índices  $RMSD_{h,m}$  e  $RMSD_{h,a}$ , respectivamente.

Na Figura 42 são apresentados os resultados para a sala/cozinha. Os casos *GroundDomain* com modelo de UGT *FiniteDifference* e *Xing* apresentam  $RMSD_{h,a}$  igual a 0,73°C e 0,74°C, respectivamente. Os resultados mensais entre os casos variam nos três primeiros meses, mas são semelhantes no restante do ano. Na análise horária, a grande diferença observada para o objeto *GroundDomain* com modelo de UGT *KusudaAchenbach* no mês de janeiro influencia significativamente na análise anual. Ainda que o objeto *GroundDomain KusudaAchenbach* apresente as menores  $RMSD_{h,m}$  na maioria dos meses, a  $RMSD_{h,a}$  calculada para este objeto é a

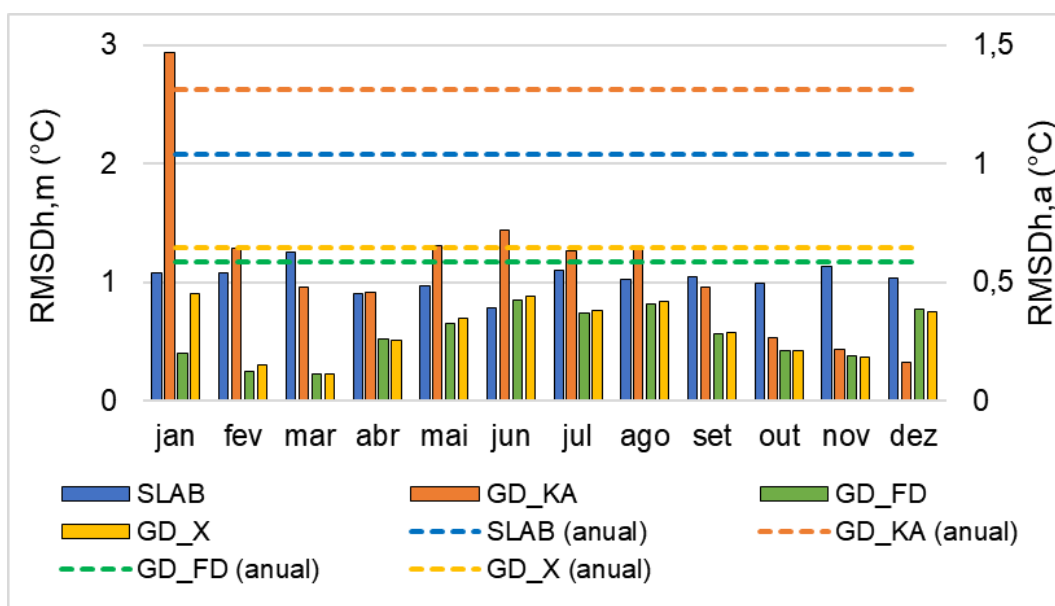
maior entre todos os casos analisados, igual a  $0,99^{\circ}\text{C}$ . A análise horária do caso *GroundHeatTransfer:Slab* apresenta falhas porque o indicador RMSD é sensível a valores extremos. Ainda assim, em alguns meses o caso *GroundHeatTransfer:Slab* resultou em  $\text{RMSD}_{h,m}$  inferiores aos obtidos para os casos *GroundDomain* com modelo de UGT *FiniteDifference* e *Xing*, embora na análise anual tenha obtido  $\text{RMSD}_{h,a}$  superiores.

Figura 42 - Sala/cozinha: RMSD calculadas com as temperaturas da superfície externa do piso em base horária



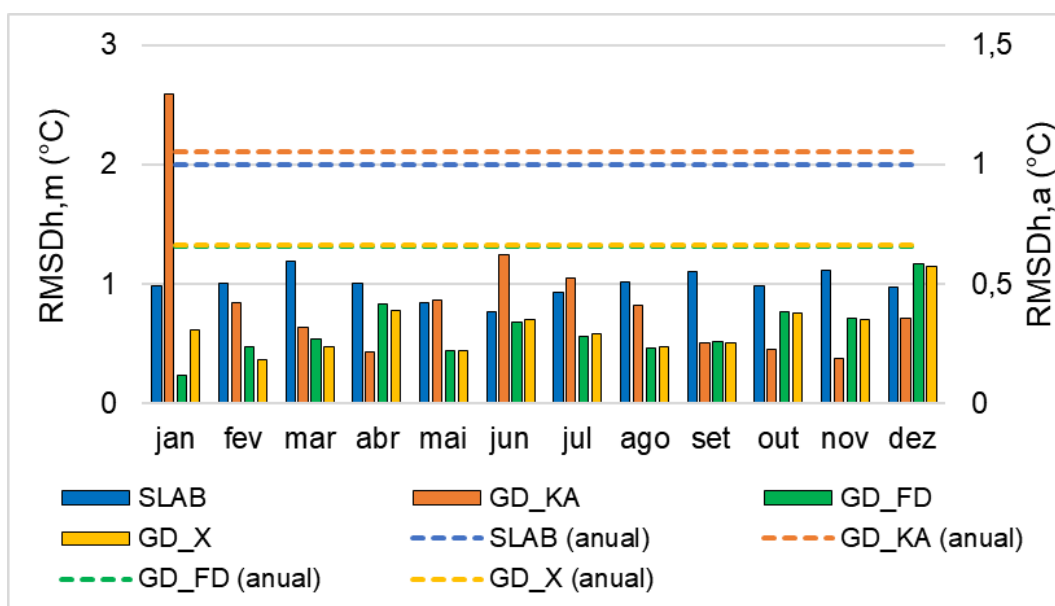
Na Figura 43 são apresentados os resultados para o dormitório 1. Neste ambiente, entre janeiro e novembro, os casos *GroundDomain* com modelo de UGT *FiniteDifference* e *Xing* apresentaram os menores valores de  $\text{RMSD}_{h,m}$ . Na análise anual, o caso *GroundDomain FiniteDifference* apresentou  $\text{RMSD}_{h,a}$  igual a  $0,59^{\circ}\text{C}$ , menor entre todos os casos. Para o objeto *GroundDomain* com modelo de UGT *KusudaAchenbach*, os resultados mensais e anual foram inferiores quando comparados à sala/cozinha. A  $\text{RMSD}_{h,a}$  para o *GroundDomain KusudaAchenbach* foi de  $1,31^{\circ}\text{C}$ , a maior entre todos os casos analisados.

Figura 43 - Dormitório 1: RMSD calculadas com as temperaturas da superfície externa do piso em base horária



Os resultados obtidos para o dormitório 2 são apresentados na Figura 44. Na análise anual, o objeto *GroundDomain* com modelo de UGT *KusudaAchenbach* apresentou a maior  $RMSD_{h,a}$  ( $1,05^{\circ}\text{C}$ ) entre todos os casos, enquanto os casos *GroundDomain FinitteDifference* e *GroundDomain Xing* apresentaram as menores ( $0,66^{\circ}\text{C}$ ). Assim como ocorreu para a sala/cozinha, embora o objeto *GroundDomain KusudaAchenbach* tenha apresentado o pior resultado na análise anual, em vários meses apresentou a menor  $RMSD_{h,m}$  entre todos os casos. As grandes diferenças entre a temperatura simulada pelo objeto *GroundDomain KusudaAchenbach* e a temperatura medida na edificação nos primeiros meses são determinantes na análise anual.

Figura 44 - Dormitório 2: RMSD calculadas com as temperaturas da superfície externa do piso em base horária



A análise horária dos casos permitiu observar de maneira detalhada o comportamento de cada caso em comparação com as medições realizadas na edificação. O caso *GroundDomain FinitteDifference* foi o que resultou em temperaturas da superfície externa do piso mais próximas das temperaturas monitoradas. O caso *GroundDomain Xing* apresentou resultados semelhantes, porém com algumas diferenças maiores em comparação com as medições. O objeto *GroundDomain* com modelo de UGT *KusudaAchenbach* apresentou resultados superiores aos observados por todos os casos em alguns momentos. Entretanto, as diferenças entre as temperaturas simuladas e medidas nos primeiros meses contribuem para que, na análise de todo o período, o objeto *KusudaAchenbach* apresente o pior resultado. Em relação ao caso *GroundHeatTransfer:Slab*, a análise mais adequada deve ser realizada por meio da comparação entre as médias mensais, como foi apresentado no grupo 1.

#### 4.3.3 Grupo 3: Análise da temperatura operativa do ar simulada

No grupo 3 é realizada a análise dos casos *GroundHeatTransfer:Slab*, *GroundDomain* com modelos de UGT *KusudaAchenbach*, *FinitteDifference*, *Xing* e *Foundation:Kiva* (identificados nos gráficos como SLAB, GD\_KA, GD\_FD, GD\_X e

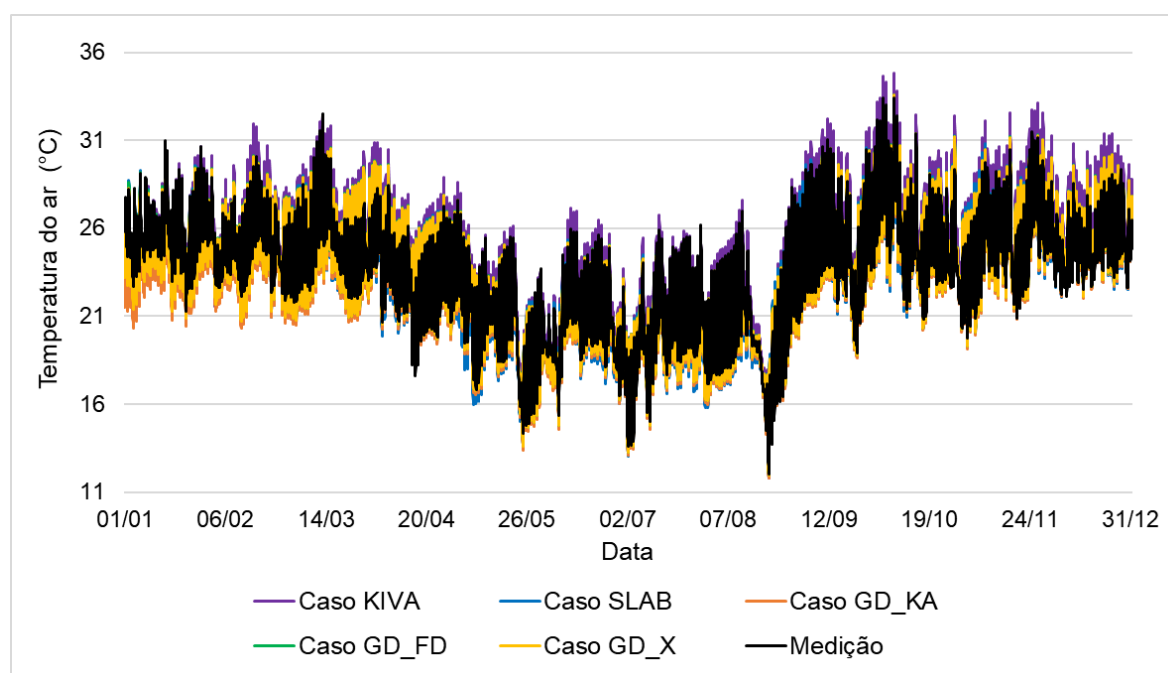
KIVA). A análise foi realizada com base na comparação entre a temperatura operativa do ar simulada por cada caso e a temperatura do ar monitorada na edificação.

As análises do grupo 3 permitem inserir o objeto *Foundation:Kiva* na comparação com os demais métodos de transferência de calor através do solo. Além disso, permitem observar o impacto da escolha de diferentes métodos de transferência de calor através do solo na temperatura do ar interno simulada.

Na Figura 45 estão apresentadas as temperaturas operativas do ar simuladas pelos diferentes casos, juntamente com a temperatura do ar interno medida na sala/cozinha. É possível observar o comportamento da temperatura do ar interno da sala/cozinha durante o período de monitoramento, e identificar as diferenças com as temperaturas operativas simuladas pelos casos.

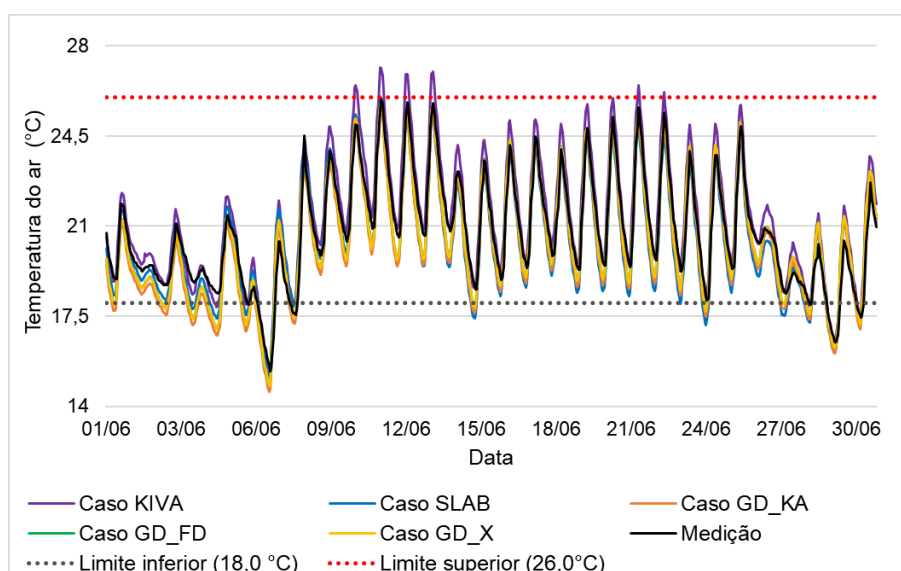
De maneira geral, as temperaturas operativas do ar simuladas pelos casos *GroundDomain* com modelos de UGT *KusudaAchenbach* e *Xing* apresentam valores mínimos inferiores aos medidos, durante todo o ano. As temperaturas operativas do ar simuladas pelo objeto *Foundation:Kiva* apresentam valores máximos mais elevados do que os observados no monitoramento durante todo o ano.

Figura 45 - Sala/cozinha: temperaturas do ar medidas e temperaturas operativas do ar simuladas pelos casos – Grupo 3



Para uma observação mais precisa do comportamento da temperatura operativa do ar simulada pelos casos, decidiu-se analisar de maneira isolada um mês com temperaturas médias do ar mais baixas (junho) e um mês com temperaturas médias do ar mais altas (dezembro). Os resultados do mês de junho, simulados e monitorados para o ambiente sala/cozinha, estão apresentados na Figura 46. Também estão apresentadas duas linhas horizontais para representar a faixa de temperatura operativa entre de 18,0°C e 26,0°C adotada no método por simulação da emenda da norma de desempenho NBR 15575-1 (ABNT, 2021) para cidades que apresentam média anual de temperatura de bulbo seco inferior a 25°C.

Figura 46 - Temperaturas operativas do ar simuladas pelos casos para o mês de junho, para a sala/cozinha



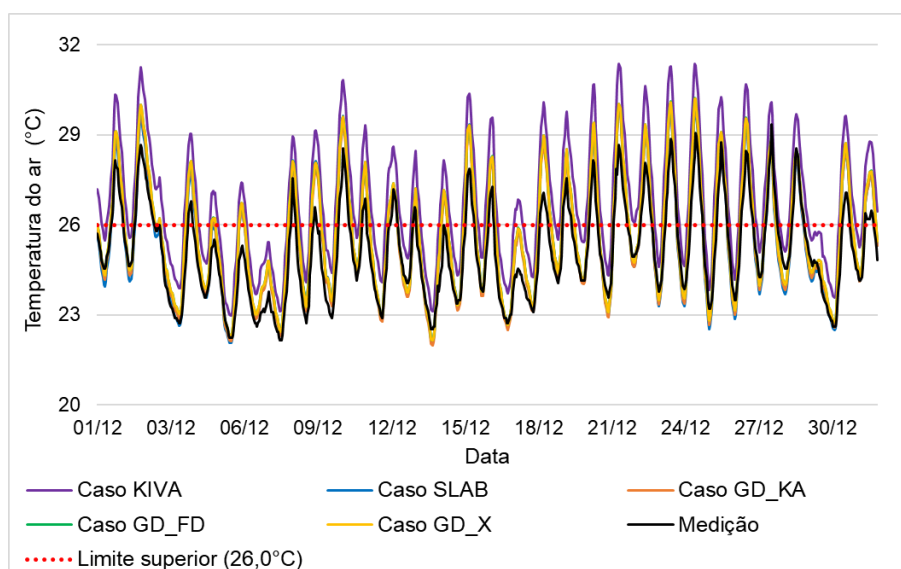
É possível observar que em determinados momentos alguns casos ultrapassam esses valores de temperatura, enquanto outros não. Para o mês de junho, 11,5% das temperaturas operativas do ar simuladas pelo caso *GroundHeatTransfer:Slab* estiveram abaixo de 18,0°C; para o objeto *GroundDomain* com modelo de UGT *KusudaAchenbach*, foram 15,7%; para o *GroundDomain FinitteDifference*, 12,1%; para o *GroundDomain Xing*, 12,2%; e para o *Foundation:Kiva*, 5,0%. Como comparação, 6,4% das temperaturas monitoradas no período estiveram abaixo de 18,0°C.

Quando se analisa o limite superior, apenas as temperaturas simuladas pelo *Foundation:Kiva* ultrapassaram-no, com 3,1% de valores simulados acima de

26,0°C. Para os demais casos, bem como para o monitoramento, não foram registradas temperaturas acima de 26,0°C.

Na Figura 47 apresentam-se os resultados para o mês de dezembro. Para a análise desse mês utiliza-se apenas o limite superior de 26,0°C, visto que as temperaturas são mais elevadas.

Figura 47 - Temperaturas operativas do ar simuladas pelos casos para o mês de dezembro, para a sala/cozinha



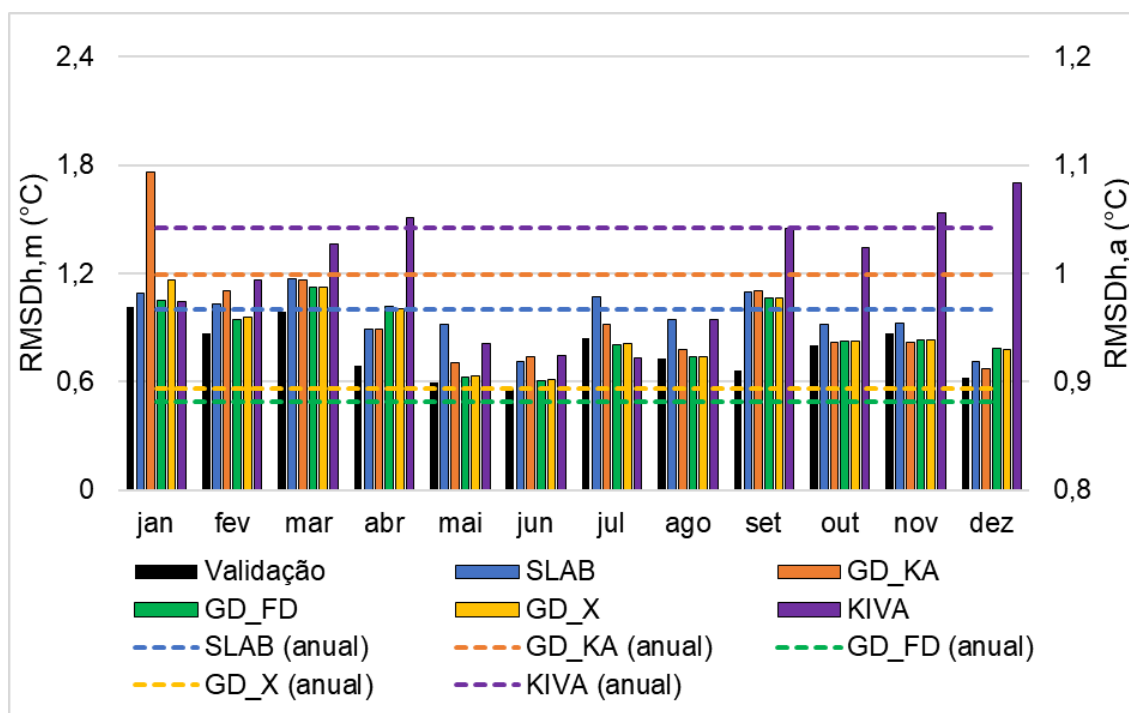
Em dezembro, observa-se que em vários horários as temperaturas operativas do ar simuladas e monitoradas são superiores a 26,0°C. Essa diferença varia conforme o caso. Para o caso *GroundHeatTransfer:Slab*, 37,1% das temperaturas simuladas foram superiores a 26,0°C; para o *GroundDomain KusudaAchenbach*, 37,2%; para o *GroundDomain FinitteDifference*, 40,5%; para o caso *GroundDomain Xing*, 40,3%; e para o *Foundation:Kiva*, 58,74%. Para comparação, apenas 28% das temperaturas monitoradas ultrapassaram 26,0°C.

A análise aprofundada dos meses de junho e dezembro permite identificar que a utilização de diferentes métodos de transferência de calor através do solo pode resultar em diferenças na temperatura operativa do ar simulada para uma edificação. Essas diferenças podem influenciar significativamente no percentual de horas ocupadas na faixa de temperatura operativa e no acionamento do sistema de condicionamento de ar em uma análise de desempenho térmico e energético, o que pode resultar em imprecisões nas cargas térmicas calculadas.

Para uma análise mais detalhada das temperaturas operativas do ar simuladas pelos diferentes casos, foram analisadas as raízes do erro quadrático médio, calculadas com os valores horários da temperatura do ar, para cada mês ( $RMSD_{h,m}$ ) e para todo o período ( $RMSD_{h,a}$ ). Na Figura 48 são apresentados os resultados para a sala/cozinha. Também são apresentados os resultados da validação final, realizada na seção 3.3.2.5, para comparar os erros obtidos para a simulação do modelo utilizando a temperatura do solo monitorada com os erros obtidos para a simulação realizada para os diferentes casos.

Vale ressaltar que a comparação das  $RMSD_{h,m}$  obtidas pela simulação dos casos com a  $RMSD$  obtida na etapa de validação final não objetiva uma análise numérica definitiva, uma vez que as simulações envolvem um grande número de variáveis distintas que podem influenciar no resultado. Nesta análise, as  $RMSD_{h,m}$  calculadas para um determinado caso que sejam próximas às  $RMSD$  obtidas na validação indicam que a simulação deste caso obteve erro semelhante ao erro obtido pela simulação que utilizou as temperaturas do solo monitoradas.

Figura 48 - Sala/cozinha:  $RMSD$  calculadas para a temperatura operativa do ar simulada e a temperatura do ar interno medida em base horária



De maneira geral, o *Foundation:Kiva* obteve os erros mais elevados na maioria dos meses. Na maior parte do ano, as temperaturas operativas do ar simuladas pelo *Foundation:Kiva* foram superiores às monitoradas. Nos meses de janeiro e julho, entretanto, o caso KIVA apresentou  $RMSD_{h,m}$  próximas às  $RMSD$  obtidas na validação. Ainda assim, na análise anual apresentou a maior  $RMSD_{h,a}$  ( $1,04^{\circ}\text{C}$ ) entre todos os casos.

O caso *GroundHeatTransfer:Slab* resultou em temperaturas operativas do ar mais baixas do que as monitoradas na maior parte do ano, apresentando as maiores diferenças nos meses mais frios. Costa, Roriz e Chvatal (2017) haviam constatado que as temperaturas do ar interno simuladas pelo programa *GroundHeatTransfer:Slab* foram menores do que as calculadas pelos métodos do *GroundDomain* na maior parte do período de análise.

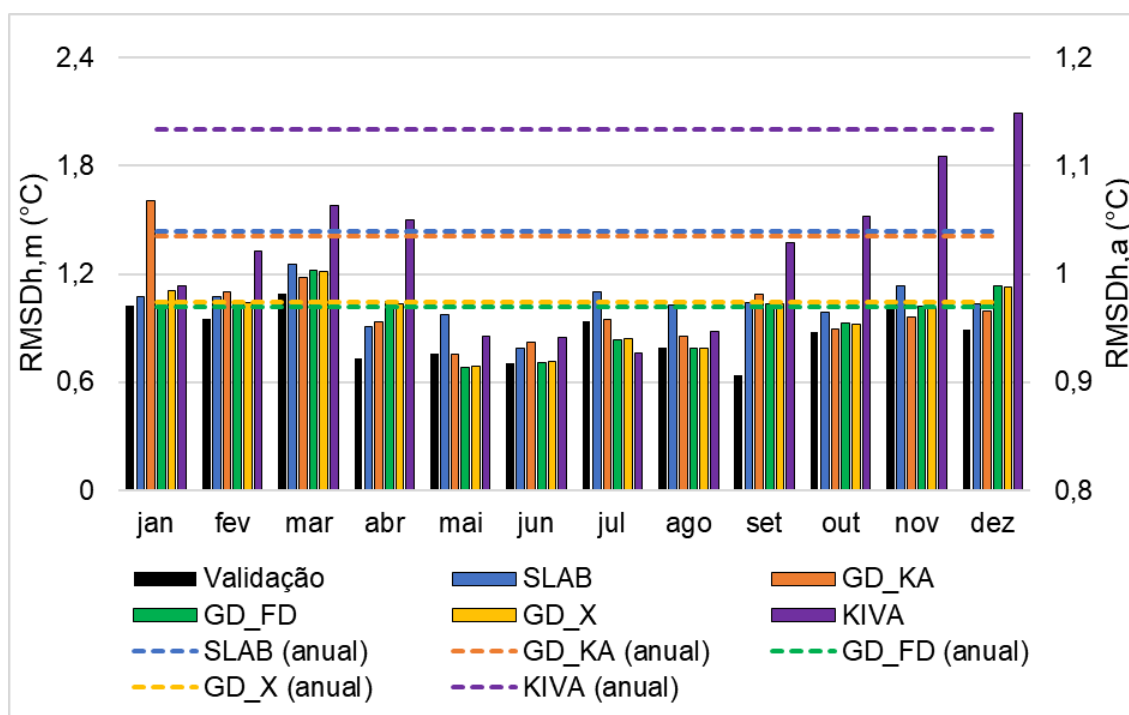
As temperaturas operativas do ar mais baixas calculadas no caso *GroundHeatTransfer:Slab* podem ser resultado das temperaturas do solo calculadas, que foram inferiores às temperaturas monitoradas na edificação. Embora tenha obtido a terceira menor  $RMSD_{h,a}$  ( $0,97^{\circ}\text{C}$ ), o caso *GroundHeatTransfer:Slab* obteve as maiores  $RMSD_{h,m}$  entre todos os casos nos meses de março, abril, maio e julho.

Foi observado nas análises da temperatura da superfície externa do piso que o objeto *GroundDomain* com modelo de UGT *KusudaAchenbach* apresenta as maiores diferenças nos primeiros meses. A influência desse comportamento é refletida na temperatura operativa do ar simulada. No mês de janeiro, o *GroundDomain KusudaAchenbach* apresentou  $RMSD_{h,m}$  igual a  $1,76^{\circ}\text{C}$ , o maior observado entre todos os casos, durante todo o período. Essa diferença faz com que o objeto *GroundDomain* com modelo de UGT *KusudaAchenbach* apresente a segunda maior  $RMSD_{h,a}$  ( $1,00^{\circ}\text{C}$ ) entre todos os casos mesmo que em alguns meses tenha apresentado  $RMSD_{h,m}$  próximo às  $RMSD$  obtidas na validação.

As temperaturas operativas do ar obtidas pelos casos *GroundDomain* com modelo de UGT *FinitteDifference* e *Xing* foram semelhantes. Pequenas diferenças foram observadas no mês de janeiro, no qual as temperaturas máximas obtidas pelo *GroundDomain FinitteDifference* foram superiores às obtidas pelo caso *GroundDomain Xing*, e mais próximas dos valores monitorados na edificação. O *GroundDomain FinitteDifference* foi o que obteve menor  $RMSD_{h,a}$  dentre os casos analisados ( $0,88^{\circ}\text{C}$ ), seguido do caso *GroundDomain Xing* ( $0,89^{\circ}\text{C}$ ).

No dormitório 1, o comportamento geral dos casos foi semelhante ao observado para a sala/cozinha. Entretanto, os erros obtidos foram maiores, como pode ser observado na Figura 49.

Figura 49 - Dormitório 1: RMSD calculadas para a temperatura operativa do ar simulada e a temperatura do ar interno medida em base horária



O objeto *Foundation:Kiva* apresentou a maior  $RMSD_{h,a}$  ( $1,13^{\circ}\text{C}$ ) entre todos os casos, enquanto o caso *GroundDomain FiniteDifference* apresentou a menor ( $0,96^{\circ}\text{C}$ ). Para o dormitório 1, diferentemente do observado para a sala/cozinha, o objeto *GroundDomain* com modelo de UGT *KusudaAchenbach* apresentou resultado melhor do que o caso *GroundHeatTransfer:Slab*. Para alguns meses, inclusive, o *GroundDomain KusudaAchenbach* apresentou  $RMSD_{h,m}$  inferiores aos obtidos pelos demais casos *GroundDomain*.

Os resultados mensais do dormitório 2 foram semelhantes aos obtidos para o dormitório 1, e as diferenças não são visíveis graficamente. A alteração mais significativa observada para o dormitório 2 foram as  $RMSD_{h,a}$  obtidas para os casos. O caso *GroundDomain FiniteDifference* apresentou a menor  $RMSD_{h,a}$  ( $0,96^{\circ}\text{C}$ ), seguido do *GroundDomain KusudaAchenbach* ( $0,99^{\circ}\text{C}$ ), do caso *GroundHeatTransfer:Slab* ( $1,00^{\circ}\text{C}$ ) e do *Foundation:Kiva* ( $1,05^{\circ}\text{C}$ ).

Em alguns meses, para todos os ambientes analisados, foi possível observar que mesmo as menores  $RMSD_{h,m}$  obtidas pelos casos ainda foram superiores às  $RMSD$  obtidas no processo de validação. Isso demonstra que as temperaturas operativas do ar simuladas pelo caso que se mostrou mais ajustado na pesquisa ainda podem possuir erros quando comparadas com uma simulação que utilizou temperaturas da superfície externa do piso monitoradas na edificação.

As  $RMSD_{h,m}$  calculadas para as temperaturas operativas do ar simuladas pelos casos analisados variou entre  $0,60^{\circ}\text{C}$  e  $2,10^{\circ}\text{C}$ . Se excluir da análise o objeto *Foundation:Kiva* e o objeto *GroundDomain* com modelo de UGT *KusudaAchenbach* para o mês de janeiro, as  $RMSD_{h,m}$  variam entre  $0,60^{\circ}\text{C}$  e  $1,25^{\circ}\text{C}$ . Assim, é possível observar que a utilização de diferentes métodos de transferência de calor através do solo pode influenciar na temperatura operativa do ar simulada.

Em geral, observou-se que o *Foundation:Kiva* não apresentou bom comportamento quando comparado com os demais casos. González *et al.* (2020) utilizaram o objeto *Foundation:Kiva* em comparação com outros métodos de consideração da transferência de calor entre edificação e solo através do piso. Os autores constataram que a ferramenta *Kiva* teve pior desempenho quando comparado com a opção de inserção de temperaturas no objeto *Site:GroundTemperature:BuildingSurface*. Entretanto, no estudo de González *et al.* (2020) a edificação é de grande porte, e a superfície do piso em contato com o solo é muito maior do que a superfície de fundação, diferentemente do observado na edificação deste estudo.

O *Foundation:Kiva* resultou em temperaturas muito mais elevadas do que as observadas na edificação em alguns momentos. No fim de maio, por exemplo, as temperaturas simuladas pelo objeto foram quase  $4,00^{\circ}\text{C}$  superiores às temperaturas monitoradas. Como todas as características da edificação foram mantidas constantes e a única alteração entre os casos foi a consideração do contato com o solo, a primeira hipótese levantada foi a de que o objeto *Foundation:Kiva* utilizado nesta pesquisa tivesse considerado o piso da edificação como um isolante térmico. Entretanto, ao se observar o comportamento da temperatura ao longo do dia, durante o período da noite as temperaturas simuladas se aproximam das monitoradas. Com isso, intui-se que o modelo seja capaz de representar a perda de calor do ambiente, que pode ocorrer, dentre outras formas, pelo piso. Diante disso, a hipótese considerada nesta pesquisa é de que o objeto *Foundation:Kiva* possa superestimar

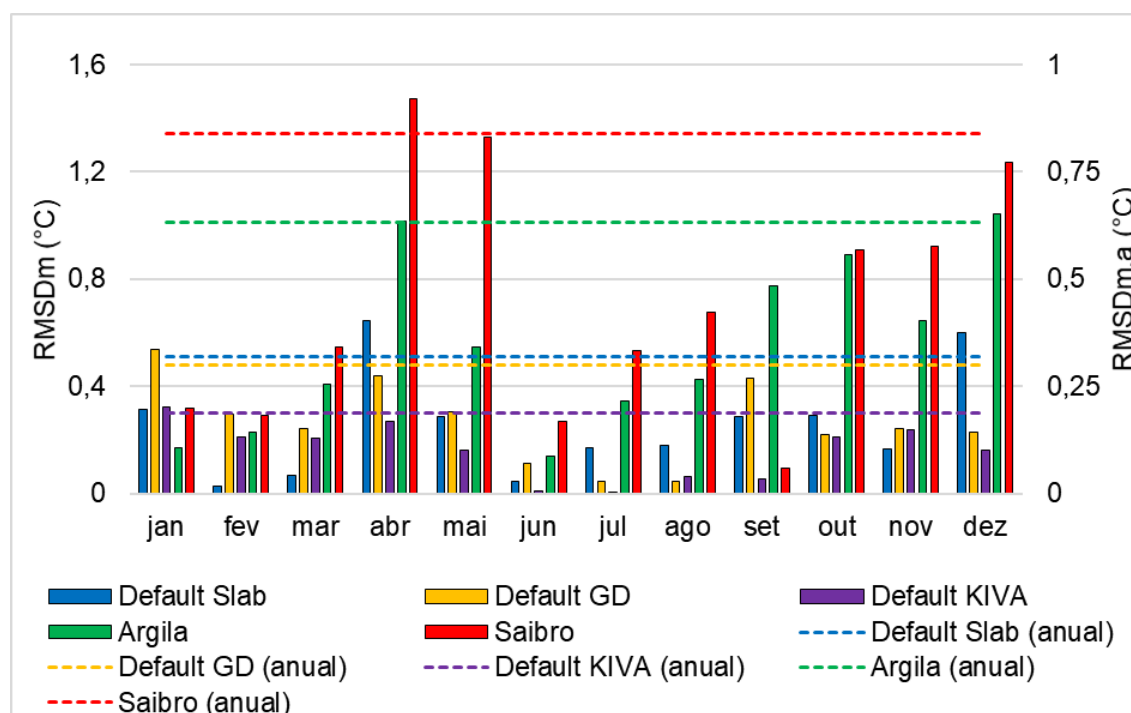
os ganhos de calor pelo perímetro do piso da edificação. Essa hipótese não pode ser verificada pois não é possível analisar variáveis de saída referentes às superfícies da edificação. De qualquer maneira, nesta pesquisa o objeto *Foundation:Kiva* não demonstrou ser uma boa opção quando comparado aos demais casos.

#### 4.3.4 Influência das propriedades termofísicas do solo

Nesta seção é realizada a análise da influência das propriedades termofísicas do solo na temperatura da superfície externa do piso obtida por cada caso. Nas seções anteriores, as simulações para todos os casos foram realizadas com as propriedades termofísicas da argila, solo predominante na cidade de Londrina, extraídas da NBR 15.220-2 (ABNT, 2005a).

Para isso, o caso *GroundDomain FiniteDifference*, que apresentou os melhores resultados nas seções anteriores, foi simulado com cinco conjuntos de propriedades termofísicas do solo distintos: com os valores padrão do objeto *GroundHeatTransfer:Slab*, do objeto *Site:GroundDomain:Slab*, do objeto *Foundation:Kiva*, e com valores de norma para a argila e o saibro. Na Figura 50 estão apresentadas as RMSD calculadas para as temperaturas horárias da superfície externa do piso da sala/cozinha, analisadas mensalmente ( $RMSD_{h,m}$ ) e para todo o período ( $RMSD_{h,a}$ ).

Figura 50 - Sala/cozinha: RMSD da temperatura da superfície externa do piso para o caso GD\_FD simulado com diferentes propriedades termofísicas



Em geral, observa-se que as propriedades termofísicas do solo influenciam significativamente o resultado obtido. Para a sala/cozinha, observou-se que os valores padrão fornecidos pelo *EnergyPlus* para os métodos resultou em  $RMSD_{m,a}$  menores do que os obtidos para as propriedades termofísicas de norma para a argila e o saibro. A  $RMSD_{m,a}$  obtida para o *default GD* foi de  $0,30^{\circ}\text{C}$ , para o *default SLAB* foi de  $0,32^{\circ}\text{C}$  e para o *default KIVA* foi de  $0,19^{\circ}\text{C}$ . Já para o saibro, a  $RMSD_{m,a}$  obtida foi de  $0,83^{\circ}\text{C}$  e da argila foi de  $0,63^{\circ}\text{C}$ .

Para os dormitórios também foi possível observar que as propriedades termofísicas do solo apresentaram grande influência nos resultados. Para o dormitório 1, a menor  $RMSD_{m,a}$  foi obtida com a utilização das propriedades termofísicas da argila. Para o dormitório 2, a menor  $RMSD_{m,a}$  foi obtida quando se utilizou o *default SLAB*.

Nesta análise, não foi possível observar nenhum padrão que pudesse indicar qual propriedade termofísica se mostrou mais adequada para este estudo. Entretanto, a grande variação observada nos resultados indica que é importante determinar valores confiáveis para tais propriedades.

Para verificar se a variação nos resultados ocorre apenas no caso *GroundDomain FinitteDifference*, os casos *GroundDomain* com os modelos de UGT *KusudaAchenbach* e *Xing*, bem como o objeto *GroundHeatTransfer:Slab* também foram simulados. Na Tabela 14 são apresentadas as  $RMSD_{m,a}$ , calculadas com as médias mensais da temperatura da superfície externa do piso de cada ambiente da edificação, simuladas com a utilização de diferentes propriedades termofísicas do solo.

Tabela 14 -  $RMSD_{m,a}$  calculadas com diferentes propriedades termofísicas do solo

Propriedades	Casos	$RMSD_{m,a}$		
		Sala/cozinha	Dormitório 1	Dormitório 2
Propriedades termofísicas para a argila (NBR 15.220-2) densidade: 1.700,00 kg/m <sup>3</sup> condutiv. térmica: 0,52 W/m.K calor específico: 840,00 J/kg.K	SLAB	0,54	0,87	0,70
	GD_KA	0,84	1,20	0,91
	GD_FD	0,63	0,44	0,54
	GD_X	0,62	0,50	0,53
Propriedades termofísicas para o saibro (NBR 15.220-2) densidade: 1.500,00 kg/m <sup>3</sup> condutiv. térmica: 0,30 W/m.K calor específico: 2090,00 J/kg.K	SLAB	0,49	0,93	0,68
	GD_KA	1,30	1,44	1,26
	GD_FD	0,84	0,53	0,70
	GD_X	0,87	0,61	0,72
Propriedades termofísicas do <i>GroundDomain</i> densidade: 2.800,00 kg/m <sup>3</sup> condutiv. térmica: 1,50 W/m.K calor específico: 850,00 J/kg.K	SLAB	0,51	0,55	0,51
	GD_KA	1,69	2,22	1,83
	GD_FD	0,30	0,84	0,48
	GD_X	0,47	0,97	0,60
Propriedades termofísicas do <i>Slab</i> densidade: 1.200,00 kg/m <sup>3</sup> condutiv. térmica: 1,00 W/m.K calor específico: 1200,00 J/kg.K	SLAB	0,50	0,76	0,62
	GD_KA	1,70	1,33	1,19
	GD_FD	0,58	0,36	0,32
	GD_X	0,70	0,42	0,38
Propriedades termofísicas do <i>KIVA</i> densidade: 1.842,00 kg/m <sup>3</sup> condutiv. térmica: 1,73 W/m.K calor específico: 419,00 J/kg.K	SLAB	5,45	6,13	5,69
	GD_KA	1,59	2,19	1,77
	GD_FD	0,19	0,82	0,45
	GD_X	0,40	1,00	0,61

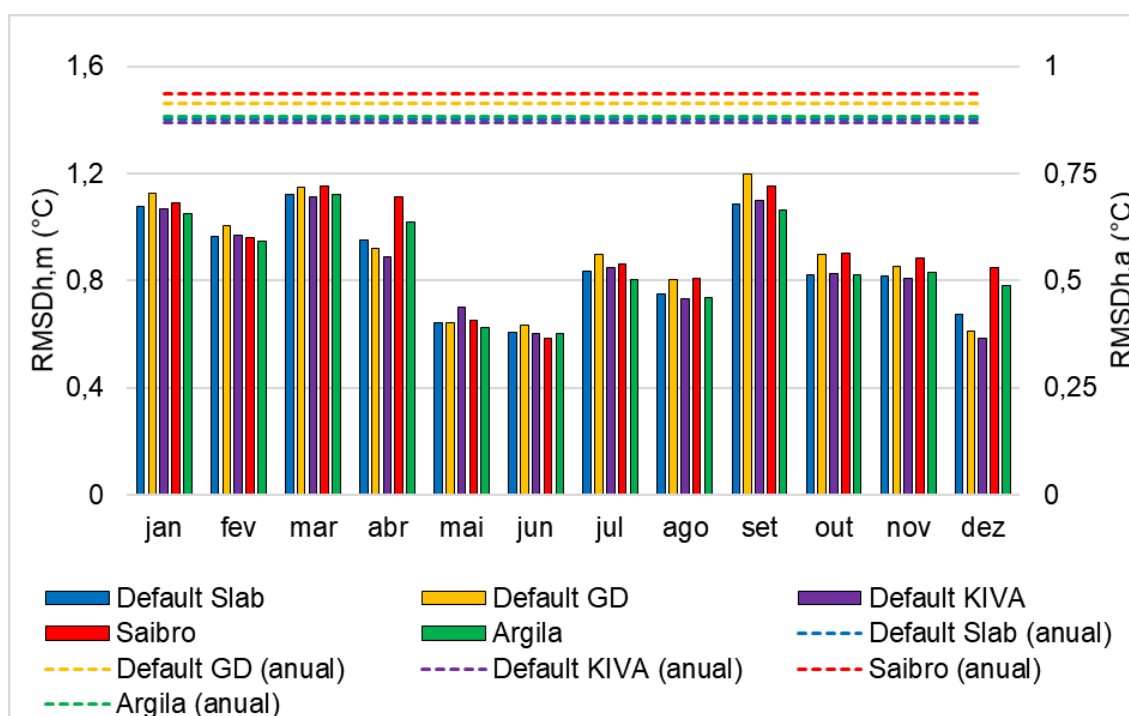
Para todos os casos analisados houve variação significativa nos resultados quando foram alteradas as propriedades termofísicas do solo. Além disso, foi possível observar um comportamento do caso *GroundHeatTransfer:Slab* que exige

atenção. Quando o objeto *GroundHeatTransfer:Slab* foi simulado com as propriedades termofísicas do *default KIVA*, houve problema de estabilidade de cálculo. Para contornar o problema, o *GroundHeatTransfer:Slab* redimensionou a espessura da laje de piso, deixando-a 3 vezes mais espessa. Com isso, as  $RMSD_{m,a}$  calculadas foram superiores a  $5,00^{\circ}\text{C}$  para todos os ambientes. Depois de vários testes realizados, foi possível identificar que o problema de estabilidade de cálculo ocorreu devido ao baixo calor específico do solo do *default KIVA*.

Estes resultados reforçam a importância de adotar propriedades termofísicas do solo adequadas. Além disso, apontam para limitações dos métodos de transferência de calor através do solo presentes no *EnergyPlus* e que não são descritos nos documentos técnicos.

Por fim, analisou-se também o impacto das propriedades termofísicas do solo na temperatura operativa do ar simulada. Para isso, foram calculadas as  $RMSD_{m,a}$  entre as temperaturas medidas na edificação e as temperaturas operativas do ar simuladas pelo caso *GroundDomain FiniteDifference*, utilizando as diferentes propriedades termofísicas do solo. Os resultados para a sala/cozinha são apresentados na Figura 51.

Figura 51 - Sala/cozinha: RMSD da temperatura operativa do ar para o caso GD\_FD simulado com diferentes propriedades termofísicas



Na comparação entre a temperatura operativa do ar simulada pelo caso *GroundDomain FiniteDifference* e a temperatura monitorada na edificação, em base horária, o impacto das propriedades termofísicas do solo não foi tão significativo. As propriedades termofísicas influenciaram nas  $RMSD_{h,m}$  obtidas em alguns meses. Porém, na análise anual, as  $RMSD_{h,a}$  obtidas foram semelhantes, variando entre  $0,87^{\circ}\text{C}$  (*default KIVA*) e  $0,93^{\circ}\text{C}$  (saibro).

Em geral, os resultados apontam para a importância das propriedades termofísicas do solo nos resultados das simulações computacionais. Sendo assim, além de utilizar o método de transferência de calor através do solo mais preciso, deve-se atentar para as propriedades termofísicas do solo e utilizar, quando possível, valores obtidos por meio de medição.

## 5 CONCLUSÕES

O presente trabalho teve o objetivo de determinar qual dos diferentes métodos de transferência de calor entre edificação e solo disponíveis no programa *EnergyPlus* seria o mais indicado para a realização de simulações termoenergéticas de edificações térreas. Seu desenvolvimento exigiu grande esforço em etapas preliminares à comparação dos métodos analisados. Essas etapas se mostraram essenciais no desenvolvimento do procedimento metodológico adotado, uma vez que buscaram garantir que o modelo computacional representasse, da melhor forma possível, o comportamento real da edificação.

A montagem do sistema de monitoramento da temperatura da interface entre edificação e solo demandou a perfuração do piso da edificação, instalação de sensores e testes preliminares. Além disso, foram instalados sensores para monitorar a temperatura do ar interno e externo da edificação. Durante todo o período de monitoramento foi necessário acompanhamento constante dos sistemas de monitoramento para garantir o registro de dados de temperatura confiáveis.

Por meio do cuidado minucioso com os sistemas de monitoramento instalados na edificação, foi possível realizar um processo de calibração do modelo computacional. O modelo calibrado também foi validado para todo o período de análise. A utilização de um modelo computacional calibrado e validado se mostrou fundamental para a análise das etapas posteriores.

Por fim, após a finalização das etapas de medição, calibração e validação, foi possível simular o modelo calibrado utilizando o programa *Slab*, o objeto *GroundDomain* com os modelos de temperatura do solo não perturbado (UGT) *KusudaAchenbach*, *FiniteDifference* e *Xing*, e o objeto *Foundation:Kiva*.

Os casos simulados com a utilização de cada um dos métodos de transferência de calor através do solo sempre foram comparados entre si por meio da raiz do erro quadrático médio (RMSD) dos valores simulados e medidos. A comparação foi feita para todo o período analisado (um ano), bem como para cada mês do período, utilizando dados horários e médias mensais. Em geral, observou-se que o caso *GroundDomain* com o modelo de UGT *FiniteDifference* apresentou o melhor comportamento na maior parte das situações analisadas. Para a temperatura da superfície externa do piso da sala/cozinha, o *GroundDomain FiniteDifference*

resultou em RMSD anual igual a  $0,59^{\circ}\text{C}$ . Dessa maneira, neste trabalho conclui-se que a utilização do *GroundDomain* com o modelo de UGT *FiniteDifference* é o mais adequado para simulações termoenergéticas de edificações térreas.

Os resultados obtidos para o caso *GroundDomain* com o modelo de UGT *Xing* se aproximaram do *FiniteDifference*, porém foram piores. Ambos os casos apresentaram diferenças de comportamento quando comparados com o monitoramento da edificação nos primeiros dias da simulação. Porém, com o passar do tempo, o comportamento se ajustou. Isso também foi observado para o *GroundDomain* com modelo de UGT *KusudaAchenbach*, porém de forma mais acentuada. A temperatura da superfície externa do piso simulada pelo objeto *GroundDomain KusudaAchenbach* no início do período analisado foi quase  $6,0^{\circ}\text{C}$  inferior à temperatura monitorada. Embora tenha apresentado bom comportamento na maior parte do período analisado, as grandes diferenças nos dois primeiros meses contribuíram para que o objeto *GroundDomain* com modelo de UGT *KusudaAchenbach* apresentasse resultado inferior aos demais casos *GroundDomain*.

O caso *GroundHeatTransfer:Slab* tem a particularidade de simular temperaturas médias mensais para todo o período. Dessa maneira, sua comparação com as temperaturas monitoradas na edificação não permitiu a análise horária. Quando comparado com a média mensal obtida pelos casos do *GroundDomain*, o caso *GroundHeatTransfer:Slab* apresentou resultado mais satisfatório que o *GroundDomain KusudaAchenbach*, porém foi inferior aos casos *GroundDomain FiniteDifference* e *Xing*.

O objeto *Foundation:Kiva* foi analisado por meio da temperatura operativa do ar simulada. Em comparação com os demais casos, o *Foundation:Kiva* apresentou o pior comportamento. Por meio da análise horária da temperatura operativa do ar, foi possível identificar diferenças que podem influenciar significativamente na carga térmica calculada. Quando se analisou o mês de dezembro, por exemplo, o caso *GroundHeatTransfer:Slab* resultou em 37,1% das temperaturas simuladas superiores a  $26,0^{\circ}\text{C}$ . O *Foundation:Kiva*, por sua vez, resultou em 58,7%. Sendo assim, conclui-se que o objeto *Foundation:Kiva* não se apresenta como boa opção para modelar as transferências de calor entre edificação e solo.

Os valores padrão dos métodos de transferência de calor através do solo disponíveis no *EnergyPlus* foram comparados com valores obtidos na NBR 15220-2 (ABNT, 2005a) para as propriedades termofísicas da argila e do saibro. Nessa análise,

observou-se que, em geral, os métodos apresentaram melhor comportamento quando os valores padrão do *EnergyPlus* foram utilizados. Observou-se também que o caso *GroundHeatTransfer:Slab* exige grande atenção para as propriedades termofísicas adotadas. Quando simulado com baixo valor de calor específico do solo, o caso *GroundHeatTransfer:Slab* apresentou problemas de estabilidade de cálculo que resultaram em erros superiores a 5,0°C.

Por fim, esta pesquisa apresenta contribuição ao analisar diferentes métodos de transferência de calor através do solo disponíveis no *EnergyPlus* por meio da comparação de valores simulados por um modelo computacional calibrado e validado com valores monitorados em uma edificação real. Com isso, busca-se fomentar a discussão sobre a necessidade de determinar em normas e instruções normativas qual método deve ser utilizado, de modo a padronizar todas as simulações realizadas, uma vez que a escolha por um ou outro método pode influenciar significativamente nos resultados.

## 5.1 LIMITAÇÕES

Os sensores utilizados para monitoramento da temperatura da superfície externa do piso não foram calibrados no início da realização desta pesquisa. Eles foram calibrados em 30/06/2014, armazenados e utilizados nesta pesquisa. Dessa forma, não é possível garantir que a calibração ainda é válida, e isto apresenta-se como uma fonte de incertezas para a pesquisa.

Além disso, os sensores utilizados para monitorar a temperatura da superfície externa do piso não são específicos para medição superficial. Na montagem do experimento, esforçou-se para que o sensor estivesse em contato com a superfície externa do piso, porém deve-se considerar este fator como uma limitação da pesquisa.

A execução da perfuração no piso dos ambientes para a inserção dos sensores modificou as condições originais da transferência de calor através do piso da edificação, o que pode ser considerado como fonte de incertezas.

O arquivo climático utilizado para a análise possui dados de 1996. Embora tenha sido modificado com valores de temperatura e umidade relativa do ar, radiação solar, velocidade e direção do vento monitorados em 2020, o arquivo climático apresenta-se como fonte de incertezas.

As propriedades termofísicas do solo extraídas da NBR 15.520-2 (ABNT, 2005a) podem não representar as condições reais do solo abaixo da edificação em estudo.

## 5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros sugere-se a análise aprofundada das propriedades termofísicas do solo que, embora tenham sido analisadas de forma superficial nesta pesquisa, mostraram-se bastante relevantes.

Também se sugere o estudo aprofundado dos métodos de transferência de calor através do solo e de seus valores padrão, uma vez que nesta pesquisa foram encontrados indícios de melhor funcionamento quando valores padrão são utilizados em detrimento de valores normativos.

Por fim, sugere-se para pesquisas futuras a análise do *GroundDomain* em simulações com alguns meses preliminares. Nas análises realizadas nesta pesquisa, todos os modelos de temperatura do solo não perturbado do *GroundDomain* apresentaram comportamentos diferentes ao monitorado no início da simulação, o que parece indicar um problema de convergência inicial.

## REFERÊNCIAS

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-2**: Desempenho térmico de edificações – Parte 2: Método de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro, 2005a.

\_\_\_\_\_. **NBR 15220-3**: Desempenho térmico de edificações – Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e estratégias de condicionamento térmico passivo para habitações de interesse social. Rio de Janeiro, 2005b.

\_\_\_\_\_. **NBR 15575**: Desempenho de edificações habitacionais. Rio de Janeiro, 2013.

\_\_\_\_\_. **NBR 15575-1:2013 Emenda 1: 2021**: Edificações habitacionais – Desempenho Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2021.

AL-ANZI, A.; KRARTI, M. Local/global analysis applications to ground-coupled heat transfer. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 42, n. 9, p. 871–880, 2003.

ALKAFF, S. A.; SIM, S. C.; EFZAN, M. N. E. A review of underground building towards thermal energy efficiency and sustainable development. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 60, p. 692–713, 2016.

ALLEN, R.G., WALTER, I.A., ELLIOTT, R.L., HOWELL, T.A., ITENFISU, D., JENSEN, M.E., SNYDER, R.L. **The ASCE standardized reference evapotranspiration equation**. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2005.

ALMEIDA, L. S. S. **Influência de parâmetros físicos e geométricos no desempenho termoenergético de habitações unifamiliares**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2014.

ANDOLSUN, S.; CULP, C. H.; HABERL, J. WITTE, M. J. EnergyPlus vs. DOE-2.1e: The effect of ground-coupling on energy use of a code house with basement in a hot-humid climate. **Energy and Buildings**, v. 43, n. 7, p. 1663–1675, jul. 2011.

BAGLIVO, C.; CONGEDO, P. M. Optimization of high efficiency slab-on-ground floor by multi-objective analysis for zero energy buildings in mediterranean climate. **Journal of Building Engineering**, v. 24, mar. 2019.

BAHNFLETH, W. P. Three-dimensional modelling of heat transfer from slab floors. In: **Technical Manuscript - United States Army Corps of Engineers**, Construction Engineering Research Laboratory, 11 ed., 1989.

BARROS, M. V. F.; ARCHELA, R. S.; BARROS, O. N. F.; GRATÃO, L. H.; THERY, H.; MELLO, N. A. **Atlas Ambiental da Cidade de Londrina 2008**. Universidade Estadual de Londrina. Londrina, 2008. Disponível em: <<http://www.uel.br/revistas/atlasambiental/>>. Acesso em: 02 abr. 2021.

BATISTA, J. O.; LAMBERTS, R.; GÜTHS, S. Influências dos algoritmos de condução e convecção sobre os resultados de simulações do comportamento térmico de edificações. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v.11, n.4, p. 79-97, out./dez. 2011.

BRASIL. Ministério das Cidades, Programa Brasileiro da Qualidade e Produtividade no Habitat – PBQP-H. Sistema Nacional de Avaliações Técnicas – SiNAT. **Sistema estruturado em peças leves de madeira maciça serrada – TecVerde (tipo light wood framing)**, DATec Nº 020-C. Brasília, 2017.

\_\_\_\_\_. Ministério de Minas e Energia. **Nota técnica PR 07/18: Premissas e Custos da Oferta de Energia Elétrica no horizonte 2050**. Empresa de Pesquisa Energética, Rio de Janeiro: EPE, 2018.

\_\_\_\_\_. Ministério de Minas e Energia. **Relatório Síntese do Balanço Energético Nacional 2019: Ano Base 2018**. Empresa de Pesquisa Energética, Rio de Janeiro: EPE, 2019.

\_\_\_\_\_. Ministério de Minas e Energia. **Balanço Energético Nacional 2020: Ano Base 2019**. Empresa de Pesquisa Energética, Rio de Janeiro: EPE, 2020.

CB3E. Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações. **Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Residenciais - INI-R**. Florianópolis, 2020. Disponível em: <[https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/documents/2020.11.09-INI-R\\_V1.pdf](https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/documents/2020.11.09-INI-R_V1.pdf)>. Acesso em: 18 mai. 2021.

CHEN, D. Dynamic three-dimensional heat transfer calculation for uninsulated slab-on-ground constructions. **Energy and Buildings**, v. 60, p. 420–428, 2013.

CHOI, S.; KRARTI, M. Heat Transfer for Slab-on-grade Floor with Stepped Ground. **Energy Conversion and Management**, v. 39, n. 97, p. 691–701, 1998.

CLEMENTS, E. **Three-Dimensional Foundation Heat Transfer Modules for Whole-Building Energy Analysis**. Pennsylvania, 2004. 133 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Pennsylvania State University, Pennsylvania, 2004.

COGIL, C. **Modeling of Basement Heat Transfer and Parametric Study of Basement Insulation for Low Energy Housing**. Dissertação de Mestrado - Pennsylvania State University, 1998.

COSTA, V. A. C. **Trocas de calor entre edificações térreas e o solo e sua modelagem no pré-processador Slab**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade de São Paulo. São Carlos, 2017.

COSTA, V. A. C. DA; RORIZ, V. F.; CHVATAL, K. M. S. Modeling of slab-on-grade heat transfer in EnergyPlus simulation program. **Ambiente Construído**, v. 17, n. 3, p. 117–135, 2017.

DERU, M. A Model for Ground-Coupled Heat and Moisture Transfer for Buildings, **NREL/TP-550-33954**. National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, USA, 2003.

DOS SANTOS, G. H.; MENDES, N. Simultaneous heat and moisture transfer in soils combined with building simulation. **Energy and Buildings**, v. 38, n. 4, p. 303–314, abr. 2006.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. **Solar Engineering of Thermal Processes**. John Wiley and Sons, 3rd ed. Hoboken, NJ. 2006.

ELI, L. G.; KRELLING, A. F.; MACHADO, R. M. S.; MAZZAFERRO, L.; MENDES, L. S.; MELO, A. P.; LAMBERTS, R. Análise de sensibilidade e incertezas dos parâmetros relacionados à modelagem do contato do piso com o solo no programa *EnergyPlus*. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2019. **Anais....** Brasília: ANTAC, 2019.

FABRIS, J. **A influência da temperatura do solo no desempenho térmico de construções que utilizam fundações em radier**. Dissertação (Mestrado em Construção Metálica) – Universidade Federal de Ouro Preto, 2017.

GALVARRO, S. F. S.; CARLO, J. C.; GUIMARÃES, I. B. B.; TIBIRIÇÁ, A. C. G. Calibração de simulação térmica de uma unidade habitacional em edifício multifamiliar. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2013. **Anais [...]**. Brasília: ANTAC, 2013.

GONZÁLEZ, V. G.; RUIZ, G. R.; SEGARRA, E. L.; GORDILLO, G. C.; BANDERA, C. F. Characterization Of Building Foundation In Building Energy Models. In: Proceedings of Building Simulation 2019: 16th Conference of IBPSA. **Proceedings...** Rome, 2019.

GOOGLE MAPS. **Universidade Estadual de Londrina**. 2020. Consultado em: < <https://www.google.com/maps/place/Universidade+Estadual+de+Londrina/@-23.3241912,-51.2003547,15z/data=!4m5!3m4!1s0x0:0x8cd1fb9730cff6b!8m2!3d-23.3241912!4d-51.2003547>>. Acesso em: 5 set. 2020.

GWADERA, M.; LARWA, B.; KUPIEC, K. Undisturbed Ground Temperature - Different Methods of Determination. **Sustainability**, v. 9, n. 11, p. 2055, 9 nov. 2017.

HALLAK, R.; PEREIRA FILHO, A. J. Metodologia para análise de desempenho de simulações de sistemas convectivos na região metropolitana de São Paulo com o modelo ARPS: sensibilidade a variações com os esquemas de advecção e assimilação de dados. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 26, n. 4, p. 591–608, dez. 2011.

INMETRO – INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA. **Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais – RTQ-R**. Rio de Janeiro, 2012.

\_\_\_\_\_. **Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas – INI-C**. Rio de Janeiro, 2021.

JANSSEN, H.; CARMELIET, J.; HENS, H. The influence of soil moisture transfer on building heat loss via the ground. **Building and Environment**, v. 39, n. 7, p. 825–836, 2004.

KISSOCK, K.; SELVACANABADY, A.; RAGHAVAN, N. Simplified Model for Ground Heat Transfer from Slab-on-Grade Buildings (DE-13-041). **ASHRAE Transactions**, v. 119, n. 2, p. 456-468, 2013.

KRARTI, M. Effect of Spatial Variation of Soil Thermal Properties on Slab-on-Ground Heat Transfer. **Building and Environment**, v. 31, n. 1, p. 51–57, 1996.

KRARTI, M.; IHM, P. Implementation of a building foundation heat transfer model in EnergyPlus. **Journal of Building Performance Simulation**, v. 2, n. 2, p. 127–142, 2009.

KRUIS, N. **Development and Application of a Numerical Framework for Improving Building Foundation Heat Transfer Calculations**, Ph.D. Dissertation. University of Colorado, 2015.

KRUIS, N.; KRARTI, M. Kiva TM : a numerical framework for improving foundation heat transfer calculations. **Journal of Building Performance Simulation**, v. 8, n. 6, p. 449–468, 2 nov. 2015.

KUREVIJA, T.; VULIN, D.; KRAPEC, V. Influence of Undisturbed Ground Temperature and Geothermal Gradient on the Sizing of Borehole Heat Exchangers. In: Proceedings of the World Renewable Energy Congress. **Proceedings...** Sweden, 2011.

KUSUDA, T.; ACHENBACH P. R. Earth Temperature and thermal diffusivity at selected stations in United States. **ASHRAE Transactions**, n. 1914, 1965.

LABEEE. Laboratório de Eficiência Energética em Edificações. **Manual de simulação computacional de edifícios naturalmente ventilados no programa EnergyPlus – versão 9.0.1**. Florianópolis, 2019. Disponível em: <[http://labeee.ufsc.br/sites/default/files/publicacoes/relatorios\\_pesquisa/Manual\\_Vent\\_Natural\\_E%2Bversao9.1.pdf](http://labeee.ufsc.br/sites/default/files/publicacoes/relatorios_pesquisa/Manual_Vent_Natural_E%2Bversao9.1.pdf)>. Acesso em: 12 jun. 2020.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência energética na arquitetura**. 3. ed. Rio de Janeiro: Eletrobras/PROCEL, 2014.

LARSEN, S. F. Modelización de la transferencia de calor al suelo en los programas de simulación térmica de edificios EnergyPlus y SIMEDIF. **Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente**, v. 15, p. 27-34, 2011.

LIBRALATO, M.; DE ANGELIS, A.; SARO, O. Evaluation of the ground-coupled quasi-stationary heat transfer in buildings by means of an accurate and computationally efficient numerical approach and comparison with the ISO 13370 procedure. **Journal of Building Performance Simulation**, v. 12, n. 5, p. 719–727, 3 set. 2019.

LP OSB. LP Building Products. **Catálogo Técnico**. Curitiba, 2017. Disponível em: <[https://www.lpbrasil.com.br/wp-content/uploads/2017/06/Catalogo\\_Tecnico\\_LP-OSB-APA.pdf](https://www.lpbrasil.com.br/wp-content/uploads/2017/06/Catalogo_Tecnico_LP-OSB-APA.pdf)>. Acesso em: 23 ago. 2020.

LUO, C.; MOGHTADERI, B.; PAGE, A. Effect of ground boundary and initial conditions on the thermal performance of buildings. **Applied Thermal Engineering**, v. 30, n. 16, p. 2602–2609, 2010.

MACIEL NETO, J. A. **Caracterização Térmica dos Solos**. 2011. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Energéticas e Nucleares) – Departamento de Energia Nuclear, Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2011.

MATEUS, N. M.; PINTO, A.; GRAÇA, G. C. da. Validation of EnergyPlus thermal simulation of a double skin naturally and mechanically ventilated test cell. **Energy and Buildings**, v. 75, p. 511–522, 2014.

MIHALAKAKOU, G.; SANTAMOURIS, M.; ASIMAKOPOULOS, D. ARGIRIOU, A. On the ground temperature below buildings. **Solar Energy**, v. 55, n. 5, p. 355–362, 1995.

NEYMARK, J.; JUDKOFF, R.; BEAUSOLEIL-MORRISON, I.; BENNAKHI, A.; CROWLEY, M.; DERU, M.; HENNINGER, R.; RIBBERINK, H.; THORNTON, J.; WIJSMAN, A.; WITTE, M. International Energy Agency building energy simulation test and diagnostic method (IEA BESTEST) in depth diagnostic cases for ground coupled heat transfer related to slab on-grade construction, **NREL/TP-550-43388**. National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, USA, 2008.

NUNES, G. H.; SANCHES, G. V.; ZARA, R. B.; GIGLIO, T. G. F. Análise de métodos de cálculo para determinação da temperatura do solo em simulações computacionais. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2019. **Anais...** Brasília: ANTAC, 2019.

OLIVEIRA, L. da S.; CUNHA, E. G. da.; SILVA, A. C. B. da.; PINTO, M. Importância da definição da temperatura do solo para o processo de simulação termoenergética de edificações. In: XIV ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2012. **Anais...** Brasília: ANTAC, 2012.

ONSET. Onset Computer Corporation. **HOBO® U12 Temp/RH/Light/ External Data Logger (Part # U12-012) Manual**. 2016. Disponível em: <[https://www.onsetcomp.com/files/manual\\_pdfs/13128C%20U12012%20Manual.pdf](https://www.onsetcomp.com/files/manual_pdfs/13128C%20U12012%20Manual.pdf)>. Acesso em: 9 jul. 2020.

ONSET. Onset Computer Corporation. **HOBO® U10 Temp/RH Data Logger (Part # U10-003) Manual**. 2012. Disponível em: <[https://www.onsetcomp.com/files/manual\\_pdfs/11196-B-MAN-U10-003.pdf](https://www.onsetcomp.com/files/manual_pdfs/11196-B-MAN-U10-003.pdf)>. Acesso em: 9 jul. 2020.

ONSET. Onset Computer Corporation. **12-Bit Temperature Smart Sensor (S-TMB-M0xx) Manual**. 2017. Disponível em: <[https://www.onsetcomp.com/files/manual\\_pdfs/7105-P%20S-TMB%20Manual.pdf](https://www.onsetcomp.com/files/manual_pdfs/7105-P%20S-TMB%20Manual.pdf)>. Acesso em: 9 jul. 2020.

PEREIRA, C. D. **A Influência do Envelope no Desempenho Térmico de Edificações Residenciais Unifamiliares Ocupadas e Ventiladas Naturalmente**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2009.

PEREIRA, C. D.; GHISI, E. Simulações da Casa Eficiente após sua Construção. In: LAMBERTS, R. *et al.* **Casa eficiente: simulação computacional do desempenho termo-energético**. Florianópolis: UFSC/LabEEE, 2008.

RAFTERY, P.; KEANE, M.; O'DONNELL, J. Calibrating whole building energy models: An evidence-based methodology. **Energy and Buildings**, v. 43, p. 2356- 2364, 2011.

RAO, T. V. R.; SILVA, B. B. da.; MOREIRA, A. A. Características térmicas do solo em Salvador, BA. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 9. n. 4, p. 554-559, 2005.

REMPEL, A.; REMPEL, A. Rocks, Clays, Water, and Salts: Highly Durable, Infinitely Rechargeable, Eminently Controllable Thermal Batteries for Buildings. **Geosciences**, v. 3, n. 1, p. 63–101, 25 jan. 2013.

RESENDE, B. C.; SOUZA, H. A. de; GOMES, A. P. Modelagem da transferência de calor de ambientes subterrâneos no programa de simulação EnergyPlus. **Ambiente Construído**, v. 19, n. 1, p. 161–180, 2019.

ROCK, B. A. Sensitivity study of slab-on-grade transient heat transfer model parameters. In: 2004 Winter Meeting - Technical and Symposium Papers, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, **Proceedings...** 2004.

ROCK, B. A.; OCHS, L. L. Slab-on-grade heating load factors for wood-framed buildings. **Energy and Buildings**, v. 33, p. 759–768, 2001.

SILVA, A. S.; GHISI, E. Análise de sensibilidade global dos parâmetros termofísicos de uma edificação residencial com o método de simulação do RTQ-R. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v.13, n.4, p. 135-148, jul./set. 2013.

SILVA, A. S.; GHISI, E. Uncertainty analysis of the computer model in building performance simulation. **Energy and Buildings**, v. 76, p. 258-269, 2014.

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

SPIGA, M.; VOCALE, P. Effect of floor geometry on building heat loss via the ground. **Heat Transfer Engineering**, v. 35, n. 18, p. 1520–1527, 2014.

U.S. Department of Energy. **Auxiliary Programs Reference**. 2020a. Disponível em: <<https://energyplus.net/>>. Acesso em: 12 abril 2020.

U.S. Department of Energy. **Engineering Reference**. 2020b. Disponível em: <<https://energyplus.net/>>. Acesso em: 12 abril 2020.

U.S. Department of Energy. **Input Output Reference**. 2020c. Disponível em: <<https://energyplus.net/>>. Acesso em: 12 abril 2020.

WANG, F. S. Mathematical Modeling and Computer Simulation of Insulation Systems in Below Grade Applications. In: **Proceedings of Thermal Performance of Exterior Envelopes of Buildings I**, p. 456-471, ASHRAE, Clearwater, Florida, 1979.

WESTPHAL, F.S.; LAMBERTS, R. Building Simulation Calibration Using Sensitivity Analysis. In: BUILDING SIMULATION, 9., 2005, Montreal. **Proceedings...** Montreal: IBPSA, 2005. p. 1331-1338.

WESTPHAL, F. S. **Análise de incertezas e de sensibilidade aplicadas à simulação de desempenho energético de edificações comerciais.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2007.

WINKELMANN, F. Underground surfaces: how to get a better underground surface heat transfer calculation in DOE-2.1E, **Building Energy Simulation User News**, p. 19-26, 2002.

XING, L. U. **Estimations of Undisturbed Ground Temperatures Using Numerical and Analytical Modeling.** Stillwater, 2014. 406 f. Tese de Doutorado – Oklahoma State University, Stillwater, 2014.

YU, J.; KANG, Y.; ZHAI, Z. (JOHN). Comparison of ground coupled heat transfer models for predicting underground building energy consumption. **Journal of Building Engineering**, v. 32, jul, 2020.

ZARA, R.B. **Influência dos parâmetros termofísicos no desempenho termoenergético de edificações residenciais em sistemas construtivos leves.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Londrina. Londrina, 2019.

ZARA, R. B.; SANTOS, V. C.; GIGLIO, T. G. F. Análise do nível de eficiência energética de uma habitação em wood frame pelos métodos prescritivo e simulação do RTQ-R. In: XVII ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO: DESAFIOS DA INOVAÇÃO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, p. 457-466 **Anais...** Foz do Iguaçu, 2018.