



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

Matheus Mendonça Barbosa

**Tetos Frios: Comportamento termoenergético de edificação unifamiliar
submetida em cidades de climas quentes do nordeste brasileiro**

Florianópolis

2024

Matheus Mendonça Barbosa

**Tetos Frios: Comportamento termoenergético de edificação unifamiliar
submetida em cidades de climas quentes do nordeste brasileiro**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Deivis Luis Marinoski.

Florianópolis

2024

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Barbosa, Matheus Mendonça

Tetos Frios : Comportamento termoenergético de
edificação unifamiliar submetida em cidades de climas
quentes do nordeste brasileiro / Matheus Mendonça Barbosa ;
orientador, Deivis Luis Marinoski, 2024.

108 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil, Florianópolis, 2024.

Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. Tetos Frios. 3. Desempenho
Termoenergético. 4. Edificações Residenciais Unifamiliares.
I. Marinoski, Deivis Luis. II. Universidade Federal de
Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Civil. III. Título.

Matheus Mendonça Barbosa

**Tetos Frios: Comportamento termoenergético de edificação unifamiliar
submetida em cidades de climas quentes do nordeste brasileiro**

O presente trabalho em nível de Mestrado foi avaliado e aprovado, em 29 de fevereiro de 2024, pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Profa. Juliana Oliveira Batista, Dra.
Universidade Federal de Alagoas

Prof. Roberto Lamberts, *Ph.D.*
Universidade Federal de Santa Catarina

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Profa. Dra. Fernanda Fernandes Marchiori
Coordenação do Programa de Pós-Graduação

Prof. Dr. Deivis Luis Marinoski
Orientador

Florianópolis, 2024.

AGRADECIMENTOS

À Deus, primeiramente, pela oportunidade e condução nesta etapa com tantos desafios diários.

Aos meus pais, Cristiane Mendonça e Marconi Barbosa, por todo amparo e suporte durante minha vida e, sobretudo, na jornada acadêmica de mestrado.

À minha companheira, Allana Albuquerque, pela abdicação, companhia e compreensão durante todos esses anos vividos, por compartilhar a vida comigo com bastante alegria e me propiciar momentos incríveis que guardarei para sempre. Seu apoio foi fundamental para esta conquista.

Aos meus irmãos gêmeos, Marconi Mendonça e Marcos Mendonça, que me acompanharam desde o ensino infantil até a graduação. É uma enorme satisfação ser irmão gêmeo de vocês e compartilhar da mesma profissão, da qual trocar experiências de engenharia em todo encontro tornou-se uma rotina viciante.

Ao professor Devis Luis Marinoski, meu orientador, por toda a paciência, incentivo e suporte durante toda a jornada do mestrado. Meus sinceros agradecimentos.

Aos professores Ana Paula Melo, Roberto Lamberts e Saulo Guths pelas contribuições durante o exame de qualificação.

Aos colegas e amigos que me auxiliaram, de alguma forma, durante esta trajetória, deixando mais suave o desenvolvimento e conclusão do curso de mestrado.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

RESUMO

O uso de tetos frios como solução passiva para climatização de edificações, principalmente em regiões de climas quentes, tem o potencial de reduzir o consumo de energia, otimizar o conforto e desempenho térmico, além de contribuir na esfera ambiental, atuando na mitigação dos efeitos causadores de ilha de calor e emissões de CO₂. Este trabalho apresenta um estudo de simulação computacional com o objetivo de analisar os impactos termoenergéticos gerados pelo uso de tetos frios em cobertura de edificação unifamiliar de baixa renda em quatro cidades localizadas no nordeste brasileiro: São Luís/MA, Picos/PI, Recife/PE e Porto Seguro/BA. Os modelos computacionais, desenvolvidos por meio do software EnergyPlus, abrangem cenários que envolvem o uso do teto frio (absortância solar de 0,25), teto frio degradado (absortância solar de 0,42) e teto padrão (absortância solar de 0,65). Foram contempladas variações no perfil de ocupação, padrão de uso e isolamento da envoltória. Os perfis de ocupação foram adotados conforme o padrão da NBR 15575-1 (ABNT, 2021), que define as diretrizes para avaliação de desempenho térmico de edificações residenciais, perfil de ocupação noturna e diurna. O padrão de uso variou a partir de modelos que consideram ventilação natural, operação de carga térmica em regime contínuo e híbrido. Na envoltória, selecionou-se um modelo de telha comum no Brasil e elaborou-se doze cenários variando a taxa de absortância solar (0,25, 0,42 e 0,65) e resistência térmica (de 0,49 a 6,00 m².K/W). Investigou-se o desempenho térmico da unidade habitacional, tendo sido simulados modelos com diferentes arquivos climáticos e piso adiabático, observando-se o desempenho energético para os diversos perfis de ocupação, o balanço térmico na superfície externa do telhado e o potencial mitigador nas emissões de CO₂. Para todas as cidades, os resultados apontaram que os tetos frios com baixo isolamento apresentam indicadores mais eficientes quanto ao comportamento termoenergético. O uso de tetos frios resultou em aprimoramento no desempenho térmico da unidade habitacional, reduzindo a temperatura operativa máxima em até 2,1°C, incrementando o percentual de horas de ocupação dentro de uma faixa de temperatura operativa da unidade habitacional (PHFT_{UH}) em até 19,8 pontos percentuais e reduzindo a carga térmica entre 19% e 35%. A análise do impacto do arquivo climático no desempenho térmico revelou que o arquivo climático é relevante e pode interferir na classificação de desempenho térmico da unidade habitacional. A adoção do piso adiabático na unidade habitacional resultou em valores que desfavorecem os indicadores de desempenho térmico da habitação. Independentemente do perfil de ocupação e usos, as proposições de tetos frios mostraram-se mais eficientes, registrando reduções na carga térmica entre 52,9 e 97,5kWh/m².ano. A implementação do teto frio reduziu significativamente o fluxo de calor liberado por radiação de ondas longas (39% e 52%), destacando sua capacidade em atenuar os efeitos causadores de ilha de calor urbano. O potencial de redução na emissão de CO₂ variou conforme a proposição de teto frio e eficiência do equipamento, com os cenários mais eficientes apresentando reduções de 30,5% a 73,1%. Conclui-se que os tetos frios são alternativas eficazes para edificações unifamiliares situadas em regiões de climas quentes do nordeste brasileiro.

Palavras-chave: tetos frios; desempenho termoenergético; edificações residenciais.

ABSTRACT

The use of cool roofs as a passive solution for building climate control, especially in warm climate regions, has the potential to reduce energy consumption, optimize comfort and thermal performance, as well as contribute to the environment by mitigating the effects of heat islands and CO₂ emissions. This work presents a computational simulation aimed at analyzing the thermoenergetic impacts generated by the use of cool roofs in low-income single-family building roofs in four cities located in northeastern Brazil: São Luís/MA, Picos/PI, Recife/PE, and Porto Seguro/BA. The computational models, developed using the EnergyPlus software, cover scenarios involving the use of cool roofs (solar absorptance of 0.25), degraded cool roofs (solar absorptance of 0.42) and standard roofs (solar absorptance of 0.65). Variations in occupancy profile, usage pattern and envelope insulation were considered. Occupancy profiles followed the standard of NBR 15575-1 (ABNT, 2021), which defines guidelines for evaluating the thermal performance of residential buildings, including night and day occupancy profiles. The usage pattern varied from models considering natural ventilation, continuous thermal load operation and hybrid operation. For the envelope, a common roof tile model in Brazil was selected and twelve scenarios were developed varying the solar absorptance rate (0.25, 0.42, and 0.65) and thermal resistance (from 0.49 to 6.00 m².K/W). The thermal performance of the housing unit was investigated, simulating models with different climatic files and adiabatic flooring, observing energy performance for various occupancy profiles, thermal balance on the roof's external surface, and the potential for CO₂ emissions mitigation. For all cities, the results indicated that cool roofs with low insulation showed more efficient indicators in terms of thermo-energetic behavior. The use of cool roofs improved the thermal performance of the housing unit, reducing the maximum operative temperature by up to 2.1°C, increasing the percentage of hours of occupancy within a range of operative temperature of the housing unit (PHFT_{UH}) by up to 19.8 percentage points and reducing the thermal load between 19% and 35%. The analysis of the impact of the climatic file on thermal performance revealed that the climatic file is relevant and can interfere with the thermal performance classification of the housing unit. The adoption of adiabatic flooring in the housing unit resulted in values that disadvantage the thermal performance indicators of the housing. Regardless of the occupancy profile and usage, cool roof proposals proved to be more efficient, recording reductions in thermal load between 52.9 and 97.5 kWh/m².year. The implementation of cool roofs significantly reduced the flow of heat released by long-wave radiation (39% to 52%), highlighting its capacity to attenuate the effects of urban heat islands. The potential for reducing CO₂ emissions varied according to the cool roof proposal and equipment efficiency, with the most efficient scenarios showing reductions from 30.5% to 73.1%. It is concluded that cool roofs are effective alternatives for single-family buildings located in warm climate regions of northeastern Brazil.

Keywords: cool roofs; thermoenergetic performance; residential buildings.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Características do modelo computacional de referência (MREF).	25
Figura 2 - Método de análise do desempenho térmico pelo procedimento de simulação computacional, conforme NBR 15575 (ABNT, 2021).	28
Figura 3 – Método de acionamento em regime híbrido do condicionamento de ar. ...	30
Figura 4 - Esquema de balanço energético de superfície.	33
Figura 5 – Espectro da radiação global e extraterrestre com inclusão dos principais gases absorvedores da radiação solar.....	34
Figura 6 – Balanço de térmico na face externa do elemento.	35
Figura 7 - Características dos tetos frios.	36
Figura 8 – Consumo total de energia AVAC para o edifício de escritórios com variação da refletância solar nas cidades italianas avaliadas.	43
Figura 9 - Economia anual de custos de energia (por unidade de área de telhado) com um novo telhado refletivo (70% de refletância) versus um telhado preto (6% de refletância) para a loja de varejo com três níveis de isolamento de telhado em todos os 16 locais climáticos.....	44
Figura 10 - Economia anual de custos de energia (por unidade de área de telhado) com um novo telhado refletivo (70% de refletância) versus um telhado preto (6% de refletância) para o prédio escolar com três níveis de isolamento de telhado em todos os 16 locais climáticos.....	45
Figura 11 – Fluxo de calor liberado do telhado para o ar externo no verão.	47
Figura 12 – Fluxograma do Método.	51
Figura 13 – Representação do projeto arquitetônico da unidade unifamiliar e modelagem.....	53
Figura 14 – Mapa do Brasil com representação das cidades avaliadas.....	54
Figura 15 - Dados anuais de temperatura de bulbo seco (INMET).	55
Figura 16 - Dados anuais de temperatura de bulbo seco (TMYx).	59
Figura 17 – Perfis de ocupação adotados nas simulações.	61
Figura 18 – Resultados obtidos para os parâmetros de avaliação do desempenho térmico.....	68
Figura 19 – Variações encontradas nos resultados das simulações entre os dados meteorológicos TMYx e INMET.....	71

Figura 20 - Variações encontradas nos resultados das simulações consideração piso adiabático.....	75
Figura 21 – Balanço térmico de superfície.	78
Figura 22 – Radiação de ondas longas emitida pela superfície externa dos tetos.	79
Figura 23 – Radiação de ondas curtas recebida pela superfície externa dos tetos.	80
Figura 24 – Redução na liberação de calor por radiação de ondas longas.....	81
Figura 25 - Resultados obtidos de carga térmica para cada perfil de ocupação adotado.	84
Figura 26 – Resultados obtidos de emissão de CO ₂ para cada perfil de ocupação adotado.	87

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Atendimento à norma de desempenho térmico.....	69
Quadro 2 - Atendimento à norma de desempenho térmico.....	72
Quadro 3 - Atendimento à norma de desempenho térmico.....	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Taxa metabólica e fração radiante dos ocupantes.	25
Tabela 2 – Densidade de potência instalada, fração radiante e visível para o sistema de iluminação.	26
Tabela 3 – Potência e fração radiante dos equipamentos.	26
Tabela 4 - Intervalos de temperaturas externas de bulbo seco e faixa de temperatura operativa para determinação dos parâmetros de avaliação.	29
Tabela 5 - Propriedades típicas do material de cobertura.	37
Tabela 6 - Estudos de diferentes tipos de telhados frios analisados (continua).	39
Tabela 7 – Valores de transmitância térmica [W/m ² .K] para os elementos de paredes e coberturas.	46
Tabela 8 – Dados e classificação climática das cidades avaliadas.	54
Tabela 9 – Propriedades térmicas das portas.	56
Tabela 10 – Estimativa de degradação da absorvância solar e SRI para o teto frio.	57
Tabela 11 – Cenários e propriedades térmicas das diferentes coberturas analisadas.	58
Tabela 12 – Dados e classificação climática das cidades avaliadas.	59
Tabela 13 – Dados PET (ar-condicionado split inverter).	64
Tabela 14 – Coeficientes CEE _R e CEE _A	64
Tabela 15 – Parâmetros de saída utilizados para cálculo do balanço de superfície.	65

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
APP	Ambiente de Permanência Prolongada
APT	Ambiente de Permanência Transitória
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
ASTM	American Society for Testing and Materials
AVAC	Sistema de Aquecimento, Ventilação e Ar-Condicionado
CEE	Coeficiente de Eficiência Energética
CEE _A	Coeficiente de Eficiência Energética de Aquecimento
CEE _R	Coeficiente de Eficiência Energética de Resfriamento
CgTA _{APP}	Carga Térmica de Aquecimento do Ambiente de Permanência Prolongada
CgTR _{APP}	Carga Térmica de Resfriamento do Ambiente de Permanência Prolongada
CgTT	Carga Térmica Total da Unidade Habitacional
CSPF	Cooling Seasonal Performance Factor
DPI	Densidade de Potência Instalada
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EIA	Energy Information Administration
ICU	Ilha de Calor Urbano
IDRS	Índice de Desempenho de Resfriamento Sazonal
IEA	International Energy Agency
INI-R	Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Residenciais
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
MREF	Modelo de Referência para avaliação de desempenho térmico, conforme NBR 15575 (ABNT, 2021)
NBR	Norma Brasileira Registrada
PHFT	Percentual de Horas de Ocupação Dentro de uma Faixa de Temperatura Operativa

PHFT _{APP}	Percentual de Horas de Ocupação Dentro de uma Faixa de Temperatura Operativa do Ambiente de Permanência Prolongada
PHFT _{UH}	Percentual de Horas de Ocupação Dentro de uma Faixa de Temperatura Operativa para a Unidade Habitacional
RT	Resistência Térmica
SRI	Solar Reflectance Index
TD	Teto Frio Degradado
TF	Teto Frio
TP	Telhado Padrão
TMY	Typical Meteorological Year
TRY	Test Reference Year
To	Temperatura Operativa
UH	Unidade Habitacional
α	Absortância Solar
ρ	Refletância Solar

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVOS	17
1.1.1	Objetivo geral	17
1.1.2	Objetivos específicos	17
1.2	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	18
2	REFERENCIAL TEÓRICO	19
2.1	DESEMPENHO TÉRMICO E ENERGÉTICO DE EDIFICAÇÕES, COM ÊNFASE EM HABITAÇÕES.....	19
2.1.1	Método brasileiro de avaliação do Desempenho térmico de edificações por procedimento computacional	23
2.2	BALANÇO TÉRMICO DE SUPERFÍCIE	32
2.3	TETOS FRIOS	36
2.4	SÍNTESE DO CAPÍTULO	49
3	MÉTODO	51
3.1	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL.....	52
3.1.1	Aspectos da edificação e padrão de modelagem	52
3.1.2	Cenários alternativos no Padrão de Modelagem	56
3.1.2.1	<i>Cobertura</i>	56
3.1.2.2	<i>Arquivo climático</i>	58
3.1.2.3	<i>Modelagem do Solo</i>	60
3.1.2.4	<i>Uso e ocupação</i>	60
3.1.2.5	<i>Cargas internas</i>	61
3.1.2.6	<i>Ventilação natural e condicionamento de ar</i>	61
3.2	PARÂMETROS DE ANÁLISE	62
4	RESULTADOS	66
4.1	AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO.....	66
4.2	IMPACTO DO ARQUIVO CLIMÁTICO NO DESEMPENHO TÉRMICO	70
4.3	IMPACTO DA MODELAGEM DO SOLO NO DESEMPENHO TÉRMICO	73
4.4	BALANÇO TÉRMICO DE SUPERFÍCIE	77
4.5	ANÁLISE DA OCUPAÇÃO NA QUANTIDADE DE CARGA TÉRMICA	82
4.6	EMISSÕES DE CO ₂	85
5	CONCLUSÃO	90

5.1	LIMITAÇÕES DESTE TRABALHO	94
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	95
	REFERÊNCIAS	96

1 INTRODUÇÃO

Em todo o mundo, o setor de edificações desempenha uma parcela significativa no consumo de energia. Neste sentido, observou-se que o setor de edificações respondeu por cerca de 30% do consumo energético mundial no ano 2020 (IEA, 2022). À vista disso, a geração de energia é uma das principais ações antrópicas com implicações em impactos ambientais relacionados à emissão de gases causadores de efeito estufa que contribuem para as mudanças climáticas, sobretudo, o aquecimento global (Kumar *et al.*, 2020).

No ano de 2020, a administração de informações de energia (EIA) dos EUA realizou uma pesquisa de consumo de energia residencial que apontou que 34 milhões de domicílios (27%) dos EUA relataram dificuldade para pagar as contas de energia ou que mantiveram suas casas em temperaturas inseguras por preocupações com o custo energético. No mesmo ano, 1,4 milhão de famílias americanas (1%) relataram que alguém do grupo precisou de atendimento médico em decorrência de temperaturas inseguras mantidas na respectiva residência (EIA, 2022).

No contexto brasileiro, o setor elétrico apresentou um consumo de energia de 509,441TWh no ano de 2022, do quais as edificações (setores comercial e residencial) representaram uma parcela de 48,14% do consumo total (EPE, 2023).

A envoltória de uma edificação é responsável pelas trocas de calor entre o ambiente interno e o externo. Formada por alvenarias de fachadas, coberturas, esquadrias e pisos em contato com o exterior, é de extrema relevância quando se trata do estudo do ambiente térmico, bem como investigação das cargas térmicas atuantes em edificações. Por meio do estudo do desempenho da envoltória, pode-se examinar cada elemento termoenergicamente e gerar soluções para otimização do conforto ambiental, melhoria do ambiente urbano e, sobretudo, redução de cargas térmicas de aquecimento e resfriamento de edifícios (Lei; Yang; Yang, 2016).

A escolha e adequação das propriedades termofísicas dos materiais da envoltória construtiva pode ser uma medida passiva eficaz na redução da demanda energética dos equipamentos de aquecimento e refrigeração. No âmbito dos materiais opacos, as características de isolamento térmico, refletância solar e emitância térmica no espectro infravermelho são determinantes no comportamento termoenergético de uma edificação (Gentle; Aguilar; Smith, 2011; Shi; Zhang, 2011; Anh; Pásztor, 2021). O isolamento térmico do envelope construtivo, em adequada especificação e

espessura, permite a mitigação da perda ou ganho de calor nos elementos e, conseqüentemente, proporciona melhores condições de conforto térmico nos recintos além de atenuação dos gastos energéticos. No mesmo sentido, a refletância solar e emitância térmica no infravermelho são propriedades de superfícies que determinam, respectivamente, a reflexão de calor proveniente de ondas curtas e emissão de calor por ondas longas (Schiavoni *et al.*, 2016; Aditya *et al.*, 2017; Kumar *et al.*, 2020; Hong *et al.*, 2022).

O setor de edificações apresenta um considerável potencial de mitigação no consumo de energia. Em regiões de climas quentes com alta incidência de radiação solar ao longo do ano, os tetos frios surgem como uma solução passiva, de baixo custo de manutenção e implementação. Os tetos frios são superfícies que dispõem de alta refletância solar e emitância térmica. Essas superfícies proporcionam benefícios que estão associados à redução da temperatura superficial em comparação com os telhados convencionais, resultando em menor penetração de calor na edificação e menor transferência de calor por ondas longas ao ambiente externo. Dessa forma, especialmente em unidades com exposição de cobertura, onde as coberturas exercem influência significativa nas trocas de calor, os tetos frios podem ser utilizados como estratégias passivas para otimizar o ambiente térmico. Nesse contexto, pessoas em condições de vulnerabilidade econômica podem se beneficiar desse sistema, pois ajudam a manter temperaturas mais baixas na superfície da cobertura, reverberando em melhores condições de conforto térmico, desempenho térmico e redução da necessidade de refrigeração. Além das implicações financeiras relacionadas à redução da demanda de energia para refrigeração, a adoção dos tetos frios também promove a sustentabilidade ambiental (Akbari; Matthews, 2012; Sproul *et al.*, 2014; Stavrakakis; Androutsopoulos; Vyörykkä, 2016; Testa; Krarti, 2017; Seifhashemi *et al.*, 2018; Kolokotroni *et al.*, 2018; Rawat; Singh, 2022).

A simulação computacional é uma ferramenta eficaz para análise do comportamento termoenergético de edificações frente às condições dinâmicas do clima e variáveis às quais estão sujeitas. Um dos aspectos fundamentais nesse contexto é o conjunto de dados meteorológicos a serem utilizados, estes devem ser elaborados de forma a representar, considerando uma faixa aceitável de discrepância, as condições climáticas do local. Os dados climáticos interferem diretamente nos resultados de saída obtidos por meio de simulações computacionais, neles, estão contidas informações de variáveis climáticas como, por exemplo, temperatura de

bulbo seco, temperatura de bulbo úmido, umidade relativa, irradiância solar, velocidade do vento etc. Também é possível incluir a significância da prescrição do padrão de uso e ocupação para a análise do comportamento termoenergético de edificações. Esse padrão abrange o hábito de uso de aparelhos elétricos, operação das esquadrias, períodos de ocupação nos recintos, entre outros. Possuir uma referência representativa desse padrão implica na realização de simulações mais assertivas, minimizando as disparidades entre o cenário simulado e o cenário real (Pyrgou *et al.*, 2017; Ascione *et al.* 2020; Jazaeri; Gordon; Alpcan, 2019; Ge *et al.*, 2021).

Isto posto, o conhecimento acerca das variáveis que influenciam as trocas de calor ocorridas nas edificações é determinante para assegurar a eficácia de medidas de eficiência energética. O envelope construtivo é um conjunto decisivo nas trocas térmicas e energéticas de construções, tendo influência direta na redução do consumo energético, bem como das emissões de CO₂ e respectivos impactos ambientais, além de contribuir para o conforto ambiental e benefícios financeiros.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo geral analisar os impactos termoenergéticos proporcionados pelo uso de tetos frios em cobertura de edificação unifamiliar situada em quatro cidades da região nordeste do Brasil.

1.1.2 Objetivos específicos

- a) Classificar o nível de desempenho térmico da residência para diferentes composições de coberturas, de acordo com NBR 15575 (ABNT, 2021);
- b) Demonstrar o impacto do uso de diferentes arquivos climáticos nos parâmetros de classificação de desempenho térmico da residência;
- c) Verificar a influência da modelagem do solo no desempenho térmico da edificação;
- d) Examinar os fluxos radiativos de ondas curtas e longas para cada composição de cobertura estudada;
- e) Analisar padrões de uso e ocupação no comportamento termoenergético da habitação;

- f) Avaliar o potencial de redução nas emissões de dióxido de carbono (CO₂) entre os modelos de simulação.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está estruturado em cinco capítulos: introdução, referencial teórico, método, resultados e conclusão.

O primeiro capítulo apresenta uma introdução sobre o tema, destacando os principais pontos da pesquisa, justificativa e os objetivos a serem alcançados.

No capítulo de referencial teórico, é realizada uma análise sobre o desempenho térmico e energético de edificações, com foco em habitações, incluindo uma explanação sobre o método brasileiro de avaliação do desempenho térmico de edificações por procedimento computacional. Em seguida, é exposto o balanço térmico de superfície, com ênfase na compreensão das trocas de calor ocorridas nas superfícies externas de coberturas. Também são discutidos os tetos frios, através de uma revisão de literatura sob diferentes perspectivas. Por último, é apresentada uma síntese do capítulo.

No capítulo de método, são descritos os procedimentos admitidos para alcançar os objetivos estabelecidos no capítulo de introdução. É abordado o procedimento de simulação computacional empregado, incluindo aspectos da edificação adotada e padrão de modelagem. A partir da determinação do padrão de modelagem, são apresentados os cenários alternativos que incluem aspectos da cobertura, arquivo climático, modelagem do solo, uso e ocupação, cargas internas, ventilação natural e condicionamento de ar.

No capítulo de resultados, são exibidos os resultados obtidos em razão da simulação computacional, seguidos de discussões.

No quinto e último capítulo, são expostas as principais conclusões, as limitações e sugestões para trabalhos futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo abordará as fundamentações essenciais para a compreensão da proposta deste trabalho que se remete à defesa do uso de tetos frios em regiões de climas quentes. A priori, apresenta-se uma abordagem sobre desempenho térmico e energético de edificações buscando demonstrar a relevância do tema para o pleito de melhores condições de conforto e redução do consumo energético de edificações, além de explicar o método de avaliação do desempenho térmico pelo procedimento computacional, regido pela NBR 15575 (ABNT, 2021). A seguir, são introduzidos os mecanismos de transferência de calor em superfícies opacas, enfatizando o balanço térmico ocorrido nas superfícies com destaque na superfície de telhado. Por último, realiza-se revisões de literatura acerca de trabalhos, sobre tetos frios, realizados em diversas regiões com diferentes perfis climáticos, objetivos e metodologias de pesquisa.

2.1 DESEMPENHO TÉRMICO E ENERGÉTICO DE EDIFICAÇÕES, COM ÊNFASE EM HABITAÇÕES

Diversas são as variáveis que interferem no desempenho térmico e energético de edificações. Quando conhecidas e bem operadas, sobretudo, em fase de concepção de projetos, pode-se alcançar melhores condições de desempenho com menor dispêndio de energia. Nesse ínterim, o trabalho de Yıldız e Arsan (2011) concentrou-se no estudo do desempenho térmico de edificações residenciais de múltiplos pavimentos, com ênfase às regiões de climas quentes e úmidos. O estudo teve o objetivo principal de determinar os fatores de maior impacto no incremento da carga térmica necessária para o aquecimento e resfriamento, utilizando abordagens de análises de sensibilidade e de incerteza. O método baseou-se na adoção de um caso base, que consistiu em um edifício vertical multifamiliar de 10 pavimentos situado em Esmirna, na Turquia. Foram consideradas variações a partir de nove parâmetros principais de entrada: a forma do edifício, área de janela à parede externa, cor da envoltória, temperatura de setpoint de aquecimento e resfriamento, propriedades termofísicas dos materiais de construção, isolamento térmico, ventilação natural, infiltração do ar e altura das zonas térmicas. Em seguida, o método de Monte Carlo foi aplicado para a análise de sensibilidade e incerteza associadas aos parâmetros adotados. Sendo assim, o edifício foi sintetizado em três modelos computacionais

desenvolvidos para os pavimentos térreo, intermediário e superior. Os modelos foram submetidos a simulações no software EnergyPlus. Os resultados apontaram que os parâmetros tiveram diferentes magnitudes em cada pavimento analisado, dependendo das diferentes condições de exposição. Por exemplo, no pavimento térreo, verificou-se que a espessura do piso em contato com o solo foi um parâmetro de grande influência, enquanto no pavimento superior, o maior impacto ocorreu devido à transferência de calor proveniente do telhado. Os autores concluíram o estudo ressaltando que cada parâmetro é devidamente importante e declararam que os parâmetros de maiores influências nas cargas térmicas de aquecimento e resfriamento do caso base adotado foram as características das janelas, como área e fator solar.

Fernandes *et al.* (2019) realizaram uma análise estatística da variação da transmitância térmica nos elementos opacos e transparentes do envelope construtivo de um grande conjunto de edificações residenciais em diferentes locais do Mediterrâneo, dos quais incluem cidades do sul da Europa, norte da África e do Oriente Médio. Desse modo, foram selecionados dezesseis locais na região do mediterrâneo que compreenderam valores de latitude entre 31,20N e 45,50N. Edifícios residenciais de dois pavimentos, isentos de sombreamento na vizinhança, foram gerados aleatoriamente por intermédio do algoritmo EPSAP e as simulações termoenergéticas ocorreram no software EnergyPlus (versão 8.8). O desempenho das edificações foi avaliado de acordo com os critérios de carga térmica, considerando o sistema de cálculo ideal na modelagem dos sistemas de condicionamento de ar, vislumbrando observar o desempenho da edificação sem modelar um sistema AVAC completo. Ao todo, foram realizadas 192.000 simulações divididas em grupos por localização e valores de transmitância térmica dos elementos opacos e transparentes da envoltória. Os resultados de correlação estatística apontaram que os valores adequados de transmitância térmica dos elementos da envoltória variam em função das latitudes de cada local. Nas regiões com latitudes mais altas menores valores de transmitância dos elementos opacos implicam em menores quantidades de carga térmica, com exceção de valores muito baixos de transmitância que provocam penalidades na carga térmica de aquecimento, enquanto nas latitudes mais baixas, os resultados mostraram que as demandas de resfriamento aumentaram com a utilização de menores valores de transmitância térmica nos elementos opacos devido à maior dificuldade na liberação de calor do edifício. Além disso, verificou-se que, para

baixos valores de transmitância térmica nos elementos transparentes, janelas maiores voltadas ao norte impactaram na redução do consumo de energia. Os autores concluem afirmando que o estudo contribui para que projetistas optem por valores mais adequados de transmitância térmica para o envelope da região estudada.

Jazaeri, Gordon e Alpcan (2019) estudaram os efeitos combinados das características da envoltória, condições climáticas e padrões de ocupação na demanda de AVAC de um edifício residencial. Os autores elaboraram modelos computacionais no software TRNSYS com variações de cinco tipos de sistemas de alvenarias verticais externas com diferentes resistências térmicas e capacidades térmicas, além de considerarem seis cenários distintos de ocupação e dez cidades representativas para as zonas climáticas da Austrália, com exceção da zona climática australiana 8 sob a justificativa de que há um número muito baixo de pessoas residentes nesta zona climática e, portanto, foi desconsiderada. Os resultados apontaram grande influência da inércia térmica nas demandas de aquecimento e resfriamento da edificação. Foi verificado que o aumento da inércia térmica provocou diminuição nas demandas energéticas da edificação (de 10% a 15%). Os diferentes cenários de ocupação evidenciaram a relevância desta variável na determinação do consumo de energia anual, bem como nos picos de demanda energética horária. Verificou-se que os cenários com mais horas ocupadas representaram as maiores demandas anuais de consumo energético e menores picos de demanda energética horária, enquanto os cenários com menos horas ocupadas indicaram menores demandas anuais e maiores picos de demanda energética horária. Devido ao maior tempo desocupado, a temperatura interna pode ultrapassar os limites programados de setpoint, ocasionando com que o sistema AVAC utilize maiores quantidades de energia em curtos períodos para atendimento ao setpoint estabelecido. Este trabalho permite evidenciar a relevância que o padrão de ocupação exerce no desempenho termoenergético da edificação, sendo determinante a compreensão dos perfis de ocupação para realização de análises mais eficientes e representativas da realidade.

A pesquisa de Ge *et al.* (2021) procurou investigar o impacto de diferentes hábitos de uso de aparelhos de ar-condicionado no desempenho termoenergético de edificação residencial. A metodologia empregada destacou-se na realização de simulações computacionais utilizando o software IES-VE. Foram considerados dois modos de operação: modo contínuo (baseado no padrão de simulação da zona climática chinesa HSCW, onde o aparelho permanece ligado durante todo o dia) e

modo intermitente (cronogramas de uso obtidos através de questionários aplicados em campo). Em relação ao modo de operação contínuo, os resultados apontaram uma economia significativa de energia considerando o modo de operação intermitente, o qual apresentou uma redução no consumo energético de aproximadamente 49%. Contudo, observou-se que as cargas energéticas de pico diárias do modo intermitente são consideravelmente maiores. Além disso, os autores contestam os padrões de simulação estabelecidos na China, alegando que os padrões atuais podem não representar adequadamente os hábitos comportamentais dos ocupantes em relação ao uso de ar-condicionado. De maneira semelhante, Ascione *et al.* (2020) avaliaram a influência das ações dos usuários na economia de energia de um edifício residencial, com ênfase em mostrar a importância dos hábitos de uso dos usuários em simulações de desempenho energético. Dentre as ações investigadas do usuário, foram admitidas atuação sobre o termostato interno, operação de janelas durante as horas de ativação do sistema de ar-condicionado, utilização errônea de sombreamentos, adição de equipamentos elétricos e uso intensivo do sistema iluminação. Essas ações tiveram abordagem determinística, isto é, assumiram comportamento uniforme dos usuários e, portanto, todos os usuários realizaram as mesmas ações e modificações nos sistemas. Para isso, foram realizadas simulações através do software *DesignBuilder V6* em um edifício típico da Itália. Os resultados mostraram que a demanda energética variou entre 98kWh/m² até 202kWh/m², à depender do comportamento dos ocupantes. Os autores concluem que a incerteza acerca dos hábitos dos usuários de maneira não padronizada não pode ser negligenciada, pois diferentes comportamentos geram impactos relevantes na demanda energética da edificação.

Uma discussão relevante sobre as simulações computacionais pauta sobre a qualidade dos dados de arquivos climáticos. Nos cenários de análise termoenergética, esses arquivos desempenham um papel fundamental ao fornecer informações sobre as condições meteorológicas de um determinado local. A importância desses arquivos não pode ser subestimada, uma vez que eles são utilizados como variável de entrada para simulações computacionais. Nesse contexto, Pyrgou *et al.* (2017) realizaram uma comparação estatística entre dados de arquivos climáticos TMY e TRY com dados coletados em duas estações meteorológicas em Perugia, na Itália. Os resultados obtidos a partir das observações das estações meteorológicas evidenciaram a presença do fenômeno de ilha de calor urbano, com maior incidência no verão. Além disso, verificou-se que os valores médios de temperatura de bulbo seco, obtidos a

partir dos conjuntos de dados TMY e TRY eram inferiores em comparação com aqueles registrados pelas estações meteorológicas. Ademais, identificaram-se grandes discrepâncias entre os valores de umidade relativa, tal como a irradiância global das estações meteorológicas que foram significativamente maiores que os dados climáticos TMY e TRY. Dessa forma, os autores reforçam que tais diferenças nas variáveis são significativamente relevantes, uma vez que desempenham um papel fundamental como ponto de partida em simulações destinadas a prever o consumo de energia. Portanto, dados climáticos devem ser continuamente atualizados, levando em consideração os efeitos microclimáticos urbanos. Caso contrário, a ausência dessa atualização poderá resultar em estimativas imprecisas no desempenho termoenergético de edifícios.

À vista dos estudos mencionados, verifica-se a significância de que o domínio das diferentes variáveis que influenciam no desempenho termoenergético de edificações podem contribuir para eficiência térmica e energética das mesmas. Tal conhecimento torna-se indispensável para projetistas que desejam otimizar o ambiente térmico de edificações.

2.1.1 Método brasileiro de avaliação do Desempenho térmico de edificações por procedimento computacional

A NBR 15575 (ABNT, 2021), amplamente conhecida como “norma de desempenho”, estabelece requisitos qualitativos e critérios quantitativos para a avaliação do desempenho de edificações destinadas à habitação no contexto brasileiro. Um dos principais objetivos da norma é assegurar que o desenvolvimento urbano em todo o território nacional proporcione condições mínimas aceitáveis de habitabilidade aos usuários.

O desempenho térmico é contemplado na avaliação preconizada pela NBR 15575 (ABNT, 2021), da qual estabelece dois procedimentos de avaliação: o procedimento simplificado e o procedimento computacional. O primeiro trata-se de uma análise prescritiva a partir de dados de projeto e construção, nele são avaliadas as paredes externas e coberturas quanto às propriedades térmicas, além de avaliar aberturas efetivas para ventilação e percentual de elementos transparentes. Deste modo, o procedimento computacional consiste no desenvolvimento de um modelo computacional termoenergético, representativo do projeto da habitação, e análise anual a partir dos parâmetros de desempenho (Figura 2). Ressalta-se que o

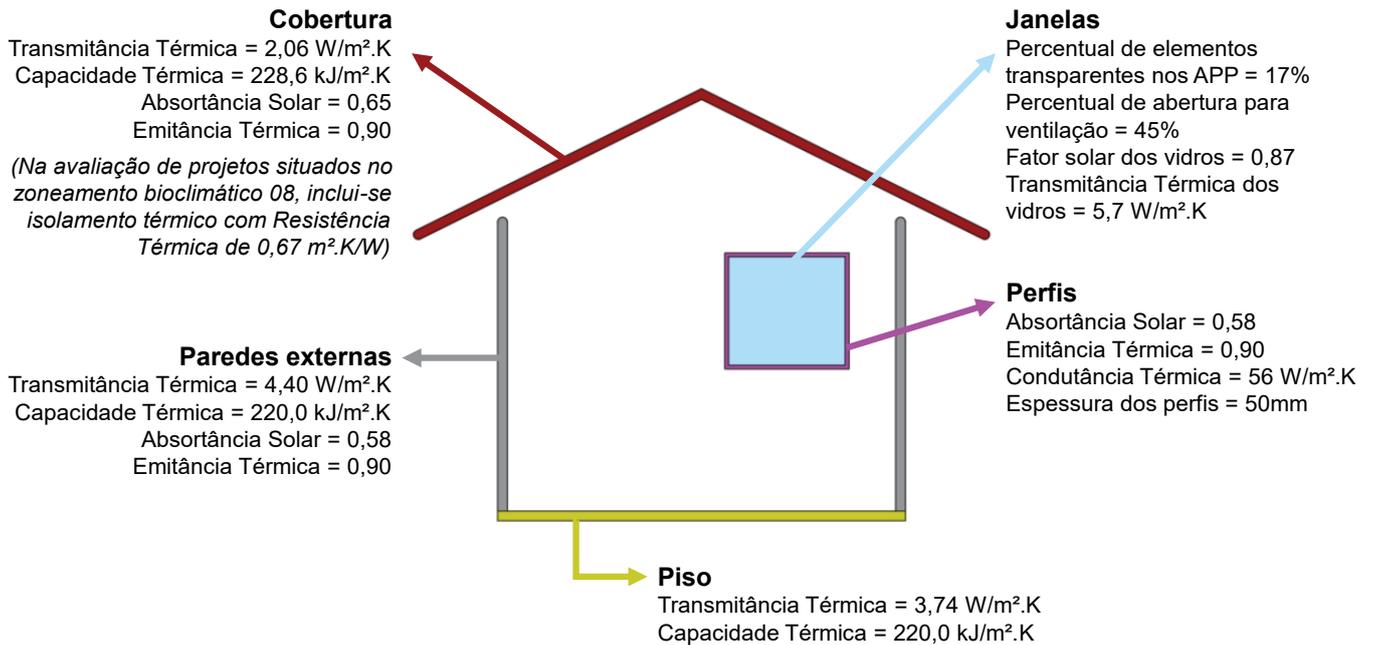
procedimento simplificado não é objeto de análise neste trabalho, logo a abordagem terá ênfase no procedimento computacional que, neste contexto, representa o método mais abrangente para avaliação do desempenho térmico.

A simulação do modelo computacional termoenergético requer a consideração de dois modos de operação distintos: com e sem ventilação natural. Os modelos com ventilação natural possibilitam uma análise do impacto de estratégias passivas nas unidades habitacionais, eliminando a necessidade de dependência de dispositivos elétricos para atingir um desempenho térmico adequado. Os modelos de simulação sem ventilação natural são simulados quando se pretende determinar a carga térmica anual integrada da unidade habitacional necessária para manter a temperatura do setpoint requerido. Estes modelos adotam um regime de operação híbrida, no qual a carga térmica é estimada com base nos resultados obtidos dos modelos que consideram a ventilação natural.

O padrão de arquivos climáticos para avaliação computacional de desempenho térmico é descrito na NBR 15575-1-1 (ABNT, 2021), a qual preconiza a utilização do banco de dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) para os anos de 2001 a 2010, processados por Maurício Roriz. Exige-se, ainda, a modelagem dos elementos de entorno da edificação, bem como pavimentação, corpos d'água, brises etc.

O procedimento computacional prevê a elaboração dos modelos real (MREAL) e de referência (MREF). Destaca-se que o modelo real (MREAL) representa a edificação analisada, em sua integralidade, de acordo com projeto, enquanto o modelo de referência (MREF) é desenvolvido a partir do modelo real, adotando-se características de referência (de caráter normativo e compulsório). Tais características do modelo de referência (MREF) estão representadas na Figura 1. Os cálculos efetuados para determinação dos valores de transmitância térmica e capacidade térmica dos materiais seguiram as recomendações da norma NBR 15220-2 (ABNT, 2022). Em suma, compreende-se o modelo de referência como patamar mínimo para qualificação da unidade habitacional com desempenho térmico adequado.

Figura 1 – Características do modelo computacional de referência (MREF).



Fonte: autor (2024).

Na modelagem das cargas internas em razão do calor gerado pela ocupação de pessoas, uso de iluminação artificial e equipamentos, ambos são ativados nos períodos em que há ocupação nos ambientes de permanência prolongada (APP). Os parâmetros de entrada associados à transferência de calor, as taxas adotadas para ocupantes, iluminação e equipamentos estão indicados na Tabela 1, Tabela 2 e Tabela 3, respectivamente.

Tabela 1 - Taxa metabólica e fração radiante dos ocupantes.

Ambiente	Atividade Realizada	Calor produzido por área de superfície corporal W/m ²	Calor produzido por uma pessoa com 1,80m ² de área de superfície corporal W	Fração radiante
Dormitório	Dormindo ou descansando	45	81	0,3
Sala	Sentado ou assistindo TV	60	108	0,3

Fonte: adaptado de NBR 15575 (ABNT, 2021).

Tabela 2 – Densidade de potência instalada, fração radiante e visível para o sistema de iluminação.

Ambiente	DPI W/m²	Fração radiante	Fração visível
Dormitório	5,00	0,32	0,23
Sala	5,00	0,32	0,23

Fonte: adaptado de NBR 15575 (ABNT, 2021).

Tabela 3 – Potência e fração radiante dos equipamentos.

Ambiente	Potência W	Fração radiante
Sala	120	0,30

Fonte: adaptado de NBR 15575 (ABNT, 2021).

A ocupação obedece ao critério de assumir dois ocupantes para cada dormitório existente na edificação com período de ocupação total (100%) iniciando às 22h00 com término às 07h59; as dependências de funcionários são excluídas deste critério. A quantidade de ocupantes das salas, no entanto, é determinada com base no número de dormitórios, sendo dois ocupantes para cada dormitório, porém com limite máximo de quatro ocupantes. Durante o período de ocupação nas salas, considera-se 50% da ocupação entre 14h00 e 17h59 e 100% da ocupação durante o intervalo de 18h00 e 21h59. É relevante mencionar que ao passo que os equipamentos estão em operação durante todo o período de ocupação das salas, a iluminação das salas é ativada entre 16h00 e 21h59, enquanto nos dormitórios, a iluminação é acionada das 06h00 às 07h59 e das 22h00 às 23h59. Todos esses cronogramas enunciados são aplicáveis para todos os dias do ano, incluindo finais de semana.

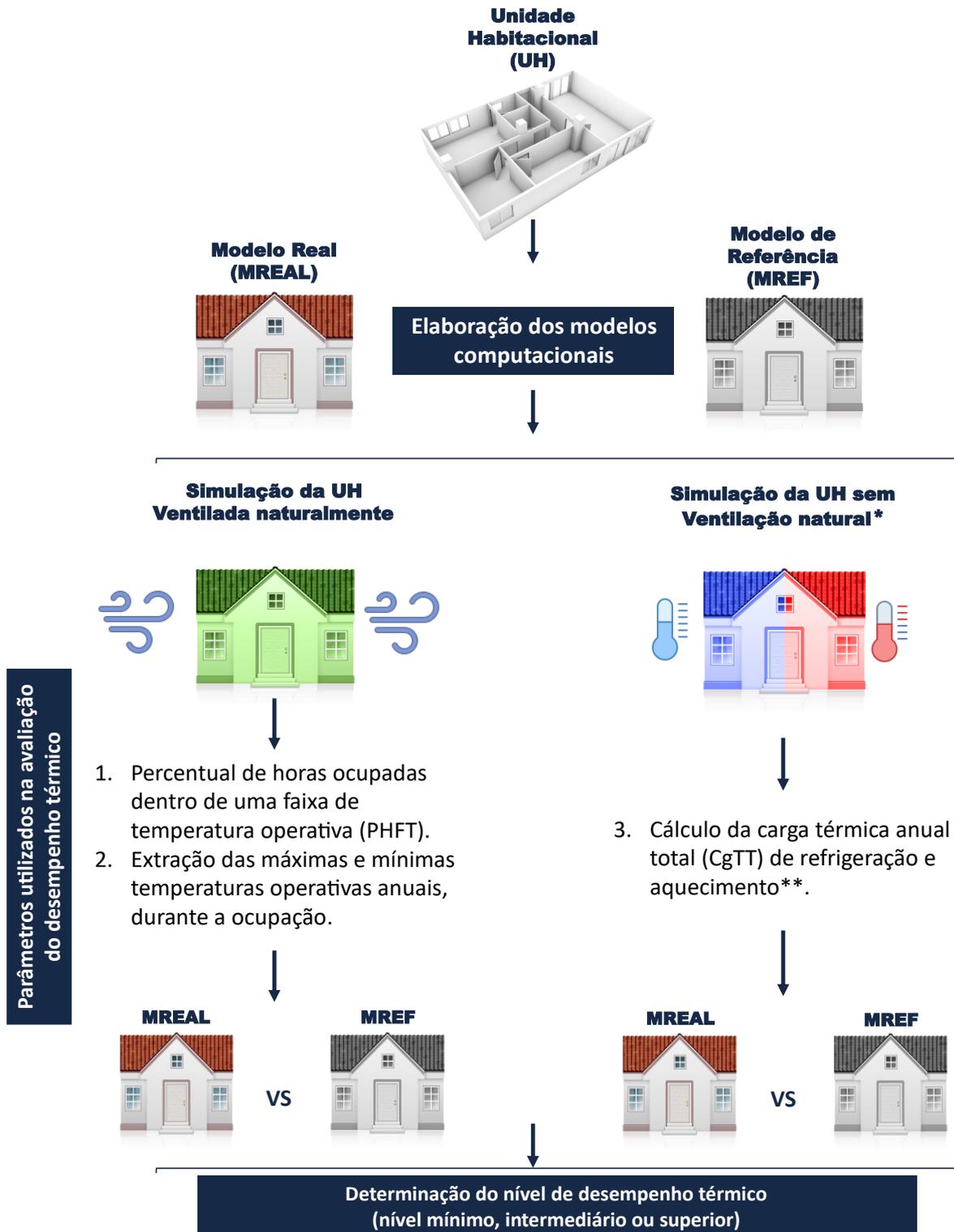
O modelo computacional termoenergético configurado com ventilação natural admite as portas internas sempre abertas, com exceção de portas de banheiro que permanecem fechadas em toda a simulação, a porta externa (de acesso à residência) também permanece fechada; a janela do banheiro mantém-se sempre aberta e as demais janelas são abertas quando a temperatura de bulbo seco interna do respectivo ambiente de permanência prolongada estiver maior ou igual a 19°C e acima da temperatura de bulbo seco externa. Considera-se, também, a ocorrência de infiltração de ar por frestas nos momentos que as janelas estiveram fechadas.

Nas simulações sem o uso da ventilação natural, todas as portas e janelas são consideradas fechadas, exceto a janela do banheiro, e mantém ocorrência de infiltração de ar apenas pelas frestas. Emprega-se um sistema de cálculo ideal para contabilização das cargas térmicas sensíveis e latentes correspondente ao aquecimento e resfriamento de cada ambiente de permanência prolongada. Por conseguinte, adota-se os setpoints de 21°C e 23°C para acionamento do sistema quanto ao aquecimento e resfriamento, respectivamente.

Tanto os modelos com ventilação quanto os modelos sem ventilação são operados ou acionados somente nos períodos em que os ambientes de permanência prolongada estão ocupados.

A avaliação do desempenho térmico pelo procedimento computacional é realizada por meio da análise de três parâmetros: o indicador PHFT_{UH} (percentual de horas na faixa de temperatura operativa da unidade habitacional), temperaturas operativas anuais máximas e mínimas e redução de carga térmica anual integrada de aquecimento e resfriamento. Esses parâmetros são necessários para avaliação do atendimento da habitação nos níveis de desempenho térmico e ambos são determinados durante a ocupação nos ambientes de permanência prolongada, isto é, em ambientes com função de dormitórios e salas. A Figura 2 ilustra o procedimento de simulação computacional dos modelos, conforme a NBR 15575 (ABNT, 2021).

Figura 2 - Método de análise do desempenho térmico pelo procedimento de simulação computacional, conforme NBR 15575 (ABNT, 2021).



* Cálculo da carga térmica apenas para avaliação da edificação nos níveis intermediário e superior;

** Para climas com temperatura de bulbo seco médio < 25 °C.

O desempenho térmico de uma edificação habitacional pode ser classificado em três níveis, sendo eles, os níveis mínimo, intermediário e superior. Exige-se que uma unidade habitacional atinja, ao menos, o nível mínimo de desempenho. O procedimento simplificado permite a avaliação do atendimento da habitação apenas ao nível mínimo, no entanto, o procedimento computacional permite a avaliação aos níveis mínimo, intermediário e superior.

A determinação dos parâmetros $PHFT_{UH}$ e cargas térmicas de aquecimento (Cg_{TA}) e refrigeração (Cg_{TR}) baseiam-se na média anual da temperatura externa de bulbo seco, obtida a partir da análise do arquivo climático local. À vista disso, estabelece-se três intervalos para definição dos respectivos parâmetros (Tabela 4).

Tabela 4 - Intervalos de temperaturas externas de bulbo seco e faixa de temperatura operativa para determinação dos parâmetros de avaliação.

Intervalos de temperaturas externas	Média anual da temperatura externa de bulbo seco (TBSm)	Faixa de temperatura operativa para cálculo do PHFT	Faixa de temperatura operativa para o cálculo da $Cg_{TR_{APP}}$	Faixa de temperatura operativa para o cálculo da $Cg_{TA_{APP}}$
Intervalo 1	$TBSm < 25,0^{\circ}C$	$18,0^{\circ}C < T_{O_{APP}} < 26,0^{\circ}C$	$T_{O_{APP}} \geq 26,0^{\circ}C$	$T_{O_{APP}} \leq 18,0^{\circ}C$
Intervalo 2	$25,0^{\circ}C \leq TBSm < 27,0^{\circ}C$	$T_{O_{APP}} < 28,0^{\circ}C$	$T_{O_{APP}} \geq 28,0^{\circ}C$	Não considera
Intervalo 3	$TBSm \geq 27,0^{\circ}C$	$T_{O_{APP}} < 30,0^{\circ}C$	$T_{O_{APP}} \geq 30,0^{\circ}C$	

Notas:

$T_{O_{APP}}$ é a temperatura operativa do APP, que atende aos limites estabelecidos nesta tabela.

Fonte: adaptado de NBR 15575 (ABNT, 2021).

Com base nas informações apresentadas na Tabela 4, a Figura 3 exemplifica as circunstâncias nas quais o sistema do condicionamento de ar de uma unidade habitacional pertencente ao intervalo 1 é acionado com base nas temperaturas operativas dos APP simulados com o advento de ventilação natural.

Figura 3 – Método de acionamento em regime híbrido do condicionamento de ar.

Hora do ano	Ocupação do APP	Modelo computacional com ventilação natural		Modelo computacional com Condicionamento de ar	
		To APP	PHFTAPP	CgTRAPP	CgTAAPP
1	Sim	18°C < To < 26°C	Sim	Não	Não
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
a	Não	18°C < To < 26°C	Não	Não	Não
b	Não	To ≥ 26°C	Não	Não	Não
c	Não	To ≤ 18°C	Não	Não	Não
d	Sim	To ≥ 26°C	Não	Sim	Não
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
8760	Sim	To ≤ 18°C	Não	Não	Sim

Fonte: adaptado de NBR 15575 (ABNT, 2021).

Assim sendo, o PHFT da unidade habitacional (PHFT_{UH}) é determinado a partir da média aritmética entre os valores de PHFT da sala e dos dormitórios (PHFT_{APP}). O PHFT_{APP} é obtido pela razão entre as horas do ambiente ocupado dentro de uma faixa de temperatura operativa e o total de horas ocupadas no respectivo ambiente. Este indicador é calculado separadamente para cada APP da unidade habitacional.

$$\text{PHFT}_{\text{APP}} = \frac{\text{Nh}_{\text{FT}}}{\text{Nh}_{\text{ocup}}} \cdot 100 \quad \text{Equação (1)}$$

Onde,

PHFT_{APP} é o percentual de horas de ocupação do APP dentro da faixa de temperatura operativa [%];

Nh_{FT} é o número de horas em que o APP se encontra ocupado e com temperaturas operativas dentro da faixa de temperatura operativa;

Nh_{ocup} é o número de horas em que o APP é ocupado ao longo do ano.

$$\text{PHFT}_{\text{UH}} = \frac{\sum_{i=1}^n \text{PHFT}_{\text{APP},i}}{n} \quad \text{Equação (2)}$$

Onde,

$PHFT_{UH}$ é o percentual de horas de ocupação da unidade habitacional dentro da faixa de temperatura operativa [%];

n é o número de APP da unidade habitacional.

A carga térmica total da unidade habitacional ($CgTT_{UH}$) é obtida em função da soma entre a carga térmica de aquecimento e resfriamento de cada ambiente de permanência prolongada.

$$CgTT_{UH} = \sum_{i=1}^n CgTR_{APP,i} + \sum_{i=1}^n CgTA_{APP,i} \quad \text{Equação (3)}$$

Onde,

$CgTT_{UH}$ é a carga térmica total da unidade habitacional, em kWh/ano;

$CgTR_{APP}$ é a carga térmica de resfriamento do APP_i, em kWh/ano;

$CgTA_{APP}$ é a carga térmica de aquecimento do APP_i, em kWh/ano;

n é o número de APP da unidade habitacional.

Em termos gerais, para alcançar o nível mínimo de desempenho térmico, o indicador $PHFT_{UH}$ do modelo real deve ser superior a 90% do valor obtido no modelo de referência. Simultaneamente, a temperatura operativa máxima anual da unidade habitacional do modelo real deve ser igual ou inferior ao valor do modelo de referência, considerando uma tolerância normativa de 2°C para unidades habitacionais em contato com a cobertura e 1°C para outras situações, e a temperatura operativa mínima anual da unidade habitacional do modelo real deve ser igual ou superior ao valor do modelo de referência, considerando uma tolerância normativa de 1°C. Para alcançar o nível intermediário, a unidade habitacional avaliada deve apresentar percentuais de $PHFT_{UH}$ superiores aos do nível mínimo e, dependendo do valor de $PHFT_{UH,MREF}$, cargas térmicas menores ou iguais em comparação com o modelo de referência. No nível superior, a exigência de redução das cargas térmicas no modelo real em relação ao modelo de referência é ainda mais rigorosa.

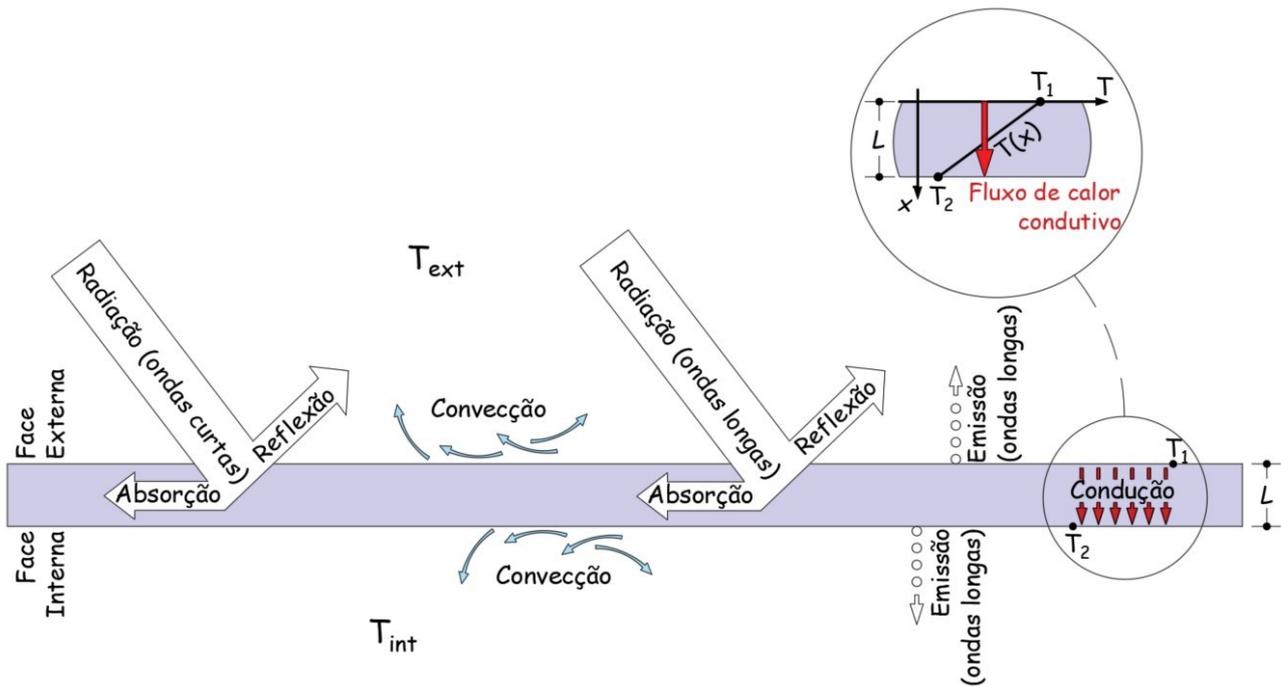
2.2 BALANÇO TÉRMICO DE SUPERFÍCIE

O balanço térmico é resultante da aplicação da primeira Lei da Termodinâmica que estabelece a conservação da energia total de um sistema. Dentre as aplicações do balanço térmico, enfatiza-se o balanço térmico de superfície, do qual possibilita identificar os ganhos e perdas de calor que ocorrem em uma determinada superfície. A Figura 4 ilustra a atuação dos mecanismos de transferência de calor em uma superfície de um meio. O balanço térmico de superfície permite a investigação da magnitude de cada mecanismo de transferência de calor, tal qual a parte ou variável de maior significância no sistema.

Essencial para análise do envelope construtivo, o balanço térmico de superfície viabiliza a compreensão dos processos físicos que abrangem a envoltória de edificações e mostra-se como estratégia indispensável para sondagem do comportamento termoenergético de edificações. Yıldız e Arsan (2011) afirmam que quantidades significativas de energia de aquecimento e resfriamento podem ser economizadas seguindo princípios básicos de transferência de calor. A partir desses conhecimentos, os projetistas podem tomar decisões mais assertivas na fase de concepção das edificações e, conseqüentemente, otimizar o desempenho das mesmas.

A imagem da Figura 4 ilustra um elemento de espessura L exposto ao meio externo com representação dos mecanismos de transferência de calor atuantes em suas faces. Este é um caso típico da transferência de calor ocorrida em coberturas.

Figura 4 - Esquema de balanço energético de superfície.



Fonte: autor (2024).

A radiação de ondas curtas é a designação da energia radiante que integra os comprimentos de ondas eletromagnéticas nas faixas de radiação ultravioleta (UV), visível (VIS) e infravermelho próximos (NIR). A radiação de ondas curtas constitui o espectro da radiação solar. Neste caso, em corpos opacos, ocorre que uma parcela da radiação de ondas curtas que irradia uma superfície é absorvida e a outra é refletida, estes fenômenos de superfície são conhecidos como absorptância solar (α) e refletância solar (ρ); também são adimensionais e um pode ser determinado a partir do outro, conforme exposto pela Equação (4).

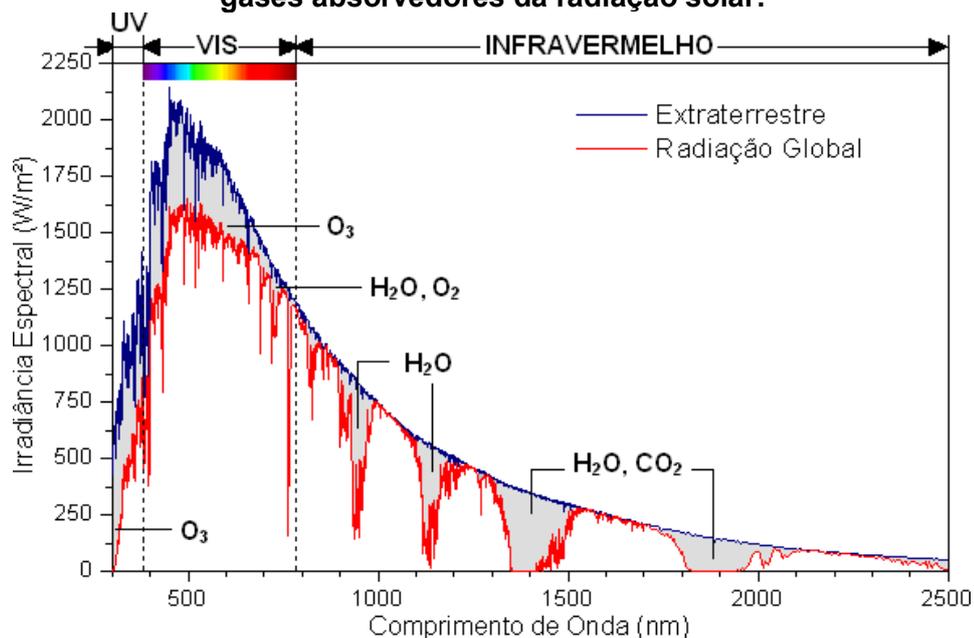
$$\alpha + \rho = 1$$

Equação (4)

A Figura 5 ilustra o espectro da radiação solar ao nível do mar (radiação global) e acima da atmosfera terrestre (extraterrestre), incluindo as três faixas de comprimento de onda (UV, VIS e NIR) com suas respectivas magnitudes. A radiação global é resultado da soma das parcelas de energia que atravessam a atmosfera terrestre, isto é, a radiação direta (que passa livremente pela atmosfera) e radiação difusa (dispersa pela atmosfera e refletida pelas nuvens). Os principais gases que absorvem a radiação solar extraterrestre são o vapor de água (H_2O), Oxigênio (O_2), ozônio (O_3) e gás carbônico (CO_2). Esses gases têm capacidades de absorção que

variam de acordo com o comprimento de onda da radiação solar incidente e da energia emitida pela superfície terrestre. A fração da radiação ultravioleta (UV) equivale a 3% do espectro solar; o espectro visível (VIS), por sua vez, corresponde a 45% de toda radiação solar, sendo responsável por toda luz provocada pelas ondas eletromagnéticas entre os comprimentos de onda de 380nm e 780nm que são capazes de estimular o sistema humano olho-cérebro; já a fração infravermelha (NIR) equivale a 52% e se manifesta apenas como calor. A terminologia utilizada para exprimir a quantidade de energia para cada comprimento de onda é denominada de irradiância. Por meio da integração entre cada comprimento de onda presente no espectro solar (radiação global), determina-se a irradiância total (1.380 W/m^2) incidente na superfície terrestre ao nível médio do mar.

Figura 5 – Espectro da radiação global e extraterrestre com inclusão dos principais gases absorvedores da radiação solar.



Fonte: Duffie e Beckman (1984 apud Dornelles, 2008, f. 30).

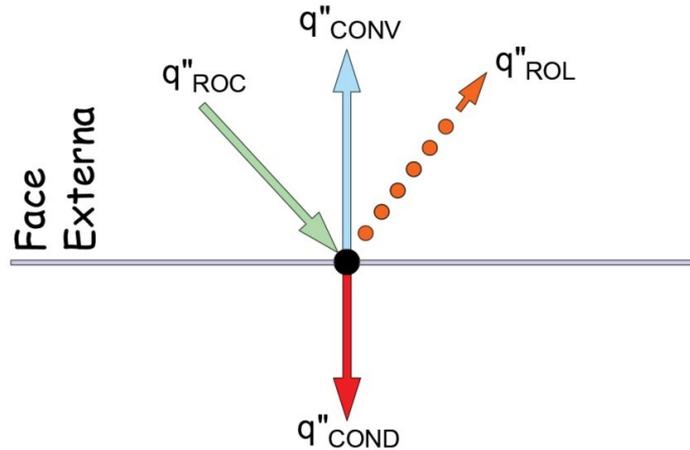
Por outro lado, a radiação de ondas longas especifica a emissão de energia de um corpo para o meio, cujos comprimentos de onda são maiores que os da radiação solar global; essa energia radiante está diretamente ligada à temperatura que o corpo emissor se encontra e que, por sua vez, também pode receber energia radiante de ondas longas proveniente de outros corpos. O modelo físico que representa o balanço de energia por ondas longas de uma superfície é baseado na lei de Stefan-Boltzmann cujas variáveis necessárias são a emitância térmica que determina o poder de emissão da energia radiante na superfície estudada e

temperatura superficial do elemento analisado. Vale acentuar que a emitância é um número adimensional, partindo de 0 a 1, e está relacionada à capacidade de resfriamento de uma superfície.

A convecção atuante nas faces do elemento se trata da transferência de calor entre um fluido em movimento e uma superfície, onde ambos se encontram em diferentes temperaturas. Finalizando as trocas de superfície, existe a transferência de calor por condução que é regida pela Lei de Fourier. O fluxo de calor condutivo tem sentido baseado na segunda Lei da Termodinâmica, ou seja, o fluxo parte da superfície de maior temperatura para a de menor temperatura.

Dessa forma, as energias resultantes na face externa do elemento analisado nesta seção podem ser esquematizadas pela Figura 6 e o balanço térmico da superfície será obtido a partir da Equação (5), onde somam-se todas as taxas de transferência de calor na superfície e iguala-se a zero. A primeira expressão é correspondente à parcela da energia radiante decorrente de ondas curtas (q''_{ROC}) e parcelas provenientes das transferências de calor por condução (q''_{COND}), convecção (q''_{CONV}) e radiação de ondas longas (q''_{ROL}).

Figura 6 – Balanço de térmico na face externa do elemento.



Fonte: autor (2024).

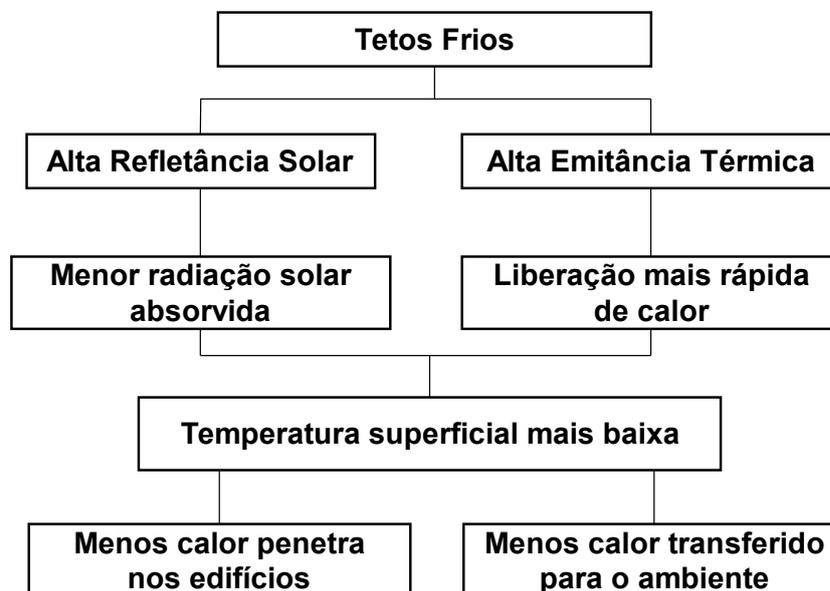
$$q''_{ROC} - q''_{COND} - q''_{CONV} - q''_{ROL} = 0 \quad \text{Equação (5)}$$

Diante do exposto, o escopo deste trabalho se limita à análise da interferência entre os fatores de absorvância solar, refletância solar, emitância térmica e isolamento (resistência térmica) de coberturas em condições iguais de exposição à radiação solar, buscando investigar as contribuições no desempenho térmico e energético de edificações.

2.3 TETOS FRIOS

Os tetos frios ou telhados frios consistem em superfícies com revestimentos ou películas com altas refletâncias solares e emitâncias térmicas, tendo como impacto a redução da temperatura superficial externa de tal maneira que permaneça igual ou próxima à temperatura ambiente sob condições de exposição solar. Portanto, o que governa a temperatura superficial de um telhado frio é, majoritariamente, a temperatura do ar externo. Os tetos frios podem contribuir com a redução da carga térmica de resfriamento de edificações, sobretudo, nos períodos de verão, entretanto, em regiões de climas frios, a utilização de tetos frios pode gerar penalidades aumentando as cargas térmicas de aquecimento. Um fator associado aos tetos frios se deve à característica de que a alta reflexão à radiação solar provoca liberação de menores quantidades de calor sensível ao meio externo e sua aplicação em larga escala pode contribuir com a mitigação do efeito de ilha de calor urbano (ICU) e aquecimento global por meio da redução da forçante radiativa. A Figura 7 ilustra o fluxograma que sintetiza este processo (Testa; Krarti, 2017; Rawat; Singh, 2022).

Figura 7 - Características dos tetos frios.



Fonte: adaptado de Rawat e Singh (2022).

O método utilizado para quantificar as propriedades de um material frio é o índice SRI (Solar Reflectance Index) que representa a capacidade de uma superfície refletir à radiação solar e dissipar calor. O SRI é calculado em função da refletância solar e emitância térmica no infravermelho, ajustados com os coeficientes convectivos, conforme preconizado pela ASTM E1980, indicada na Equação (6) e na Equação (7). O SRI igual a zero significa um telhado preto limpo (com refletância solar de 0,05 e emitância térmica de 0,90) e igual a 100 para um telhado branco (com refletância solar de 0,80 e emitância térmica de 0,90). De acordo com a ASHRAE (2019), os tetos frios devem ter valores SRI iniciais que excedam 78.

$$\text{SRI} = 123,97 - 141,35x + 9,655x^2 \quad \text{Equação (6)}$$

$$x = \frac{(\alpha - 0,029\varepsilon) \cdot (8,797 + h_c)}{9,5205\varepsilon + h_c} \quad \text{Equação (7)}$$

Onde,

α é a absorptância à radiação solar;

h_c é o coeficiente convectivo, podendo ser estimado para 5, 12 e 30 W/m².K;

ε é a emitância térmica.

A Tabela 5 exibe uma lista de materiais com respectivos cálculos do SRI, dos quais apenas o EPDM branco, telha com revestimento branco e PVC branco atendem às exigências da ASHRAE para serem classificados como tetos frios.

Tabela 5 - Propriedades típicas do material de cobertura.

Produto	Refletância Solar	Emitância Térmica	SRI
Betume liso	0,06	0,86	-1
Telha Preta Genérica	0,05	0,91	1
Cinza EPDM	0,23	0,87	21
cascalho leve	0,34	0,90	37
EPDM Branco	0,69	0,87	84
Telha com Revestimento branco	0,71	0,91	87
PVC branco	0,83	0,92	104

Fonte: adaptado de Testa e Krarti (2017).

Segundo Akbari e Matthews (2012), devido aos avanços relativos tanto para redução de consumo energético de edificações quanto de benefícios ambientais, o uso dos tetos frios tem contemplado bastante incentivo e aceitação em diversos países de tal maneira que viabilizasse a incorporação de exigências de aplicações em edificações. Os tetos frios são compreendidos por diversos cientistas como uma resposta rápida às ameaças de mudanças climáticas. As políticas disponíveis de tetos frios são apresentadas como códigos de construção, programas de conscientização pública, descontos e incentivos fiscais. Nos EUA, existem vários padrões de eficiência energética de edifícios ativos como, por exemplo, a ASHRAE 90.1, ASHRAE 90.2, o Código Internacional de Conservação de Energia, o Título 24 da Califórnia, código de conservação de energia de Chicago, código da Flórida etc. que adotam créditos, incentivos ou possuem requisitos (obrigatórios ou informativos) de refletância solar mínima e emitância térmica para edificações. Além disso, os métodos utilizados para desenvolvimento da ASHRAE e Título 24 da Califórnia são reproduzíveis para padrões de eficiência energética de edificações em todo o mundo.

Ainda conforme Akbari e Matthews (2012), existem padrões de construção que incentivam implementação de tetos frios na China, Índia, alguns países europeus; o regulamento italiano, por sua vez, exige a utilização de revestimentos de refletância solar elevada tanto para coberturas de novas edificações quanto para edifícios sujeitos a requalificação energética.

No Brasil, os códigos de construções ou códigos de obras são de jurisdição municipal e, dentre suas preconizações, não tratam de exigências ou promoção de medidas de eficiência energética, por meio de características de sistemas construtivos, em edificações. No entanto, há a norma técnica NBR 15575 (ABNT, 2021) que trata de desempenho térmico de edificações (com atributos de eficiência energética) e, de acordo com o artigo 39 inciso VIII do Código de Defesa do Consumidor, o atendimento à esta norma torna-se obrigatório em todo o País. Todavia, não há padrões que requeiram a aplicação dos tetos frios no território brasileiro.

No que concerne aos benefícios acarretados pelo emprego dos tetos frios, Rawat e Singh (2022) realizaram uma vasta revisão de literatura envolvendo diversas regiões e climas enquadrando, principalmente, as garantias provocadas pela aplicação dos tetos frios na redução de temperatura superficial e economia energética, conforme demonstrado pela Tabela 6.

Tabela 6 - Estudos de diferentes tipos de telhados frios analisados (continua).

Localização e Clima	Detalhes	Refletância/ Albedo	Redução na temperatura de superfície (°C)	Economia de energia (%)	Referência
Califórnia, EUA, Temperado	Análise do impacto do telhado frio em edifícios da Califórnia em diferentes zonas climáticas	0,63-0,83	-	22,0-54,0	Akbari, Levinson e Rainer (2005)
Londres, Reino Unido, Temperado	Análise do impacto da aplicação de uma tinta reflexiva (telhado frio) em um telhado plano de edifícios com ventilação natural e utilização do software TRNSYS para modelagem do edifício com variação da refletância, isolamento do telhado e taxa de ventilação	0,60-0,70	2,5	8,5	Kolokotroni, Gowreesunker e Girdharan (2013)
La Rochelle, França, quente e temperado	Um estudo de caso genérico realizado para avaliar demanda de energia e nível de conforto por meio de uma combinação de técnicas de telhados eficientes (clarabóias e telhado frio) juntamente com alta inércia térmica do edifício	0,90	-	30,0	Lapisa <i>et al.</i> (2013)
Catânia, Itália, quente e temperado	Simulação dinâmica para um telhado de edifício de escritórios existente após com aplicação de tinta comercial fria, idealizada para melhorar o conforto térmico no período de verão	0,85	-	15,0-44,0	Costanzo, Evola e Marletta (2013)
Perúgia, Itália, quente e temperado	Solução inovadora de telhado frio que consistia em um protótipo de telha de argila fria aplicada em um edifício residencial tradicional	-	4,7	24,3	Pisello e Cotana (2014)
Singapura, Tropical	Modelo de transferência de calor em telhado frio (CRHT) usando o método de aproximação espectral desenvolvido e verificado em experimentos realizados em apartamentos com coberturas de concreto	0,74	5,4	54,0	Zingre <i>et al.</i> (2015a)
Singapura, Tropical	Um novo modelo de transferência de calor de telhado frio (CRHT) proposto para telhado de revestimento duplo combinado com telhado frio e validado com resultados experimentais de apartamentos naturalmente ventilados	-	2,4	51,0	Zingre <i>et al.</i> (2015b)

Fonte: adaptado de Rawat e Singh (2022).

Tabela 6 (continua).

Localização e Clima	Detalhes	Refletância/ Albedo	Redução na temperatura de superfície (°C)	Economia de energia (%)	Referência
Singapura, Tropical	Três técnicas de resfriamento passivo, incluindo telhado frio, telhado verde e isolamento térmico, examinadas usando simulação para um edifício de um andar com telhado plano de concreto de 100 mm de espessura	0,74	-	21,0-41,0	Zingre, Yang e Wan (2015)
Atenas, Grécia, Composto	Aplicação de telhado frio em um prédio de escola pública (prédio piloto) investigado com prédio escolar vizinho de mesma arquitetura (prédio de referência) para fins de comparação	-	1,3-2,3	30,0	Androutsopoulos, Stavrakakis e Damasiotis (2017)
Singapura, Tropical	O software EnergyPlus foi usado para a simulação com o objetivo de avaliar o efeito da ilha de calor urbano (ICU) e a dinâmica dos fluxos de calor diurnos em telhados frios e verdes	0,90	-	37,0	Yew <i>et al.</i> (2017)
Hyderabad, Índia, Semiárido Quente	Um método analítico baseado em campo usado para investigar estratégias para mitigar o efeito de ilha de calor urbano e medir a economia de energia da instalação de telhados frios em edifícios comerciais	0,70	-	14,0-26,0	Xu <i>et al.</i> (2012)
Hyderabad, Índia, Semiárido Quente	Monitoramento detalhado de projetos de telhados frios em edifícios comerciais de Hyderabad, Índia	0,70	2,0	26,0	Akbari <i>et al.</i> (2011)
Phoenix e Tucson, EUA, Quente desértico	Um estudo experimental realizado a partir de diferentes taxas de refletâncias de telhados frios e implantação solar fotovoltaica de telhado para condição de céu claro de período de calor extremo de 10 dias	-	0,8	14,0	Salamanca <i>et al.</i> (2016)
Iraklion, Creta, Grécia, Composto	Análise e monitoramento de prédio laboratorial quanto ao desempenho energético e ambiente interno antes e depois da implementação da tecnologia de telhado frio	0,89	-	19,8	Kolokotsa <i>et al.</i> (2012)

Fonte: adaptado de Rawat e Singh (2022).

Tabela 6 (conclusão).

Localização e Clima	Detalhes	Refletância/ Albedo	Redução na temperatura de superfície (°C)	Economia de energia (%)	Referência
Trapani, Sicília, Itália, Composto	Estudou-se o impacto da tecnologia de telhado frio em um telhado de 700m ² de prédio escolar em Trapani, Sicília. O experimento foi realizado em duas fases: antes e depois da aplicação da tinta branca ecológica fria com maior refletância e emitância térmica.	-	2,3	54,0	Romeo e Zinzi (2013)
Nova Delhi, Índia, Composto	Desenvolvimento de uma calculadora simples de telhado frio para auxiliar usuários na determinação dos benefícios gerados por telhados de alta refletância	0,80	3,9	8,4	Garg <i>et al.</i> (2016)
Roma, Itália, Composto	Aplicação de telhado frio em edifícios industriais no verão	0,75	-	34,0-47,0	Pisello, Santamouris e Cotana (2013)

Fonte: adaptado de Rawat e Singh (2022).

A seguir, expõe-se, com maior detalhamento, artigos encontrados na literatura que relacionam a utilização de tetos frios em edificações, por diferentes métodos de análise, com redução de consumo energético, atenuação dos efeitos causadores de ilha de calor urbano, redução nas emissões de CO₂, mitigação da forçante radiativa e comparações com outros tipos de soluções de coberturas.

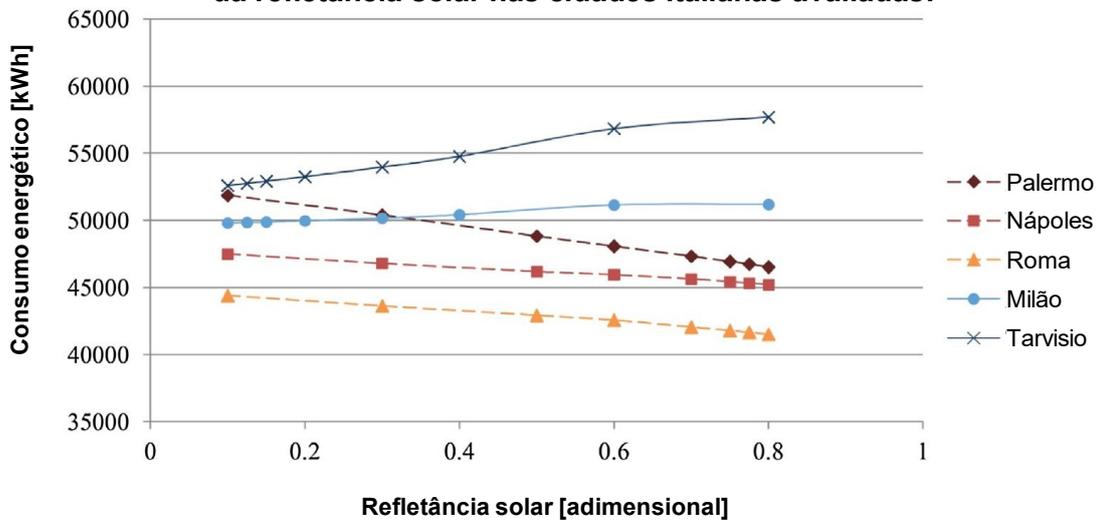
Stavrakakis, Androutsopoulos e Vyörykkä (2016) avaliaram os impactos ocasionados no desempenho térmico e energético de tetos frios aplicados em um edifício escolar localizado em Atenas na Grécia. O método utilizado para este trabalho foi realizado em virtude de medições *in loco* e simulações computacionais dinâmicas envolvendo todo o edifício. Nas simulações computacionais, também foi considerado o efeito de degradação ocorrido em razão da exposição dos telhados ao meio externo. Os resultados encontrados, a partir de calibração efetuada na simulação com dados de medições, apontaram compatibilidade entre os dados medidos e simulados, concluindo, portanto, que a aplicação de tetos frios no estudo realizado pode contribuir na redução de, pelo menos, 18% e 25% no consumo energético para resfriamento e ventilação, respectivamente, e melhoria do conforto térmico em 35%. No entanto,

também se verificou a penalidade de 12% de energia por aquecimento durante os períodos de inverno.

O trabalho de Lucero-Álvarez, Rodríguez-Muñoz e Martín-Domínguez (2016) procurou encontrar as combinações de métodos mais eficientes em termos de energia para os vários climas do México, baseando-se em análises comparativas em residências unifamiliares de baixa renda no país. Estas combinações envolveram diferentes arranjos de isolamentos nas propriedades térmicas de paredes e coberturas associadas, também, à variação da refletância solar das faces externas. Para isso, foi utilizado o software computacional de simulação termoenergética TRNSYS cujo padrão de simulação esteve de acordo com o regimento mexicano. Deste modo, os autores concluíram que o isolamento do telhado e paredes é mais eficaz em cidades com invernos frios; isolar apenas o telhado é melhor para climas temperados e paredes isolantes combinadas com telhados de alta refletância solar são mais eficazes em cidades com clima quente durante todo o ano. Nesse aspecto, Zingre *et al.* (2015b) afirmam que o aumento da resistência térmica no telhado proporciona um bom isolamento térmico contra o ganho de calor diurno, porém dificulta a perda de calor durante a noite. Esse tipo de telhado pode representar uma penalização energética para o resfriamento noturno em regiões de climas quentes, enquanto pode ser benéfico em regiões de climas frios.

Piselli *et al.* (2017) avaliaram o desempenho energético de soluções de coberturas com alta refletância solar em diferentes zonas climáticas Italianas. Na realização do trabalho, foram utilizadas três tipologias de edificações baseadas em arquétipos da ASHRAE, isto é, edifícios de escritórios, casa unifamiliar e edificação residencial de altura média. O software computacional EnergyPlus intermediou todo o estudo; os padrões construtivos seguiram preconização do regulamento italiano para cada região e, para avaliar a influência da tipologia do sistema de AVAC, todos os modelos foram simulados com configuração de cargas ideais para o AVAC. Nas tipologias de escritórios e edifícios residenciais de altura média, apenas o último andar de cada edificação foi considerada nas análises. Os resultados mostraram que a refletância solar ótima varia a partir da condição climática local e indicou maiores taxas de refletâncias em regiões com climas predominantemente quentes (Palermo, Nápoles e Roma) enquanto regiões de climas frios (Milão e Tarvisio) tiveram reduções de carga térmica ao diminuir a refletância solar das coberturas, de acordo com a Figura 8.

Figura 8 – Consumo total de energia AVAC para o edifício de escritórios com variação da refletância solar nas cidades italianas avaliadas.



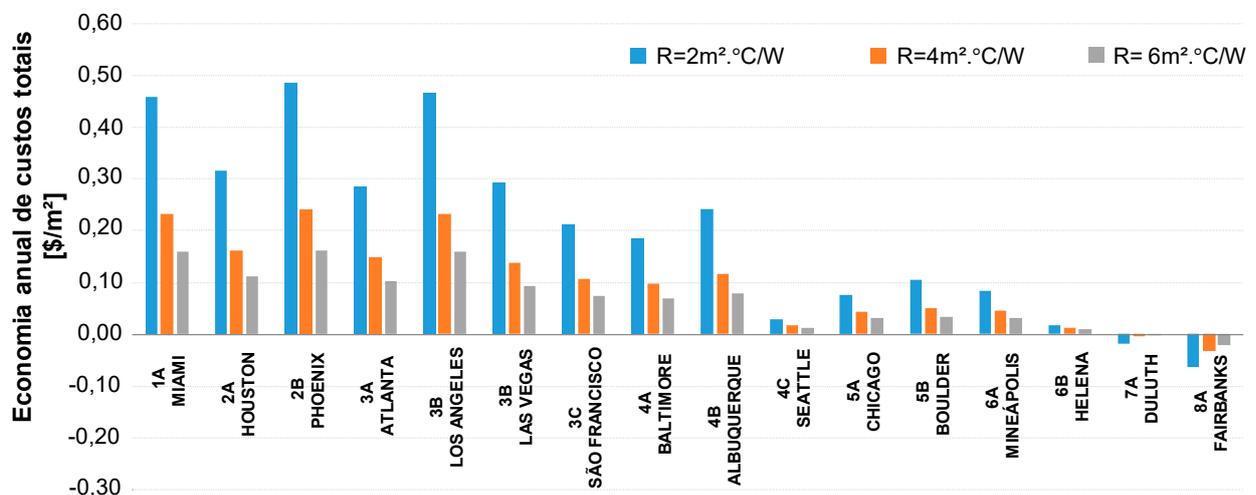
Fonte: adaptado de Piselli *et al.* (2017).

A pesquisa de Seifhashemi *et al.* (2018) investigou o potencial da aplicação de tetos frios na eficiência energética de edifícios de varejo do tipo armazém, de apenas um pavimento, localizado no sudeste subtropical de Queensland, Austrália. O método baseou-se em comparações de resultados obtidos em procedimentos experimentais e de simulação computacional no edifício estudado. As refletâncias solares adotadas para este estudo foram estimadas em 0,200 e 0,875 para, respectivamente, antes e depois da aplicação do teto frio sobre a cobertura do empreendimento. Os resultados encontrados apresentaram boa proximidade acerca das temperaturas superficiais do telhado entre o experimento de ensaio e modelo computacional simulado, evidenciando variações em torno de 10%, que se encontra dentro dos limites aceitáveis vistos na literatura (entre 5% e 15%), e redução da carga térmica de resfriamento em 13%. Nesse estudo, não houve penalidade de carga térmica de aquecimento nos meses mais frios. Os autores concluíram que a aplicação da tecnologia em edifícios australianos do tipo armazém tem o potencial de reduzir, em ambientes tropicais, a carga térmica de resfriamento entre 6,5 e 8,4kWh/ano.m² e atenuar as emissões de CO₂ entre 1530 e 2680kg/ano por edifício do tipo armazém.

Tzempelikos e Lee (2021) investigaram o impacto combinado da refletância solar de telhados, nível de isolamento e método de fixação na demanda anual energética e nos custos de energia para diferentes edifícios, sob diversas condições climáticas, localizados nos EUA. A avaliação foi realizada por simulação computacional, utilizando o software EnergyPlus e foram testadas três refletâncias

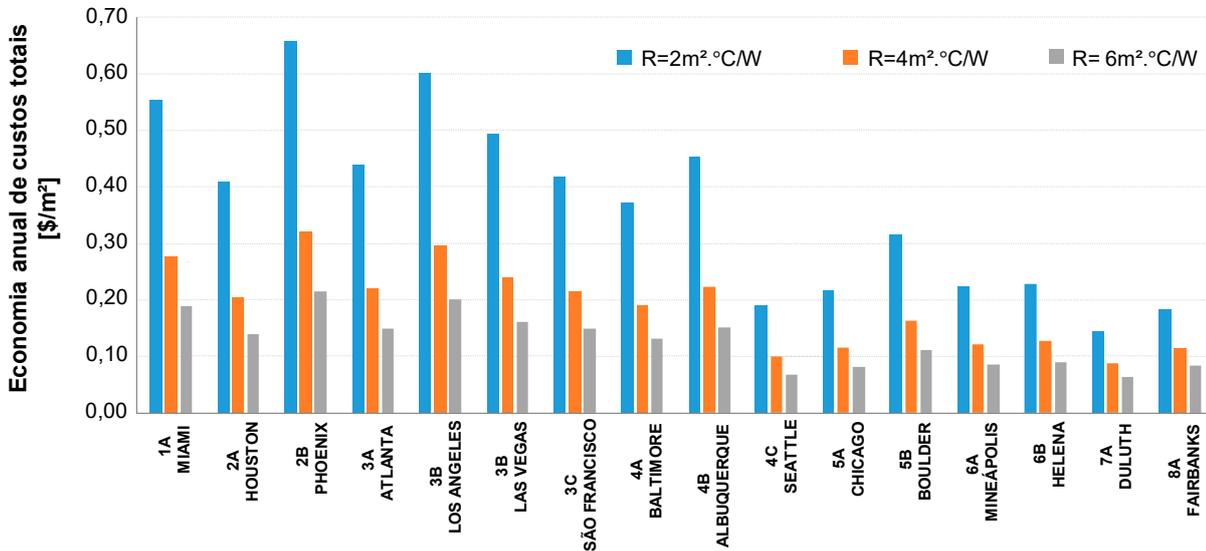
solares no telhado: 6%, 50% e 70% e cinco níveis de isolamentos, que variaram entre 2 e 6,13m².°C/W. Acerca do sistema AVAC, o COP (coeficiente de performance) de resfriamento foi igual a 3,5 enquanto que se considerou 0,85 como eficiência do sistema de aquecimento. Foram avaliadas três tipologias de edificações: edifício varejo, edifício de escritório e edificação escolar. Os resultados apontaram que o efeito da refletância solar é maior em regiões de climas quentes, confirmando o visto nos trabalhos de Lucero-Álvarez, Rodríguez-Muñoz e Martín-Domínguez (2016) e Piselli *et al.* (2017), além do que quanto maior o isolamento do telhado menor será o impacto gerado pela refletância do mesmo. Também foi verificado que, dependendo do padrão de uso e ocupação do empreendimento, pode não haver penalidades na carga térmica de aquecimento, como observado pela economia anual de custos de energia das zonas climáticas dos EUA, conforme ASHRAE 169 (ASHRAE, 2021), 7A e 8A para as tipologias de varejo e escritórios (Figura 9 e Figura 10), e contrapõe o exposto nos estudos de Stavrakakis, Androutsopoulos e Vyörykkä (2016). Os autores concluíram que diferentes tipos de edifícios têm diferentes perfis de carga térmica e, portanto, os efeitos de refletância solar e isolamento do telhado variam. Como esperado, as maiores economias obtidas foram observadas nas cidades de climas quentes. E apesar da degradação e envelhecimento do telhado (refletância solar de 50%), os telhados frios ainda favorecem uma economia significativa, comparados aos telhados pretos (6% de refletância solar), para as zonas climáticas 1-4 e inferiores para as zonas 5-6.

Figura 9 - Economia anual de custos de energia (por unidade de área de telhado) com um novo telhado refletivo (70% de refletância) versus um telhado preto (6% de refletância) para a loja de varejo com três níveis de isolamento de telhado em todos os 16 locais climáticos.



Fonte: adaptado de Tzempelikos e Lee (2021).

Figura 10 - Economia anual de custos de energia (por unidade de área de telhado) com um novo telhado refletivo (70% de refletância) versus um telhado preto (6% de refletância) para o prédio escolar com três níveis de isolamento de telhado em todos os 16 locais climáticos.



Fonte: adaptado de Tzempelikos e Lee (2021).

No trabalho de Sproul *et al.* (2014), é apresentada uma diretriz de escolha de tipos de telhados a partir dos impactos ambientais e de redução de carga térmica. Os autores investigaram, por meio de comparações pautadas em análises de custos de ciclo de vida (LCCA), a viabilidade de implantação de telhados brancos, verdes e pretos no estado americano. À face do exposto, os autores concluíram que a escolha do tipo de telhado deverá se basear nas preferências do usuário: economia de energia ou atenuação de impactos ambientais. Em climas quentes, os telhados brancos apresentam-se como melhor solução frente à redução de carga térmica enquanto os telhados verdes representam os melhores índices em regiões de climas frios (comparados aos telhados brancos que apresentaram penalidades de aquecimento durante o período de inverno), pois aumentam o fator de isolamento e dificultam a fuga de calor pela cobertura. Em todos os casos, os telhados verdes superam os custos provenientes da implementação e manutenção dos telhados brancos. Também afirmam que usuários preocupados com impactos ambientais deverão optar pelos telhados frios se preocupados com o aquecimento global, pois são cerca de três vezes mais eficazes do que os telhados verdes; usuários preocupados com benefícios ambientais locais como, por exemplo, ocorrências de ilha de calor urbano e enchentes, devem preferir pelos telhados verdes.

Contudo, observa-se que o posicionamento obtido dos autores é divergente, no que concerne à melhor solução para combate ao efeito de ilha de calor urbano, do trabalho de Costanzo, Evola e Marletta (2016). Estes, por sua vez, realizaram uma comparação entre tetos frios e verdes para três cidades italianas: Catânia, Roma e Milão – ambas representativas de diferentes condições climáticas. O método utilizado embasou-se em simulações dinâmicas em um edifício de escritório, por meio do EnergyPlus, obtendo dados de fluxo de calor, necessidades de energia primária e temperaturas externas do telhado para cinco cenários: o cenário existente, telhado verde com (GR_1) e sem irrigação (GR_2); e teto frio com refletância solar de 0,65 (CR_1) e 0,80 (CR_2). As transmitâncias térmicas, para as diferentes cidades avaliadas, foram consideradas de acordo com a Tabela 7.

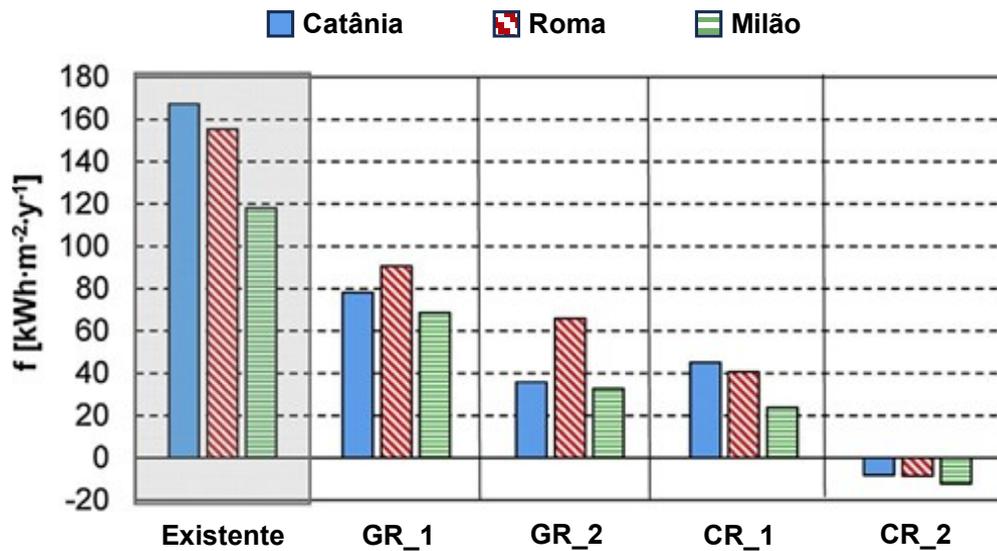
Tabela 7 – Valores de transmitância térmica [W/m².K] para os elementos de paredes e coberturas.

	Existente	Catânia	Roma	Milão
Paredes	0,80	0,47	0,39	0,33
Cobertura	0,70	0,36	0,36	0,29

Fonte: adaptado de Costanzo, Evola e Marletta (2016).

Diante dos resultados encontrados, os autores chegaram à conclusão de que o teto frio é a solução mais adequada para diminuir a temperatura da superfície externa de telhados, sendo também a melhor opção frente ao embate ao efeito de ilha de calor urbano. Isso se deve à comparação realizada entre os tipos de telhados estudados (Figura 11), na qual o fluxo de calor trocado entre o telhado e o ar externo durante a temporada de verão, para cada cidade, foi reduzido entre 42% e 75% ao se utilizar telhados verdes, ao passo que obteve-se uma redução de cerca de 75% ao empregar teto frio com uma refletância solar de 0,65 e fluxos negativos, indicando fluxos convectivos do ar em direção ao telhado quando este possui refletância solar de 0,80. Contudo, os autores apontam que os telhados verdes se comportam como prioridade se optados com o objetivo de redução de carga térmica, especialmente para climas caracterizados por invernos frios. A razão para isso é que os tetos frios tendem a incrementar o consumo de energia devido as penalidades associadas ao consumo de aquecimento durante a estação de inverno.

Figura 11 – Fluxo de calor liberado do telhado para o ar externo no verão.



Fonte: adaptado de Costanzo, Evola e Marletta (2016).

Silva, Marinoski e Guths (2020a) realizaram uma análise termoenergética e econômica de telhados cerâmicos com alta refletância solar em uma habitação unifamiliar na cidade do Rio de Janeiro, Brasil. A metodologia empregada para desenvolvimento do trabalho baseou-se na seleção de dois tipos de telhas cerâmicas, sendo uma de acabamento natural e outra de cor branca (de alta refletância solar), e medição das propriedades de emitância térmica e refletância solar dos materiais utilizados. Em seguida, realizou-se simulação computacional por meio do software EnergyPlus cujas variáveis de saída foram operadas na análise econômica. Os resultados apresentaram que o uso do teto frio (telha cerâmica de coloração branca) impactou na redução de 55% da transferência de calor ocorrida na cobertura da edificação e a avaliação econômica indicou retorno do investimento em 12 anos e 5 meses. Em trabalho complementar a este, fundamentado no mesmo método de pesquisa, Silva, Marinoski e Guths (2020b) efetuaram uma análise termoenergética e econômica de telhados de fibrocimento submetidos a dois tipos de cores: acabamento natural e de cor branca. Os resultados apontaram a redução de 60% na transferência de calor ocorrida na cobertura por condução do telhado de fibrocimento com alta refletância (telha de coloração branca) enquanto a análise econômica determinou um período de retorno financeiro em 4 anos e 3 meses.

Além dos ganhos associados à otimização do ambiente térmico e à redução do consumo energético provenientes dos tetos frios, é pertinente reforçar a conexão dos tetos frios com a diminuição nas emissões de CO₂, contribuindo, desse modo, para a mitigação de mudanças climáticas. Nesta perspectiva, o trabalho de Kolokotroni *et al.* (2018) elaborou modelos computacionais de residência unifamiliar característica de baixa renda localizada nas cidades de Kingston (Jamaica), Recife (Brasil) e Acra (Gana). Ambas as cidades são oriundas de climas quentes, reconhecidos por altas temperaturas do ar e intensa radiação solar durante todo o ano. Buscou-se investigar a otimização termoenergética dessas residências após aplicação de tinta fria (com refletância solar de 0,82) sobre um telhado convencional (com refletância solar estimada em 0,15). As simulações previram uma redução média mensal de 0,6 a 1,6°C na temperatura do ar interna, acompanhada por uma redução na demanda de carga de resfriamento de aproximadamente 180kWh/m².ano para as três cidades. Estas simulações foram baseadas em um setpoint de 24°C ao longo das 24 horas do dia. Assumindo um COP de resfriamento igual a 3,0, a implementação dos telhados frios reverberou em reduções nas emissões de CO₂. Com base nos fatores de emissão de CO₂ para geração de energia elétrica de cada país (Brander *et al.*, 2011), observou-se reduções nas emissões de CO₂ de 50, 13,5 e 6kgCO₂/m².ano nas cidades de Kingston (Jamaica), Acra (Gana) e Recife (Brasil), respectivamente. Kingston (Jamaica) destacou-se com a maior magnitude, atribuída ao uso predominante de petróleo como principal fonte de energia para geração elétrica na Jamaica. Entretanto, Recife (Brasil) apresentou menor emissão e reflete a expressiva contribuição de fontes de energia renováveis (matriz energética limpa), como, por exemplo, usinas hidrelétricas, na geração de energia elétrica no Brasil.

O artigo de Boixo *et al.* (2012) estudou o efeito da implementação, em grande escala, de tetos frios em edifícios residenciais na Andaluzia visando economia energética e redução nas emissões de CO₂. Para tal fim, foi utilizada a ferramenta DOE Cool Roof Calculator (DCDR) para estimativa do consumo energético. As economias energéticas foram estimadas em função da idade dos edifícios e da energia utilizada. Diante disso, três tipos de telhados foram avaliados: brancos ou claros, médios e escuros, com refletância solar de 60%, 25% e 5%, respectivamente. A Resistência Térmica (m².K/W) variou conforme as idades dos edifícios, de acordo com a regulamentação aplicável durante a fase de construção, para cada zona climática da província com valores baseados antes e depois de 2007. Para

extrapolação dos resultados, foram estimadas as áreas de telhados em Andaluzia cujos valores presumidos foram de, aproximadamente, 266 km², dos quais a parcela de telhados planos é de 105km² e de telhados inclinados é de 161km². À vista disso, os resultados indicaram que o potencial de economia de energia seria de 295.000kWh/ano (apenas para edificações residenciais de telhados planos) e que, conseqüentemente, a emissão evitada a cada ano seria de 136.000 toneladas de CO₂. Se considerados os efeitos do forçamento radiativo, poderiam ser evitados entre 9,44Mt e 12Mt de CO₂. Assim sendo, os autores afirmam que, além dos benefícios econômicos no que diz respeito à redução de carga térmica, os tetos frios também proporcionam melhores condições de conforto e influenciam na melhoria climática local.

2.4 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Este capítulo abordou os fundamentos que sucedem os mecanismos de transferência de calor em superfícies com destaque para o efeito ocorrido em coberturas de edificações, bem como apresentação de evidências que permitem observar a relevância da adoção de tetos frios em coberturas que, embora se revelarem como solução de baixo custo de implementação e manutenção, otimizam as condições de conforto, desempenho térmico e redução de carga térmica. Deve-se também levar em conta que as economias e performances são limitadas às unidades com exposição de cobertura, variando de acordo com a condição climática local.

A revisão de literatura ratifica a relevância dos fatores de isolamento do telhado, emitância térmica e refletância solar na influência do desempenho termoenergético de edificações. O aumento da resistência térmica em telhados proporciona bom isolamento contra o ganho de calor diurno, mas dificulta a perda de calor à noite, sendo penalizantes para o resfriamento noturno em climas quentes e benéficos em climas frios. Por conseguinte, verificou-se que a descrição representativa do cronograma de uso e ocupação é fundamental para definir uma diretriz econômica, sob o ponto de vista energético, e que as economias energéticas dependem fortemente do comportamento do usuário. Ademais, a degradação dos materiais é uma característica importante a ser estudada e considerada nos modelos avaliados (Zingre *et al.*, 2015b; Lucero-Álvarez; Rodríguez-Muñoz; Martín-Domínguez, 2016; Tzempelikos; Lee, 2021).

Salienta-se a observância de que, nas regiões de climas frios, é provável que o uso de tetos frios acarrete penalidades de aquecimento – que podem ser compensadas em alguns casos: sob circunstâncias de padrão de uso e ocupação da edificação; quando a redução de carga térmica de refrigeração supre a penalidade ocasionada pelo aquecimento etc. (Piselli *et al.*, 2017; Seifhashemi *et al.*, 2018).

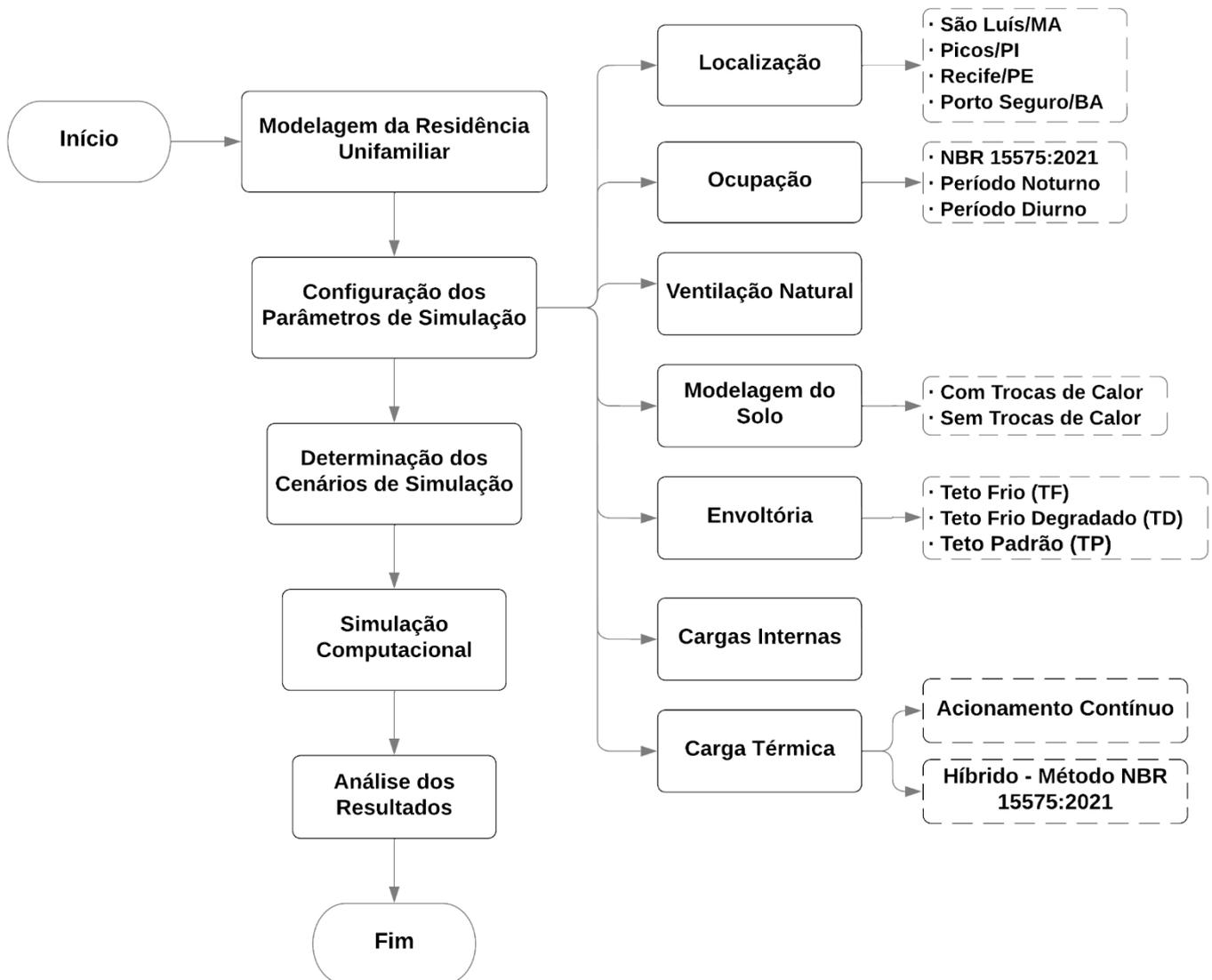
Na esfera ambiental, sintetiza-se que os tetos frios demonstram ser estratégias eficazes contra as ocorrências de ilha de calor urbano e mudanças climáticas, visto que, além de atenuarem a emissão radiativa por ondas longas, têm contribuições relevantes na redução de emissão de CO₂ e da forçante radiativa. (Boixo *et al.*, 2012; Sproul *et al.*, 2014; Costanzo; Evola; Marletta, 2016; Seifhashemi *et al.*, 2018).

Os estudos disponíveis na literatura reconhecem os tetos frios como solução em coberturas para diversos contextos climáticos. No entanto, há uma escassez de trabalhos conduzidos na região nordeste do Brasil. O presente trabalho visa contribuir para a implementação de tetos frios nessa região, a qual se caracteriza por ser de climas predominantemente quentes, com dados de simulação específicos da região nordeste em uma edificação residencial unifamiliar típica do País.

3 MÉTODO

Neste capítulo, são apresentados os procedimentos tomados para realização desta pesquisa que está dividida em cinco etapas principais: definição do modelo computacional, escolha de quatro cidades na região nordeste do Brasil, hipóteses de simulação e parâmetros de avaliação, simulação computacional por meio do software EnergyPlus e análise dos resultados obtidos através das simulações. A Figura 12 apresenta um fluxograma com a representação esquemática dos processos utilizados em toda a fase metodológica desta pesquisa.

Figura 12 – Fluxograma do Método.



Fonte: autor (2024).

3.1 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

A simulação computacional foi realizada por intermédio do EnergyPlus (versão 22.2.0) que é um programa de simulação termoenergética, desenvolvido pelo DOE (Department of Energy) dos EUA. Largamente utilizado em pesquisas brasileiras (Santos, 2018), o software computacional EnergyPlus possui certificação “ASHRAE Standard 140” para o cálculo de envoltórias. De acordo com New *et al.* (2016), o modelo de cálculo do EnergyPlus é adequado para análise de tetos frios.

O EnergyPlus permite realizar simulações que envolvam a interação da construção no ambiente do qual está inserido: interação solo-edificação, consideração de cargas internas tais como pessoas e seus respectivos valores energéticos de taxas metabólicas, iluminação e equipamentos, efeitos de ventilação natural, elementos de sombras, consideração de sistemas AVAC etc. O modelo de cálculo do software é baseado nos princípios fundamentais de balanço de massa e energia, possibilitando determinar o comportamento termoenergético de uma edificação, no clima inserido, e seus sistemas em regime transiente de forma integrada e simultânea, bem como reproduzir os efeitos de inércia térmica. (DOE, 2020; Tzempelikos; Lee, 2021).

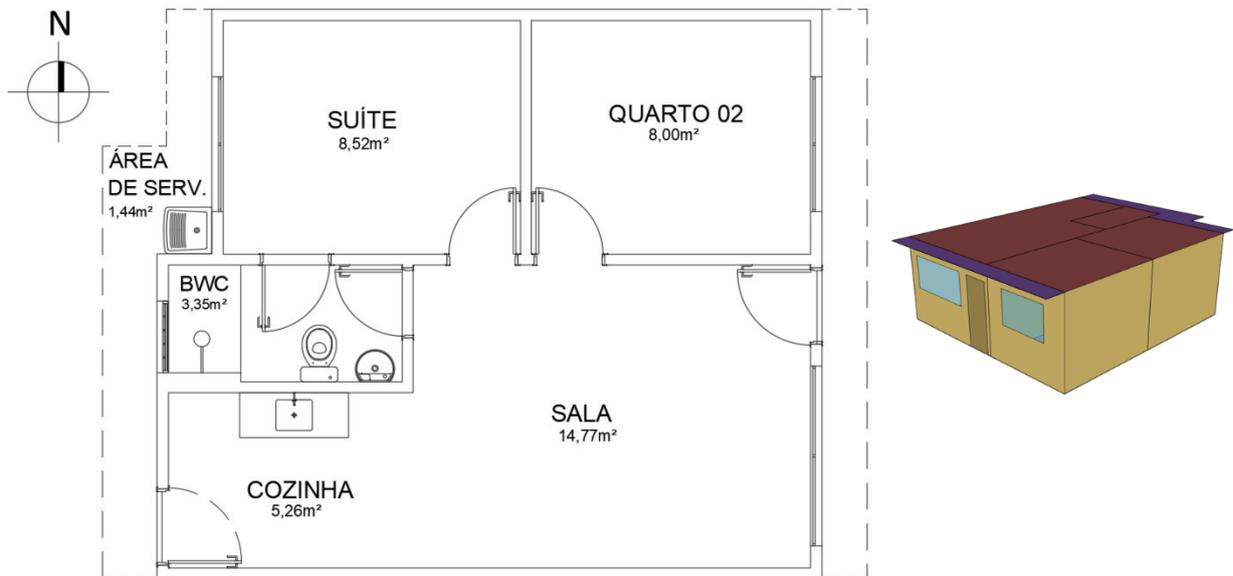
3.1.1 Aspectos da edificação e padrão de modelagem

O projeto empregado para realização deste trabalho integra o programa nacional de habitação de interesse social (Minha Casa, Minha Vida - MCMV), do qual trata-se de um conjunto residencial implantado no estado de Pernambuco e executado por construtora local.

A edificação escolhida é do tipo unifamiliar térrea (46,3m²), o modelo computacional foi concebido conforme o projeto arquitetônico, bem como norte geográfico correspondente, representado pela Figura 13. Desse modo, A edificação modelada contempla três ambientes de permanência prolongada (APP) que correspondem ao *Quarto 02*, *Suíte* e *Sala* (integrada com a cozinha), além de apenas o *BWC* como ambiente de permanência transitória (APT). O pé direito da residência é de 2,60m, com portas internas e externas de madeira de 0,80m de largura e 2,10m de altura. As janelas dos ambientes *Quarto 02*, *Suíte* e *Sala* são do tipo correr com duas folhas móveis e dimensões de 1,50m de largura por 1,00m de altura, para o *Quarto 02* e *Suíte*, e 2,00m de largura por 1,00m de altura na *Sala*; ambas as janelas dos APP têm peitoril de 1,10m. Em contrapartida, a janela do *BWC* é do tipo Maxim-ar,

possui peitoril de 1,50m e dimensão de 0,80m de largura por 0,50m de altura. O projeto também considera prolongamento do telhado (beiral) nas fachadas em que há janelas, com extensão de 0,50m no lado leste e 0,60m no lado oeste.

Figura 13 – Representação do projeto arquitetônico da unidade unifamiliar e modelagem.



Fonte: autor (2024).

A simulação computacional foi executada em quatro cidades do Nordeste brasileiro, das quais três são litorâneas e uma está localizada no interior, são elas: São Luís/MA, Picos/PI, Recife/PE e Porto Seguro/BA. Estas foram escolhidas em decorrência das coordenadas geográficas de latitude, com exceção de Picos/PI que foi adotada em razão de ser uma cidade localizada no interior da região nordestina (Figura 14). A região nordeste do Brasil é amplamente reconhecida pela característica climática quente, fato este que a literatura e normas técnicas como, por exemplo, a NBR 15220-3 (ABNT, 2005) recomenda adoções de materiais leves e refletivos na composição de paredes e coberturas de edificações enquadradas na zona bioclimática 08. Portanto, a investigação e avaliação detalhada dos efeitos do uso de tetos frios no contexto do nordeste brasileiro pode contribuir no embasamento para tomada de decisões com o fim de propor soluções termoenergéticas mais eficientes.

O padrão utilizado de arquivos climáticos segue preconização da NBR 15575-1-1 (ABNT, 2021), empregando, desse modo, dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) para os anos de 2001 a 2010, processados por Maurício Roriz.

Figura 14 – Mapa do Brasil com representação das cidades avaliadas.



Fonte: autor (2024).

A Tabela 8 apresenta os dados geográficos, assim como a classificação climática das cidades avaliadas neste trabalho, segundo os métodos de classificação da ASHRAE 169 (ASHRAE, 2021), da NBR 15220-3 (ABNT, 2005) e de Köppen-Geiger (Alvares *et al.*, 2013).

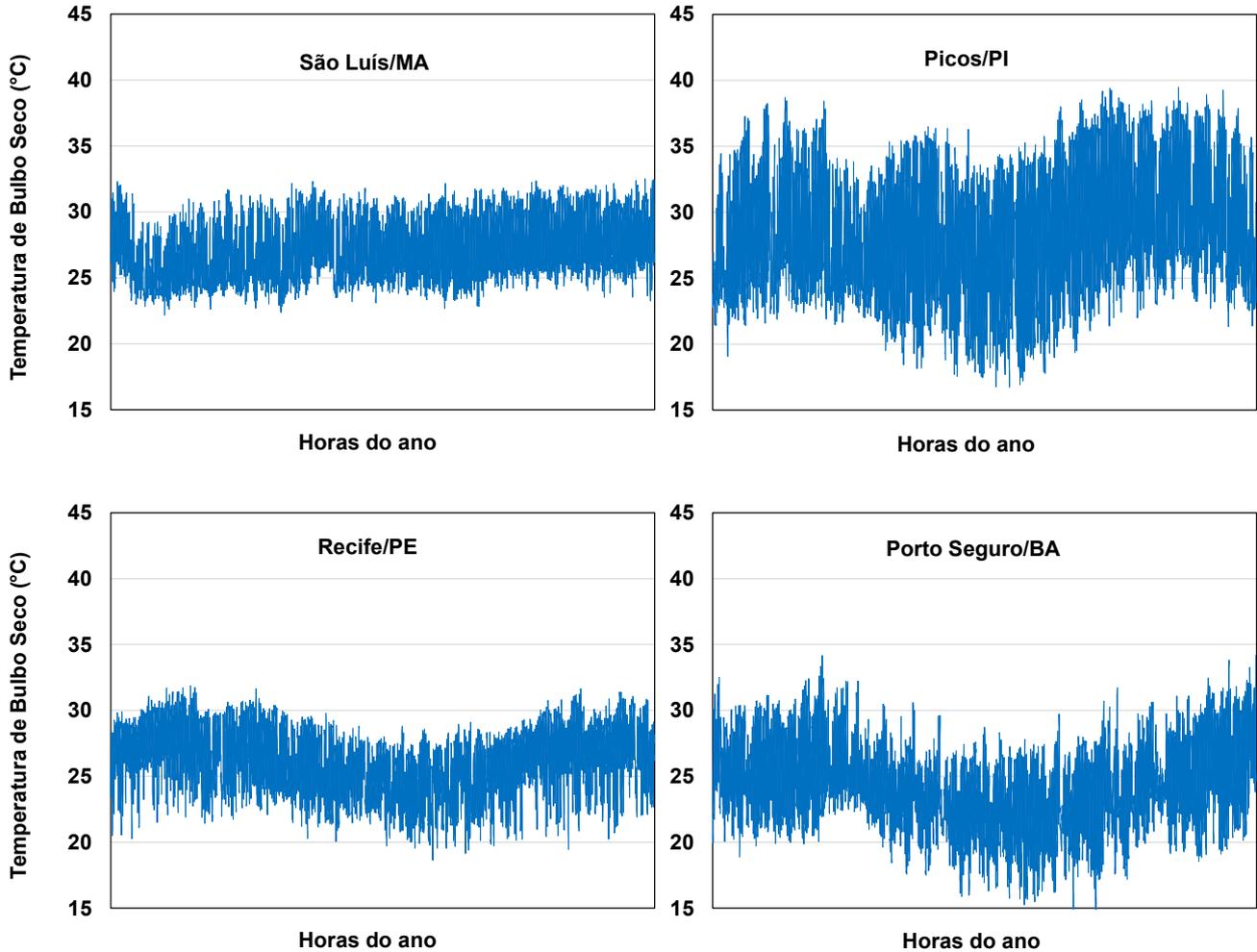
Tabela 8 – Dados e classificação climática das cidades avaliadas.

Cidade	Unidade Federativa	Latitude	Longitude	Altitude	ASHRAE 169	NBR 15220-3	Intervalos de temperaturas externas NBR 15575	Köppen-Geiger
São Luís	Maranhão	2,53 S	44,30 W	57,5 m	0A	ZB 8	Intervalo 2	Aw - Clima tropical de savana
Picos	Piauí	7,07 S	41,48 W	234,5 m	0B	ZB 7	Intervalo 3	BSh - Clima quente de estepe
Recife	Pernambuco	8,05 S	34,95 W	11,5 m	0A	ZB 8	Intervalo 2	Am - Clima tropical de monções
Porto Seguro	Bahia	16,44 S	39,08 W	51,2 m	1A	ZB 8	Intervalo 1	Af - Clima tropical de floresta

Fonte: autor (2024).

A Figura 15 apresenta o perfil anual das temperaturas de bulbo seco (em Celsius), obtidas através dos dados climáticos do INMET, para as cidades de São Luís/MA, Picos/PI, Recife/PE e Porto Seguro/BA.

Figura 15 - Dados anuais de temperatura de bulbo seco (INMET).



Fonte: autor (2024).

As configurações de modelagem assumidas como parâmetros de entrada no EnergyPlus estão em conformidade com o método computacional de avaliação de desempenho térmico de edificações residenciais, segundo a NBR 15575 (ABNT, 2021), devidamente elucidado no item 2.1.1. Dessa forma, o padrão de modelagem utilizado na composição dos sistemas construtivos, exceto o sistema de cobertura, admitiu os sistemas indicados no *modelo de referência (MREF)*¹, conforme Figura 1. Além disso, as cargas internas, padrões de uso e ocupação, condicionamento de ar e

¹ modelo de simulação computacional baseado no projeto do empreendimento residencial sob avaliação, submetido à padrões prescritos pela NBR 15575 (ABNT, 2021), e necessário para classificação do desempenho térmico de edificações residenciais.

disposições sobre ventilação natural também seguiram o método preconizado pela da NBR 15575-1 (ABNT, 2021).

A interação entre o solo e a edificação nas trocas de calor também fez parte dos parâmetros de entrada. Para isso, a modelagem do solo no EnergyPlus foi realizada utilizando o objeto *Site:GroundDomain:Slab* por meio do método *Finite Difference* (Xing, 2014). Este método emprega um modelo de transferência de calor de diferenças finitas, utilizando dados de arquivo climático como condições de contorno para simular as trocas de calor que ocorrem entre o solo e a edificação. Encerrando as hipóteses admitidas no padrão de modelagem, a Tabela 9 apresenta as propriedades térmicas das portas.

Tabela 9 – Propriedades térmicas das portas.

Material	Espessura m	Absortância solar	Transmitância Térmica W/m ² .K	Capacidade Térmica kJ/m ² .K
Madeira	0,03	0,50	2,70	44,8

Fonte: autor (2024).

3.1.2 Cenários alternativos no Padrão de Modelagem

Nesta seção, serão apresentados cenários com alterações implementadas no modelo padrão de modelagem. Essas alterações foram introduzidas com a finalidade de respaldar as análises que sustentarão as respostas aos objetivos do trabalho. Desta forma, serão abordadas as modificações efetuadas nos seguintes parâmetros de entrada: características da cobertura, arquivo climático, configuração do solo, uso e ocupação, cargas internas, ventilação natural e condicionamento de ar.

3.1.2.1 Cobertura

Convencionou-se seis cenários de análise no que tange ao sistema de cobertura, dos quais estão expostos na Tabela 11 e diferenciam-se, sobretudo, pela magnitude das propriedades de absortância solar, transmitância térmica e resistência térmica. As abreviaturas utilizadas para interpretação do sistema de cobertura avaliado retratam a especificação do tipo de telhado estudado, sendo teto frio (TF), teto frio degradado (TD) ou teto padrão (TP), acompanhando da resistência térmica (RT) e magnitude respectiva.

As considerações tomadas para a determinação da absorvância solar do teto frio degradado (TD) levaram em consideração os trabalhos conduzidos por Synnefa, Santamouris e Apostolakis (2007), Shirakawa *et al.* (2017) e a norma técnica NBR 15575-1 (ABNT, 2021). A NBR 15575-1 fornece uma equação para determinação da absorvância degradada ao longo de um período de três anos, no entanto, para os outros trabalhos mencionados, os valores das absorvâncias envelhecidas para o teto frio foram estimados por meio de equações de tendência linear geradas a partir dos dados de medição. A Tabela 10 apresenta os valores estimados para o teto frio degradado (TD) sendo possível observar que as absorvâncias solares estimadas, devido ao processamento dos trabalhos de Synnefa, Santamouris e Apostolakis (2007) e Shirakawa *et al.* (2017), apresentam o mesmo valor. Porém, é importante salientar que esses resultados idênticos ocorreram apesar de os estudos serem provenientes de fontes e métodos diferentes. Para utilização como parâmetro de entrada na simulação computacional, optou-se por adotar o valor mais desfavorável, sob o ponto de vista termoenergético para climas quentes, onde a taxa de absorvância solar apresenta maior magnitude. Portanto, o valor adotado de absorvância solar para o teto frio degradado (TD) foi de 0,42.

Tabela 10 – Estimativa de degradação da absorvância solar e SRI para o teto frio.

Material	Absorvância Solar	SRI		
		$h_c = 5W/m^2.K$	$h_c = 12W/m^2.K$	$h_c = 30W/m^2.K$
Teto Frio	0,25	92,3	92,5	92,6
Teto Frio Degradado (derivado de Synnefa, Santamouris; Apostolakis, 2007)	0,31	84,0	84,2	84,4
Teto Frio Degradado (derivado de Shirakawa et al., 2017)	0,31	84,0	84,2	84,4
Teto Frio Degradado (NBR 15575)	0,42	68,9	69,2	69,5

Fonte: autor (2024).

A absorvância solar admitida ao teto frio (TF) foi definida como sendo de 0,25, tal escolha está em concordância com as referências encontradas na literatura sobre o tema (Sproul *et al.*, 2014; Costanzo, Evola e Marletta, 2016; Piselli *et al.*, 2017; Testa; Krarti, 2017). Por outro lado, a absorvância solar do teto padrão (TP)

corresponde à absorptância solar indicada no *modelo de referência* (Figura 1) para a avaliação do desempenho térmico no método da NBR 15575-1 (ABNT, 2021), que corresponde a 0,65.

Tabela 11 – Cenários e propriedades térmicas das diferentes coberturas analisadas.

Cobertura	Composição	Transmitância Térmica W/m ² .K	Resistência Térmica m ² .K/W	Capacidade Térmica kJ/m ² .K	Absortância solar (α)
TF_RT-0,5	Telha de fibrocimento (0,006m)				0,25
TD_RT-0,5	Câmara de ar (>0,05m)	2,06	0,49	228,6	0,42
TP_RT-0,5	Laje maciça (0,10m)				0,65
TF_RT-1	Telha de fibrocimento (0,006m)				0,25
TD_RT-1	Câmara de ar (>0,05m) Isolamento Térmico (0,51m ² .K/W)	1,00	1,00	228,6	0,42
TP_RT-1	Laje maciça (0,10m)				0,65
TF_RT-3	Telha de fibrocimento (0,006m)				0,25
TD_RT-3	Câmara de ar (>0,05m) Isolamento Térmico (2,51m ² .K/W)	0,33	3,00	228,6	0,42
TP_RT-3	Laje maciça (0,10m)				0,65
TF_RT-6	Telha de fibrocimento (0,006m)				0,25
TD_RT-6	Câmara de ar (>0,05m) Isolamento Térmico (5,51m ² .K/W)	0,17	6,00	228,6	0,42
TP_RT-6	Laje maciça (0,10m)				0,65

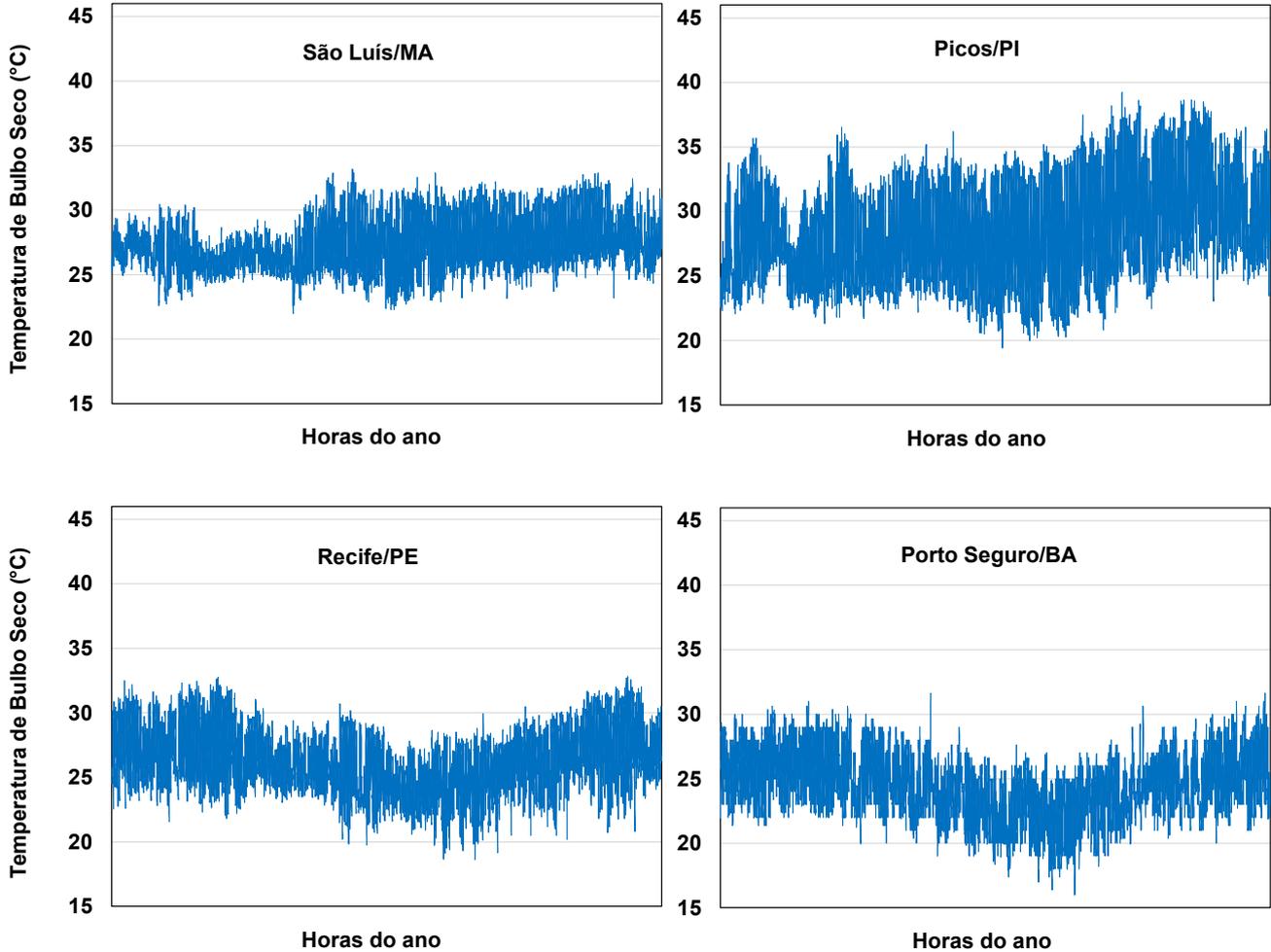
Fonte: autor (2024).

3.1.2.2 Arquivo climático

Os arquivos climáticos são parâmetros de entrada fundamentais para as simulações computacionais com foco na predição do consumo energético e otimização do ambiente térmico. Tomando como referência a pesquisa de Pyrgou *et al.* (2017), desejou-se avaliar as discrepâncias observadas na avaliação do desempenho térmico da edificação estudada ao utilizar arquivos climáticos distintos dos recomendados pela NBR 15575-1 (ABNT, 2021). Isto posto, foram realizadas comparações entre simulações computacionais utilizando os dados climáticos TMYx, derivado de dados meteorológicos entre os anos de 2007 e 2021 (Lawrie; Crawley, 2022), e dados INMET (normativos). A Figura 16 expõe o perfil anual das temperaturas de bulbo seco (em graus Celsius), obtidas através dos dados climáticos TMYx, para

as cidades de São Luís/MA Picos/PI, Recife/PE e Porto Seguro/BA. A Tabela 12 apresenta os Intervalos de temperaturas externas de bulbo seco das cidades em análise para o cálculo do PHFT dos APP.

Figura 16 - Dados anuais de temperatura de bulbo seco (TMYx).



Fonte: autor (2024).

Tabela 12 – Dados e classificação climática das cidades avaliadas.

Cidade	Unidade Federativa	Temperatura média de bulbo seco anual	Intervalos de temperaturas externas (NBR 15575)
São Luís	Maranhão	26,96	Intervalo 2
Picos	Piauí	28,52	Intervalo 3
Recife	Pernambuco	25,90	Intervalo 2
Porto Seguro	Bahia	24,38	Intervalo 1

Fonte: autor (2024).

3.1.2.3 *Modelagem do Solo*

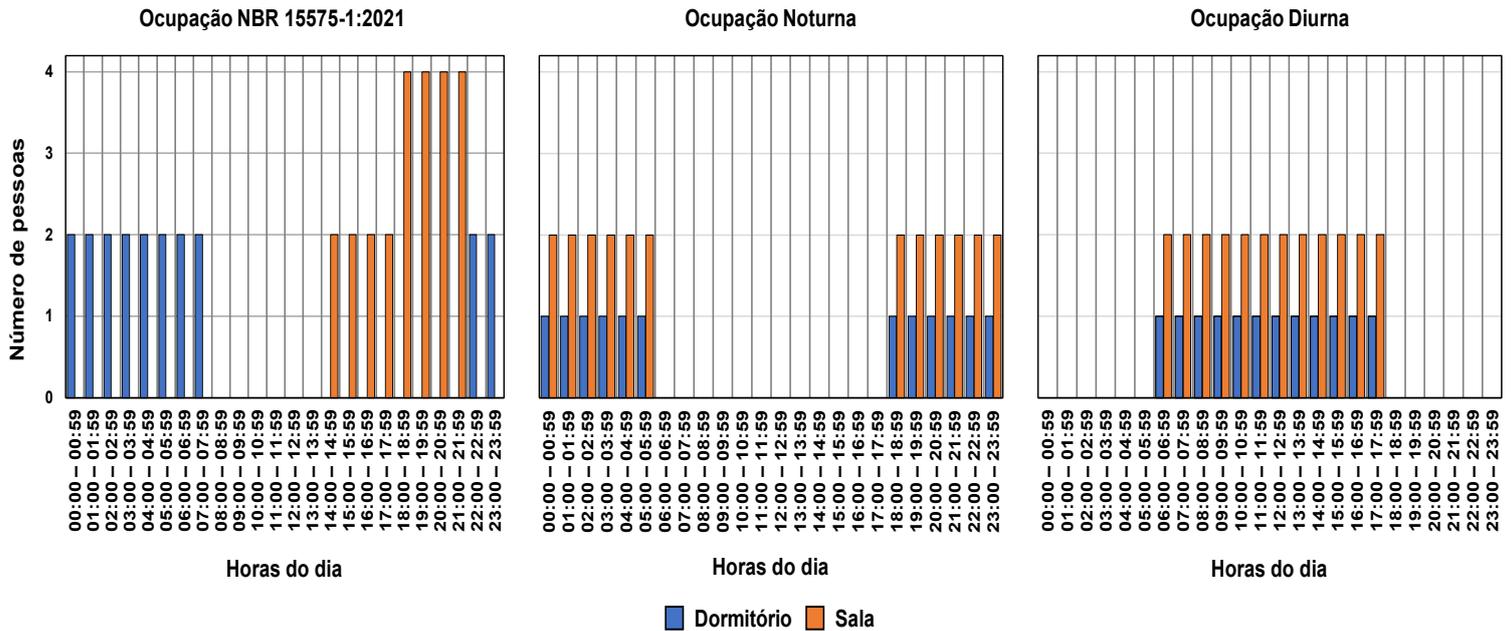
A transferência de calor através do contato entre o solo e elementos construtivos é um fator de influência considerável no comportamento térmico e energético, sobretudo, em edificações de um único pavimento ou pavimentos que estão em contato direto com o solo. Além disso, no Software EnergyPlus, existem diferentes métodos de modelagem que reproduzem a interação entre o piso de edificações e o solo, dos quais destacam-se os métodos de modelagem contidos no objeto *Site:GroundDomain:Slab*, onde cada método apresenta particularidades relacionadas aos parâmetros de entrada, com algumas variáveis exercendo maior significância sobre outras, bem como das interferências não desprezíveis nas cargas térmicas de refrigeração e aquecimento decorrentes das simulações computacionais (Bruna *et al.*, 2018; Eli *et al.*, 2019).

Buscando executar a simulação desprezando os efeitos da transferência de calor entre o solo e o piso da edificação no desempenho térmico, simulou-se um cenário admitindo o piso adiabático. Sendo assim, as trocas de calor ocorreram exclusivamente através das superfícies de paredes e cobertura.

3.1.2.4 *Uso e ocupação*

Com o intuito de analisar o desempenho energético dos tetos frios em diferentes perfis de ocupação, admitiu-se três condições de ocupação. A primeira, conforme NBR 15575-1 (ABNT, 2021), cada dormitório é ocupado por 2 pessoas com horários de ocupação iniciando às 22h00 com término às 07h59, a *Sala*, no entanto, foi ocupada por duas pessoas entre 14h00 e 17h59 e com quatro ocupantes durante o intervalo das 18h00 às 21h59. A segunda condição de ocupação, noturna, os horários de ocupação foram estabelecidos para duas pessoas das 18h00 às 05h59. Na terceira hipótese de análise, a ocupação ocorreu em período diurno, com horários convencionados das 06h00 às 17h59. Nas duas últimas condições de ocupação, foram consideradas duas pessoas ocupando a *Sala* e uma pessoa em cada dormitório durante os períodos de simulação. A Figura 17 apresenta os diferentes cenários de ocupação analisados.

Figura 17 – Perfis de ocupação adotados nas simulações.



Fonte: autor (2024).

3.1.2.5 Cargas internas

Os cronogramas adotados para atividade das cargas internas foram programados para coincidir com os períodos de ocupação nos ambientes, isto é, nos períodos estabelecidos nas hipóteses de ocupação expostos na Figura 17. Contudo, os períodos de acionamento das cargas internas de iluminação variaram da seguinte maneira: na ocupação embasada na NBR 15575 (ABNT, 2021), a iluminação dos dormitórios foi acionada das 06h00 às 07h59 e das 22h00 às 23h59, enquanto a iluminação das salas foram ativadas entre 16h00 e 21h59; no período noturno de simulação, o cronograma de acionamento da iluminação nos ambientes foi delineado das 18h00 às 23h59 e, no período diurno de simulação, a iluminação nos ambientes foi acionada das 06h00 às 07h59 e das 16h00 às 17h59.

3.1.2.6 Ventilação natural e condicionamento de ar

Ao todo, três condições de simulação foram consideradas: com ventilação natural (1), operação do condicionamento de ar em regime híbrido (2) e contínuo (3). Em todas as condições, o acionamento dos sistemas ocorreu nos períodos de ocupação dos usuários nos APP. A modelagem com ventilação natural e condicionamento de ar em regime híbrido seguiu o estabelecido na NBR 15575-1 (ABNT, 2021), cujo método está exposto no item 2.1.1.

Com inspiração no trabalho de Ge *et al.* (2021), a configuração das simulações ocorridas no cenário com atividade contínua do sistema de condicionamento de ar nos APP foi desenvolvida tendo como referência as diretrizes da NBR 15575. No entanto, o acionamento do sistema perdura por todo o período de ocupação dos APP, sem considerar uma contribuição do cenário de ventilação natural na contabilização da carga térmica. Logo, aplicou-se a classe de objetos *HVAC Template:Zone:IdealLoadsAirSystem* que emprega um sistema de cálculo ideal para contabilização das cargas térmicas sensíveis e latentes correspondente ao aquecimento ($CgTA_{APP}$) e resfriamento ($CgTR_{APP}$) de cada APP. Adicionalmente, de acordo com as preconizações da NBR 15575, definiu-se os setpoints de 21°C e 23°C para acionamento do sistema quanto ao aquecimento e resfriamento, respectivamente. Nesse modo de simulação, todas as esquadrias ficam fechadas à exceção da janela do *BWC* que opera sempre aberta.

3.2 PARÂMETROS DE ANÁLISE

Os parâmetros adotados para análise dos resultados tiveram três aspectos: análise do desempenho térmico, análise energética e balanço térmico de superfície.

A avaliação do desempenho térmico foi realizada de acordo com o método estabelecido na NBR 15575 (ABNT, 2021), previamente descrito. Nesse sentido, foram determinados os níveis de desempenho com base em três parâmetros de avaliação: as temperaturas operativas máximas e mínimas anuais da unidade habitacional, o $PHFT_{UH}$ (percentual de horas de ocupação dentro de uma faixa de temperatura operativa para a unidade habitacional) e a carga térmica anual integrada da unidade habitacional.

A análise energética foi efetuada com base nos valores determinados de carga térmica da unidade habitacional. No EnergyPlus, esta análise considera os seguintes parâmetros de saída (outputs): *Zone Ideal Loads Zone Total Heating Energy* e *Zone Ideal Loads Zone Total Cooling Energy*, ambos configurados para saída de dados a cada hora. Quando no regime híbrido, as cargas térmicas de resfriamento e aquecimento são calculadas em função das temperaturas operativas dos APP (simulados com ventilação natural) pelo output *Zone Operative Temperature*, conforme representado na Figura 3. Em decorrência dos resultados de carga térmica, calculou-se os valores correspondentes às emissões de dióxido de carbono (CO_2) pertinentes a cada cenário de simulação, conforme a Equação (10). Para essa

finalidade, os valores de carga térmica ideal foram transformados em consumo de energia elétrica por meio da Equação (8) e da Equação (9), de acordo os métodos de cálculos propostos na INI-R (INMETRO, 2022).

$$CR_{UH} = \frac{CgTR_{UH}}{CEE_R} \quad \text{Equação (8)}$$

$$CA_{UH} = \frac{CgTA_{UH}}{CEE_A} \quad \text{Equação (9)}$$

Onde,

CR_{UH} é o consumo de energia elétrica para refrigeração da unidade habitacional (kWh/ano);

CA_{UH} é o consumo de energia elétrica para aquecimento da unidade habitacional (kWh/ano);

CEE_R é coeficiente de eficiência energética do sistema de condicionamento de ar para refrigeração (W/W);

CEE_A é o coeficiente de eficiência energética do sistema de condicionamento de ar para aquecimento (W/W).

Os denominadores CEE, calculados para aquecimento e refrigeração, foram estabelecidos com base nos valores de referência para avaliação da eficiência energética da envoltória conforme a INI-R (INMETRO, 2022) e com base no CSPF (Cooling Seasonal Performance Factor), adaptado para as cidades adotadas neste trabalho, considerando os dados meteorológicos do INMET, em função da temperatura externa e das horas de operação do sistema para cada perfil de ocupação adotado (NBR 15575-1, noturno e diurno). O cálculo do fator CSPF foi realizado por meio da interface web do PBE EDIFICA (s.d.). Os parâmetros utilizados do equipamento para o cálculo do CSPF foram fundamentados nos dados declarados do índice PET (Physiological Equivalent Temperature) de um equipamento de ar-condicionado do tipo split inverter, amplamente comercializado pelo mercado brasileiro e não necessariamente o mais eficiente, disponibilizado pelo INMETRO (2023). Neste caso, o valor de CEE_A foi determinado pela expressão: $1,72 + (0,5 \cdot CEE_R)$. A Tabela 13 e Tabela 14 informam, respectivamente, os dados relativos ao equipamento de ar-condicionado utilizado para o cálculo do CSPF e os coeficientes

CEE_R e CEE_A admitidos para o cálculo do consumo energético de refrigeração (CR_{UH}) e aquecimento (CA_{UH}).

Tabela 13 – Dados PET (ar-condicionado split inverter).

Carga Total (100%) em 35°C [obrigatório]		Carga Parcial (50%) em 35°C [obrigatório velocidade variável]		Carga Parcial (50%) em 29°C [opcional velocidade variável]		Carga Total (100%) em 29°C [opcional velocidade fixa]		IDRS (Wh/Wh)
Capacidade Total (W)	Consumo Total (W)	Capacidade Parcial (W)	Consumo Parcial (W)	Capacidade Parcial (W)	Consumo Parcial (W)	Capacidade Parcial (W)	Consumo Parcial (W)	
3.517	1.340	1.758	400	1.758	284	-	-	6,00

Fonte: INMETRO (2023).

Tabela 14 – Coeficientes CEE_R e CEE_A.

Cidade	CEE _R					CEE _A				
	Referência INI-R	Método CSPF				Referência INI-R	Método CSPF			
		NBR Dormitório	NBR Sala	Diurno	Noturno		NBR Dormitório	NBR Sala	Diurno	Noturno
São Luís		7,78	5,95	5,91	7,67		5,61	4,70	4,68	5,56
Picos	3,50	5,86	3,57	3,66	6,34	3,47	4,65	3,51	3,55	4,89
Recife		7,76	6,41	6,38	7,88		5,60	4,93	4,91	5,66
Porto Seguro		8,57	6,33	6,52	8,73		6,01	4,89	4,98	6,09

Fonte: autor (2024).

Em seguida, a emissão do dióxido de carbono é determinada a partir da Equação (10), calculada por meio do consumo total de energia elétrica anual por unidade de área e do fator de emissão de dióxido de carbono por geração de eletricidade (fe_E), adotado como sendo 0,09kg.CO₂/kWh, conforme Kamimura *et al.* (2020).

$$E_{CO_2} = \frac{(CR_{UH} + CA_{UH}) \cdot fe_E}{A_{p,UH}} \quad \text{Equação (10)}$$

Onde,

E_{CO₂} é a emissão total de dióxido de carbono da unidade habitacional (kgCO₂/m².ano);

fe_E é o fator de emissão de dióxido de carbono na geração de energia elétrica (kg.CO₂/kWh).

A_{p,UH} é a área de piso (m²), determinada a partir da soma das áreas de piso de todos os APP da unidade habitacional.

A análise do balanço térmico de superfície foi realizada na face externa do sistema de cobertura com ênfase na verificação dos fluxos radiativos de ondas curtas e longas para os sistemas de coberturas avaliados. Os outputs adotados estão indicados na Tabela 15.

Tabela 15 – Parâmetros de saída utilizados para cálculo do balanço de superfície.

Output	Representação	Descrição
<i>Surface Outside Face Convection Heat Gain Rate per Area</i>	q''_{CONV}	Descreve a transferência de calor por unidade de área (W/m^2) devido a convecção entre o ar externo e a face externa da superfície analisada
<i>Surface Outside Face Conduction Heat Transfer Rate per Area</i>	q''_{COND}	Descreve a transferência de calor por unidade de área (W/m^2) devido a condução na face externa de uma superfície
<i>Surface Outside Face Incident Solar Radiation Rate per Area</i>	q''_{ROC}	Representa a radiação solar total (W/m^2) incidente na face de uma superfície voltada ao exterior
<i>Surface Outside Face Net Thermal Radiation Heat Gain Rate per Area</i>	q''_{ROL}	Descreve o balanço de ondas longas entre as trocas de calor por unidade de área (W/m^2) entre a superfície e o ambiente externo

Fonte: autor (2024).

Como mencionado na Equação (5), do item 2.2, o balanço térmico de uma superfície externa é determinado a partir do somatório entre as trocas de calor ocorridas na superfície por radiação (ondas longas e curtas), convecção e condução. Os valores positivos de cada variável apontam que o sentido do fluxo de calor está em direção à superfície enquanto os valores negativos indicam que a transferência de calor ocorre da superfície para o meio. Este somatório deve ser igual a zero e, por meio dele, pode-se observar as magnitudes de cada mecanismo atuante na superfície de estudo.

4 RESULTADOS

4.1 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO

Nesta seção são apresentados os parâmetros utilizados na avaliação do desempenho térmico de edificações residenciais, conforme NBR 15575-1 (ABNT, 2021). Foram analisados os parâmetros de temperatura operativa máxima anual, PHFT e carga térmica de refrigeração. Levando em consideração o arquivo climático de cada cidade e o zoneamento bioclimático correspondente, não foram avaliadas as temperaturas mínimas anuais. Nota-se que apesar de Porto Seguro/BA enquadrar-se no intervalo 1 (Tabela 4), não foram encontrados valores de carga térmica de aquecimento. Para as demais cidades, situadas nos intervalos 2 e 3, a necessidade de determinação da quantidade de carga térmica de aquecimento não é aplicável.

Os resultados obtidos de temperatura máxima anual, $PHFT_{UH}$ e carga térmica de refrigeração estão representados na Figura 18. Estes indicadores são determinados durante a ocupação nos ambientes de permanência prolongada e são representativos da unidade habitacional avaliada.

Pode-se observar que as diferentes proposições de absorptância solar possibilitaram variações consideráveis nos indicadores de desempenho para um mesmo sistema de cobertura, de menor resistência térmica. Acerca da temperatura operativa anual máxima, nota-se que o padrão de comportamento entre todas as cidades ocorreu de forma que, ao aumentar a absorptância solar, são identificadas maiores temperaturas na unidade habitacional. As maiores influências na temperatura operativa anual máxima foram encontradas nas cidades de Picos/PI e Recife/PE com variações de $2,1^{\circ}C$ se comparado uma cobertura de baixa absorptância ($TF_{RT_{0,5}}$) com a cobertura considerando absorptância padrão ($TP_{RT_{0,5}}$). Considerando o teto frio degradado, identifica-se maior impacto na temperatura operativa anual máxima da unidade habitacional nas cidades de Picos/PI e Recife/PE, considerando aumento de $0,9^{\circ}C$.

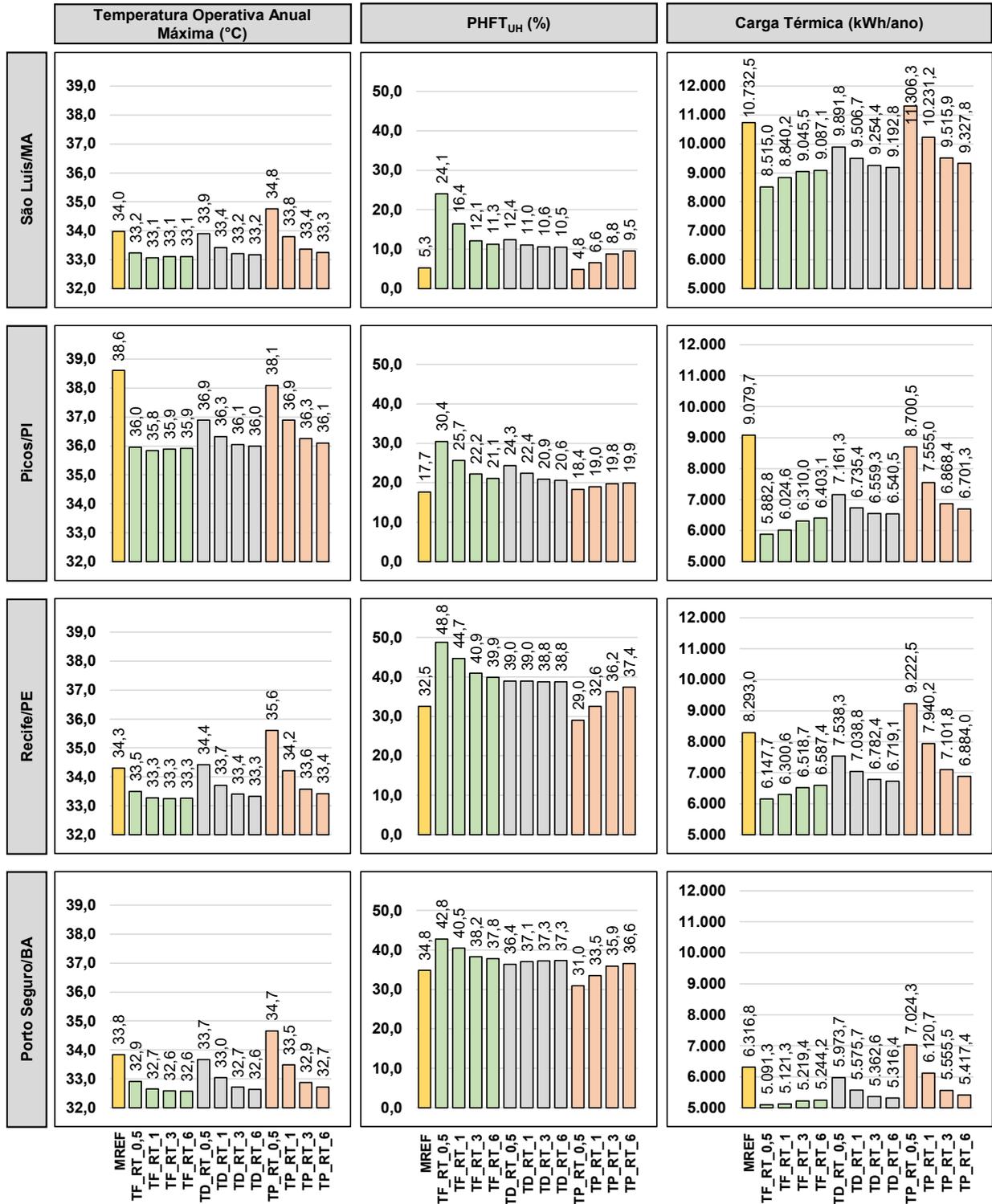
Quanto ao $PHFT_{UH}$, identifica-se o padrão de que os tetos com maiores absorptâncias solares implicam em menores valores do $PHFT_{UH}$. Este padrão reverbera em todas as cidades analisadas. Os maiores indicadores de $PHFT_{UH}$ foram encontrados nas simulações que adotaram o sistema de tetos frios ($TF_{RT_{0,5}}$), assim sendo, a cidade de Recife/PE apresentou o maior indicador de $PHFT_{UH}$ com

valor de 48,8%, enquanto a cidade de São Luís/MA indicou o menor valor de $PHFT_{UH}$, com percentual de 24,1%.

A configuração dos tetos com menores absorptâncias solares apresentou uma influência direta na quantidade de carga térmica. Estes acarretaram em valores mais baixos de quantidades de cargas térmicas. Vale notar que, apesar das simulações ocorridas na cidade de Recife/PE indicarem os maiores índices de $PHFT_{UH}$, não foram observados menores cargas térmicas na cidade de Recife/PE. No entanto, observa-se que a cidade de Porto Seguro/BA apresenta as menores cargas térmicas de refrigeração, este fato pode ser justificado pelo comportamento das temperaturas de bulbo seco das cidades, onde em Porto Seguro/BA são registradas temperaturas mais amenas. Além disso, para todos os cenários alternativos de telhados, é observado que a cidade de Picos/PI apresenta uma carga térmica de refrigeração inferior quando comparada à cidade de Recife/PE. Destaca-se que Picos/PI apresenta uma maior amplitude diária em relação à cidade Recife/PE, resultando em dias com temperaturas mais elevadas e noites mais frias. Conseqüentemente, o efeito da amplitude térmica na carga térmica de refrigeração influenciou os APP analisados, em especial, os quartos, que possuem cronograma de ocupação predominante no período noturno, resultando em menores necessidades de carga térmica. Portanto, ao determinar a carga térmica total da unidade habitacional, verificou-se que a quantidade necessária em Picos/PI era inferior ao observado na cidade de Recife/PE.

Embora sejam evidentes os impactos da absorptância solar na face externa dos telhados nos indicadores de desempenho térmico, percebe-se que a influência da absorptância solar na otimização de tais indicadores decai à medida que a resistência térmica do sistema aumenta. Em todos os cenários, é possível identificar uma tendência de aproximação dos resultados entre os diferentes tipos de tetos quando há aumento da resistência térmica, especialmente nos sistemas com resistência térmica de $6,0m^2.K/W$. Essa observação reflete um comportamento análogo ao demonstrado no trabalho de Tzempelikos e Lee (2021). Dessa forma, verifica-se que a eficácia das características de absorptância solar nos tetos em relação aos indicadores de desempenho térmico depende essencialmente da resistência térmica do sistema.

Figura 18 – Resultados obtidos para os parâmetros de avaliação do desempenho térmico.



Fonte: autor (2024).

Representado no Quadro 1, a investigação do nível de desempenho térmico foi realizada para todos os tetos propostos à unidade habitacional. Com exceção da proposição do teto padrão (TP, $\alpha=0,65$) com resistência térmica de $0,49\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ nas cidades de Recife/PE e Porto Seguro/BA cujos parâmetros de PHFT_{UH} foram inferiores que 90% do modelo de referência, os demais cenários propostos atenderam ao nível mínimo de desempenho térmico, isto é, os parâmetros obtidos de PHFT_{UH} e temperatura operativa anual máxima atenderam aos critérios estabelecidos pela NBR 15575-1 (ABNT, 2021).

Quadro 1 - Atendimento à norma de desempenho térmico.

Cidades	Teto Frio (TF) $\alpha=0,25$				Teto Frio Degradado (TD) $\alpha=0,42$				Teto Padrão (TP) $\alpha=0,65$			
	RT_0,5	RT_1	RT_3	RT_6	RT_0,5	RT_1	RT_3	RT_6	RT_0,5	RT_1	RT_3	RT_6
São Luís/MA	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M
Picos/PI	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M
Recife/PE	M	M	M	M	M	M	M	M	NA	M	M	M
Porto Seguro/BA	M	M	M	M	M	M	M	M	NA	M	M	M

Notas:

M significa que a unidade habitacional atende ao nível mínimo de desempenho térmico;

NA significa que a unidade habitacional não atende ao nível mínimo de desempenho térmico.

Fonte: autor (2024).

Referente aos cenários que alcançaram o atendimento mínimo, estes apresentaram reduções na carga térmica total com relação ao modelo de referência (MREF), porém não atenderam aos critérios preconizados da simulação com ventilação natural para atendimento em nível intermediário. Por conseguinte, afirma-se que a unidade habitacional também não atende ao nível superior de desempenho térmico. Os cenários mais eficientes de simulação que adotaram o uso tetos frios (TF_RT_0,5) representaram reduções de carga térmica total (com relação ao MREF) de 20,7%, 35,2%, 25,9% e 19,4%, para as cidades de São Luís/MA, Picos/PI, Recife/PE e Porto Seguro/BA, respectivamente.

Em contrapartida aos tetos frios, os cenários mais eficientes que adotam o uso do teto frio degradado e teto padrão foram encontrados nas simulações dos sistemas com resistência térmica de $6,0\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ (RT_6). Destaca-se que os cenários menos eficientes foram procedidos nas simulações do teto padrão com resistência térmica do sistema de $0,49\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ (TP_RT_0,5), observou-se redução de carga térmica total (com relação ao MREF) de 4,2% na cidade de Picos/PI, bem como aumento na carga térmica total (com relação ao MREF) de 11,2%, 11,2% e 5,3% para as cidades de Porto Seguro/BA, Recife/PE e São Luís/MA, por essa ordem.

4.2 IMPACTO DO ARQUIVO CLIMÁTICO NO DESEMPENHO TÉRMICO

Na Figura 19, expõe-se as diferenças encontradas entre os parâmetros de temperatura máxima anual, $PHFT_{UH}$ e carga térmica de refrigeração, da unidade habitacional nas diversas proposições de tetos, obtidos a partir da simulação com adoção do arquivo climático TMYx e INMET (normativo).

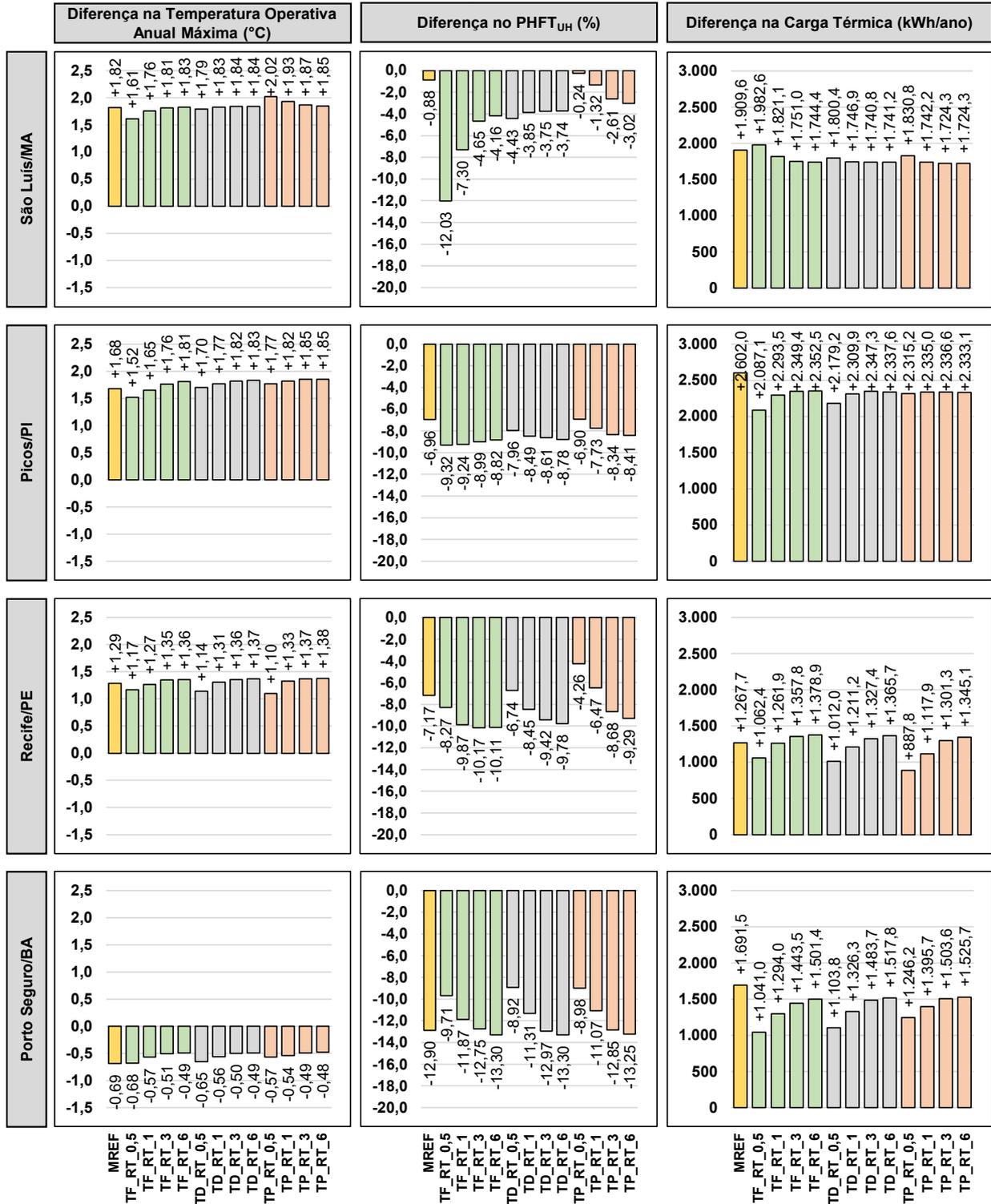
A priori, repara-se que a alteração do arquivo climático resultou em alterações para todos os parâmetros de avaliação. Observou-se um aumento nas temperaturas operativas máximas da unidade habitacional superior a 1°C nas cidades de São Luís/MA, Picos/PI e Recife/PE. Entretanto, as simulações ocorridas na cidade de Porto Seguro/BA indicaram uma redução da temperatura máxima na unidade habitacional, esta ocorrência pode ser atribuída ao tipo de arquivo climático, uma vez que o arquivo TMYx apresenta um menor pico de temperaturas máximas de bulbo seco, no entanto, é importante destacar que o perfil médio das temperaturas do arquivo TMYx supera o obtido no arquivo INMET.

As diferenças identificadas nos resultados do $PHFT_{UH}$ apresentaram reduções em todos os casos de simulação. Verificou-se que o $PHFT_{UH}$ foi reduzido em resposta às temperaturas superiores à faixa de temperatura operativa do $PHFT_{APP}$. Além disso, pode-se notar a existência de um comportamento não linear nas diferenças do $PHFT_{UH}$. Contudo, o perfil do $PHFT_{UH}$ aponta os cenários dos tetos frios (TF) como os mais eficientes. Semelhantemente aos resultados obtidos nas simulações adotando o arquivo climático INMET, os cenários mais eficientes de tetos frios indicam que a cidade de Recife/PE prevalece com os melhores resultados de $PHFT_{UH}$, indicando percentual de 40,5%, enquanto a cidade de São Luís/MA continua indicando o menor valor de $PHFT_{UH}$, registrando um percentual de 12,0%.

A quantidade de carga térmica da unidade habitacional foi ampliada para todas as cidades simuladas. O cenário de teto frio (TF_RT_1), simulado para a cidade de Picos/PI, registrou o maior incremento percentual, atingindo 38,1%. Em contrapartida, o menor aumento percentual de carga térmica foi observado no cenário com teto padrão (TP_RT_0,5), simulado para a cidade de Recife/PE, indicando um aumento percentual de 9,6%. O aumento médio na carga térmica nas cidades de São Luís/MA, Picos/PI, Recife/PE e Porto Seguro/BA, foi, por essa ordem, de 18,8%, 33,7%, 17,4% e 24,8%. Nesse contexto, verifica-se que a adoção de telhados com menor absorvância solar e resistência térmica resultou em menores quantidades de carga

térmica. A partir disso, evidencia-se uma correlação com os resultados observados nas simulações que empregaram o arquivo INMET.

Figura 19 – Variações encontradas nos resultados das simulações entre os dados meteorológicos TMYx e INMET.



Fonte: autor (2024).

Para os três parâmetros analisados, percebe-se que o cenário mais eficiente coincide com o obtido na simulação que utiliza o arquivo climático INMET. Dessa forma, o cenário proposto mais eficiente adota tetos frios ($\alpha=0,25$) com menor resistência térmica (RT_{0,5}) e constata-se que à medida que a absorvância solar do sistema de telhado aumenta, os resultados inclinam-se para uma piora no desempenho térmico da unidade habitacional avaliada. Entretanto, ao associar o sistema de telhado com resistências térmicas mais elevadas (RT₁, RT₃ ou RT₆), a eficácia da absorvância solar é reduzida.

O Quadro 2 demonstra o nível de atendimento ao desempenho térmico para cada configuração de teto proposto à unidade habitacional. Percebe-se que, embora os resultados obtidos a partir do uso do arquivo climático TMYx apresentem parâmetros de desempenho térmico mais desfavoráveis que os resultados obtidos na simulação baseada no arquivo climático INMET, houve melhora no nível de desempenho térmico. Esta melhoria decorre do fato de que o cenário proposto de teto padrão ($\alpha=0,65$) com resistência térmica de $0,49\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ (TP_RT_0,5) nas cidades de Recife/PE e Porto Seguro/BA que inicialmente não atendiam aos critérios mínimos de desempenho térmico nas simulações empregando o arquivo climático INMET (Quadro 1), passou a atender quando simulado com o arquivo climático TMYx.

Quadro 2 - Atendimento à norma de desempenho térmico.

Cidades	Teto Frio (TF) $\alpha=0,25$				Teto Frio Degradado (TD) $\alpha=0,42$				Teto Padrão (TP) $\alpha=0,65$			
	RT_0,5	RT_1	RT_3	RT_6	RT_0,5	RT_1	RT_3	RT_6	RT_0,5	RT_1	RT_3	RT_6
São Luís/MA	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M
Picos/PI	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M
Recife/PE	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M
Porto Seguro/BA	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M

Notas:

M significa que a unidade habitacional atende ao nível mínimo de desempenho térmico.

Fonte: autor (2024).

Os cenários de simulação propostos, além de satisfazerem os requisitos para o atendimento em nível mínimo, também constatarem reduções na carga térmica total do modelo real (MREAL) com relação ao modelo de referência (MREF). Contudo, não atendem aos critérios exigidos para obtenção dos níveis intermediário e superior, sobretudo, no que se refere ao critério estabelecido de ventilação natural, o qual considera incrementos no PHFT_{UH}. No contexto da carga térmica, os cenários de tetos

propostos (TF, TD e TP) não atendem aos critérios exigidos para o nível superior e apenas o teto padrão (TP_RT_0,5) não atendeu ao critério de redução da carga térmica para atendimento em nível intermediário.

Os cenários mais eficientes de simulação que adotaram o uso de tetos frios (TF_RT_0,5) representaram reduções de carga térmica total (com relação ao MREF) de 17,0%, 31,8%, 24,6% e 23,4%, para as cidades de São Luís/MA, Picos/PI, Recife/PE e Porto Seguro/BA, respectivamente. Em contrapartida aos tetos frios (TF), os cenários mais eficientes que adotaram o uso do teto frio degradado (TD) e teto padrão (TP) foram encontrados nas simulações dos sistemas com resistência térmica de $6,0\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ (RT_6). Destaca-se que os cenários menos eficientes foram procedidos nas simulações do teto padrão (TP) com resistência térmica do sistema de $0,49\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ (RT_0,5), observou-se redução de carga térmica total (com relação ao MREF) de 5,7% na cidade de Picos/PI, bem como aumento na carga térmica total (com relação ao MREF) de 3,9%, 5,7% e 3,3%, para as cidades de São Luís/MA, Recife/PE e Porto Seguro/BA.

Os resultados apresentados na avaliação do impacto do arquivo climático no desempenho térmico corroboram com o trabalho de Pyrgou *et al.* (2017), visto que as discrepâncias observadas entre os conjuntos de dados dos arquivos climáticos INMET e TMYx são substancialmente relevantes, uma vez que identificou-se variações que impactam o desempenho térmico da unidade habitacional e, portanto, os arquivos climáticos devem ser continuamente atualizados para o alcance de estimativas mais precisas a respeito do desempenho. Por outro lado, partindo da premissa que, para um mesmo método, diferentes arquivos climáticos impactam em resultados distintos, entende-se como positiva a indicação da NBR 15575-1 (ABNT, 2021) de preconizar a utilização de um mesmo tipo de arquivo climático na metodologia de avaliação do desempenho térmico por simulação computacional. Contudo, é crucial enfatizar a importância da atualização constante dos arquivos climáticos para obtenção de predições mais realistas.

4.3 IMPACTO DA MODELAGEM DO SOLO NO DESEMPENHO TÉRMICO

A seguir, apresenta-se a análise das variações encontradas nos parâmetros utilizados na avaliação de desempenho térmico de edificações residenciais, conforme NBR 15575 (ABNT, 2021), a partir da simulação admitindo o piso da edificação como adiabático e, portanto, desconsiderando os efeitos de transferência de calor por meio

do solo e piso da edificação. Dessa forma, as diferenças obtidas de temperatura operativa máxima anual, $PHFT_{UH}$ e carga térmica de refrigeração estão representadas na Figura 20. Ambos os indicadores são determinados durante a ocupação nos ambientes de permanência prolongada e são representativos para a unidade habitacional avaliada.

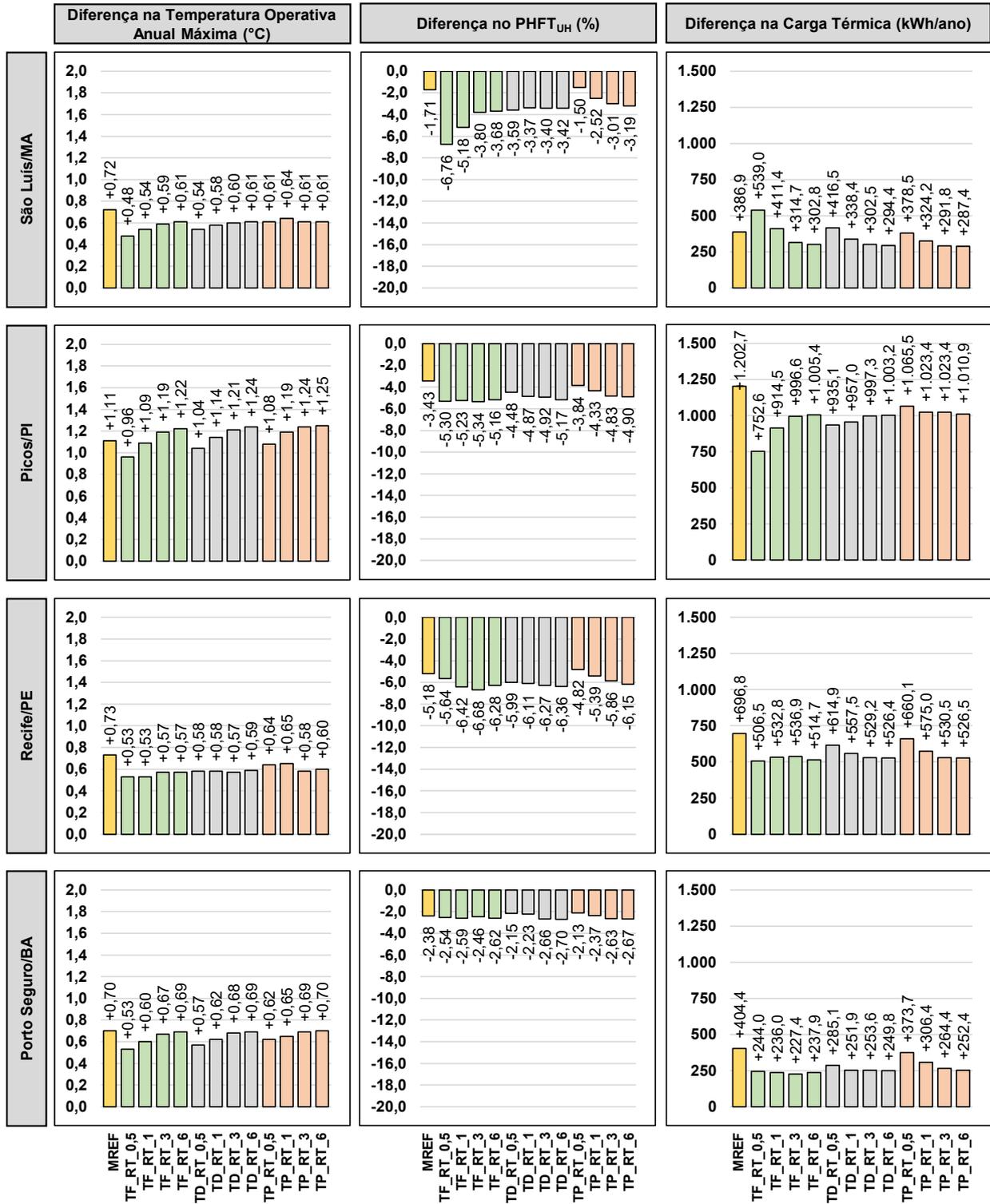
O piso adiabático provocou impacto em todos os parâmetros de avaliação. Os resultados de temperaturas operativas máximas da unidade habitacional tiveram um aumento, em sua maioria, acima de $0,5^{\circ}\text{C}$ nas cidades de São Luís/MA, Porto Seguro/BA e Recife/PE e acima de 1°C na cidade de Picos/PI.

O $PHFT_{UH}$ foi reduzido em todas as cidades avaliadas devido à observação de temperaturas operativas superiores à faixa estabelecida de temperatura. Mantendo a consistência com os resultados anteriores (INMET e TMYx), as proposições dos tetos frios com baixa resistência térmica (TF_RT_0,5) permanecem como os cenários mais eficientes, apesar do impacto encontrado na diminuição do $PHFT_{UH}$. Posto isso, as simulações ocorridas na cidade de Recife/PE expressaram os melhores resultados de $PHFT_{UH}$, com percentual de 43,1%, ao passo que as simulações realizadas na cidade de São Luís/MA indicaram os menores percentuais de $PHFT_{UH}$, com valor de 17,3% para o cenário mais eficiente (TF_RT_0,5).

A consideração do piso adiabático resultou em incremento na carga térmica para todas as proposições de telhados em todas as cidades avaliadas. As simulações ocorridas em Picos/PI registraram os maiores aumentos percentuais na carga térmica, sendo o cenário de teto frio (TF_RT_3) indicando o maior aumento (15,8%). Por outro lado, os menores aumentos foram observados nas simulações realizadas em São Luís/MA, com o menor aumento, 3,1% na proposição de TP_RT_3. Sendo assim, o aumento médio na carga térmica nas cidades de São Luís/MA, Picos/PI, Recife/PE e Porto Seguro/BA foi, respectivamente, de 3,7%, 14,3%, 7,9% e 4,9%.

Para ambos os parâmetros avaliados, os resultados encontrados nesta seção são correlatos aos itens 4.1 e 4.2 quanto ao apontamento dos tetos frios (TF) com baixa resistência térmica (RT_0,5) como os cenários mais eficientes termoenergeticamente.

Figura 20 - Variações encontradas nos resultados das simulações consideração piso adiabático.



Fonte: autor (2024).

No Quadro 3, é apresentada a avaliação do nível de atendimento ao desempenho térmico correspondente a cada configuração de teto submetida à unidade habitacional. Ainda que os resultados das simulações que consideraram o piso da unidade habitacional como adiabático expressem valores ligeiramente diferentes da simulação inicial (item 4.1) e mais desfavoráveis sob o ponto de vista de desempenho térmico, o nível de desempenho determinado para as diferentes configurações de tetos não mudou, permanecendo equivalente ao Quadro 1.

Quadro 3 - Atendimento à norma de desempenho térmico.

Cidades	Teto Frio (TF) $\alpha=0,25$				Teto Frio Degradado (TD) $\alpha=0,42$				Teto Padrão (TP) $\alpha=0,65$			
	RT_0,5	RT_1	RT_3	RT_6	RT_0,5	RT_1	RT_3	RT_6	RT_0,5	RT_1	RT_3	RT_6
São Luís/MA	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M
Picos/PI	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M
Recife/PE	M	M	M	M	M	M	M	M	NA	M	M	M
Porto Seguro/BA	M	M	M	M	M	M	M	M	NA	M	M	M

Notas:

M significa que a unidade habitacional atende ao nível mínimo de desempenho térmico;

NA significa que a unidade habitacional não atende ao nível mínimo de desempenho térmico.

Fonte: autor (2024).

Os cenários que satisfizeram o nível mínimo não atenderam aos critérios exigidos para alcançar os níveis intermediário ou superior. Na maior parte dos cenários, as exigências normativas para as simulações, considerando ventilação natural, impediram o atendimento em nível intermediário. Ademais, à exceção da proposição TP_RT_0,5 nas cidades de Porto Seguro/BA, Recife/PE e São Luís/MA, as exigências normativas para as simulações sem ventilação natural foram atendidas em relação ao nível intermediário. Contudo, nenhum cenário alcançou um percentual de redução de carga térmica total do modelo real (MREAL) com relação ao modelo de referência (MREF) suficiente para atender ao nível superior que, para o caso em questão, a NBR 15575-1 (ABNT, 2021) preconiza uma redução mínima de 55%.

Os cenários mais eficientes de simulação fizeram o uso tetos frios (TF_RT_0,5) e representaram reduções de carga térmica total (com relação ao MREF) de 18,6%, 35,5%, 26,0% e 20,6% para as cidades de São Luís/MA, Picos/PI, Recife/PE e Porto Seguro/BA, respectivamente. Em contrapartida aos tetos frios, os cenários mais eficientes que adotam o uso do teto frio degradado (TD) e teto padrão (TP) foram encontrados nas simulações dos sistemas com resistência térmica de 6,0m².K/W (RT_6). Os cenários menos eficientes foram identificados nos sistemas com teto padrão (TP) e resistência térmica de 0,49m².K/W (RT_0,5), nestes,

observou-se redução de carga térmica total (com relação ao MREF) de 5,0% na cidade de Picos/PI, bem como aumento na carga térmica total (com relação ao MREF) de 5,1%, 9,9% e 10,1%, para as cidades de São Luís/MA, Recife/PE e Porto Seguro/BA.

No que diz respeito à avaliação do impacto da modelagem do solo no desempenho térmico, os resultados derivados da simulação da edificação unifamiliar sustentam as conclusões apresentadas na pesquisa de Bruna *et al.* (2018). Nesta pesquisa, os pesquisadores realizaram simulações com o objetivo de identificar os efeitos da consideração e desconsideração das trocas ocorridas entre o solo e piso nas condições de temperatura de uma edificação unifamiliar. Os resultados dessas simulações revelaram que, em Salvador/BA (zoneamento bioclimático 08, correspondente ao mesmo contexto deste trabalho), a desconsideração das trocas ocorridas pelo solo resultou em aumentos nas temperaturas máximas. Entretanto, para as simulações ocorridas em São Paulo/SP (zoneamento bioclimático 03) e Curitiba/PR (zoneamento bioclimático 01), observou-se reduções nas temperaturas máximas da edificação.

De qualquer maneira, os resultados encontrados reforçam o evidenciado nos trabalhos de Yıldız e Arsan (2011) e Eli *et al.* (2019), destacando a importância da abordagem cautelosa na definição dos parâmetros de entrada acerca das trocas da edificação com o solo, pois tanto o modelo de cálculo quanto os parâmetros utilizados podem reproduzir influências significativas nos resultados de temperatura, bem como a quantidade de carga térmica.

4.4 BALANÇO TÉRMICO DE SUPERFÍCIE

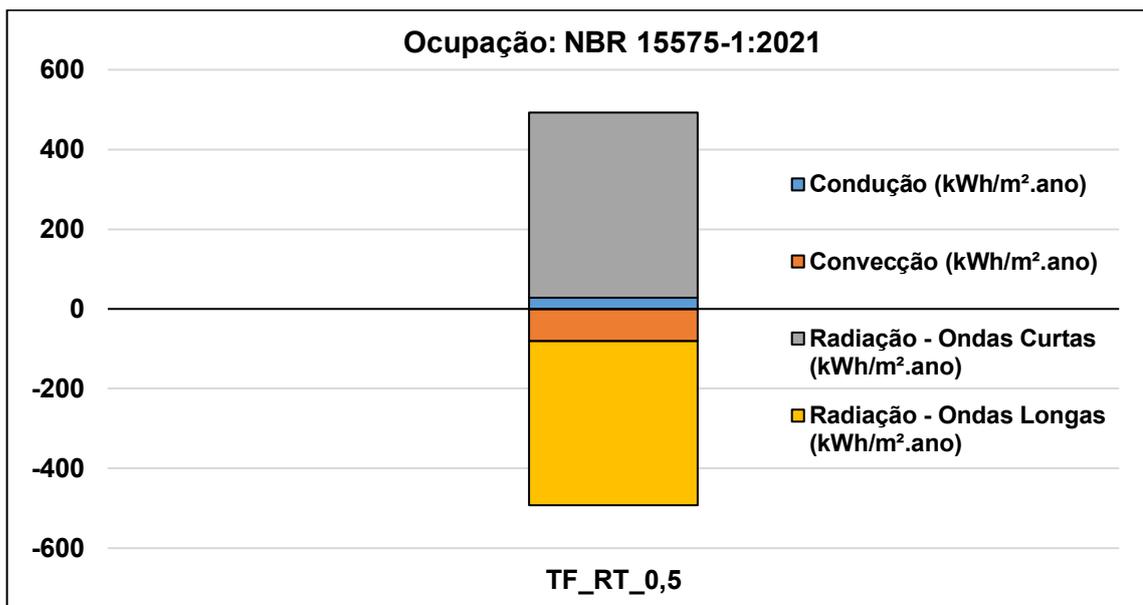
A análise do balanço térmico na superfície externa dos telhados permitiu a verificação das trocas de calor provenientes dos fluxos condutivos, convectivos e radiativos de ondas curtas e longas. O cálculo do balanço térmico levou em consideração todos os ambientes que compõem a edificação simulada, nas condições do modelo naturalmente ventilado.

O cálculo do balanço térmico de superfície foi realizado de acordo com a Equação (5) e, embora determinado para todas as trocas de calor ocorridas na superfície externa do teto em cada sistema proposto e cidade avaliada, este trabalho se concentra na análise dos fluxos radiativos de ondas curtas e longas para cada sistema avaliado. A Figura 21 representa o balanço térmico entre as trocas de calor

ocorridas no teto da edificação no período de um ano, considerando o modelo TF_RT_0,5, para a cidade de Recife/PE. Os valores correspondentes aos fluxos de calor podem ser positivos ou negativos, sendo que positivo indica adição de calor (kWh/m².ano) à face da superfície, enquanto negativo indica liberação de calor (kWh/m².ano) da face da superfície. O resultado do somatório dos ganhos e perdas de calor na superfície deverá ser igual ou próximo de 0kWh/m².ano.

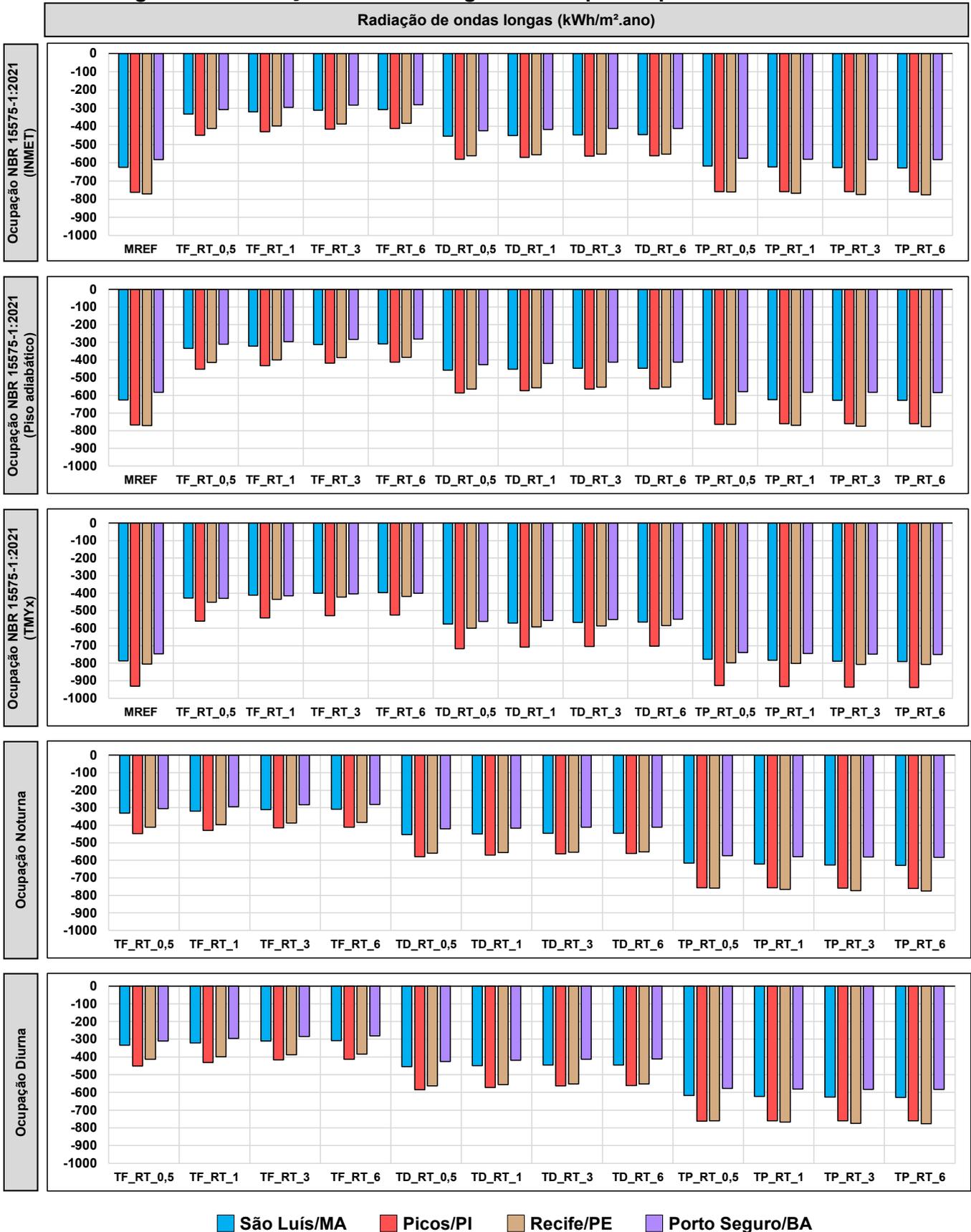
Algumas limitações que procederam as simulações devem ser destacadas. De acordo com o trabalho de Amorim *et al.* (2023), os modelos de cálculo de emissividade do céu integrados ao software EnergyPlus não são efetivamente calibrados para o contexto climático brasileiro e podem levar a incertezas nos resultados de carga térmica total anual (em 8% a 37%), portanto os autores desenvolveram um trabalho de calibração dos parâmetros utilizados nos modelos de Brunt (1932), Clark e Allen (1978), Idso (1981) e Berdahl e Martin (1984), ambos disponíveis no software, à realidade climática brasileira. Deste modo, as simulações foram procedidas seguindo os modelos originais, não calibrados, de cálculo de emissividade do céu propostos por Clark e Allen (1978). Vale ressaltar que este modelo de cálculo é aquele que, dentre os não calibrados, apresenta os melhores desempenhos.

Figura 21 – Balanço térmico de superfície.



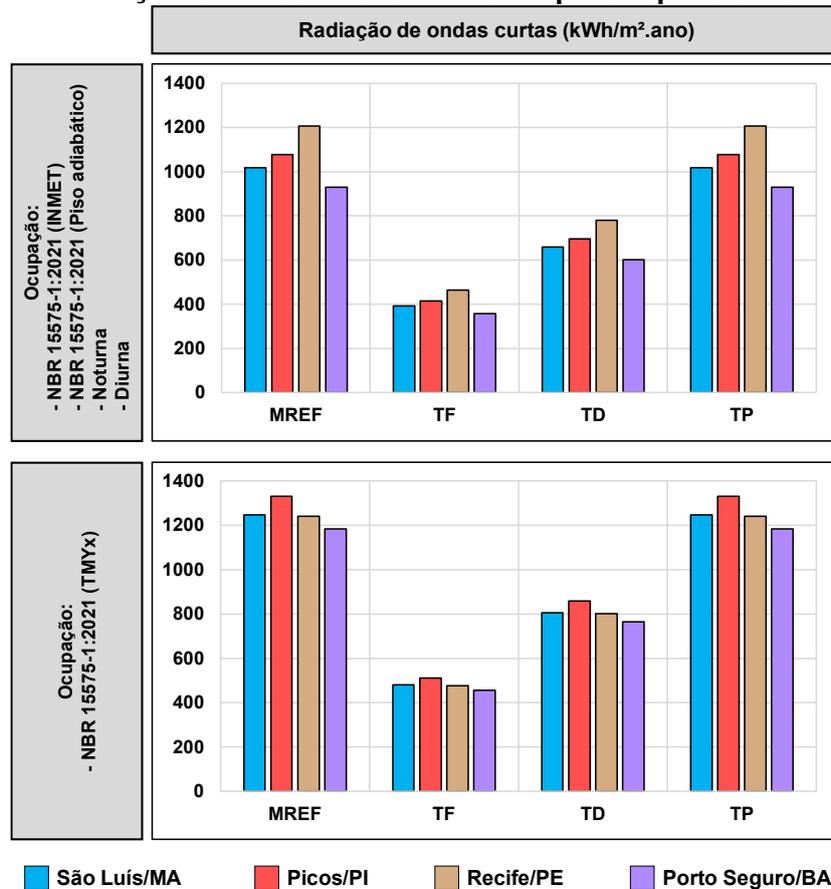
Fonte: autor (2024).

Figura 22 – Radiação de ondas longas emitida pela superfície externa dos tetos.



Fonte: autor (2024).

Figura 23 – Radiação de ondas curtas recebida pela superfície externa dos tetos.



Fonte: autor (2024).

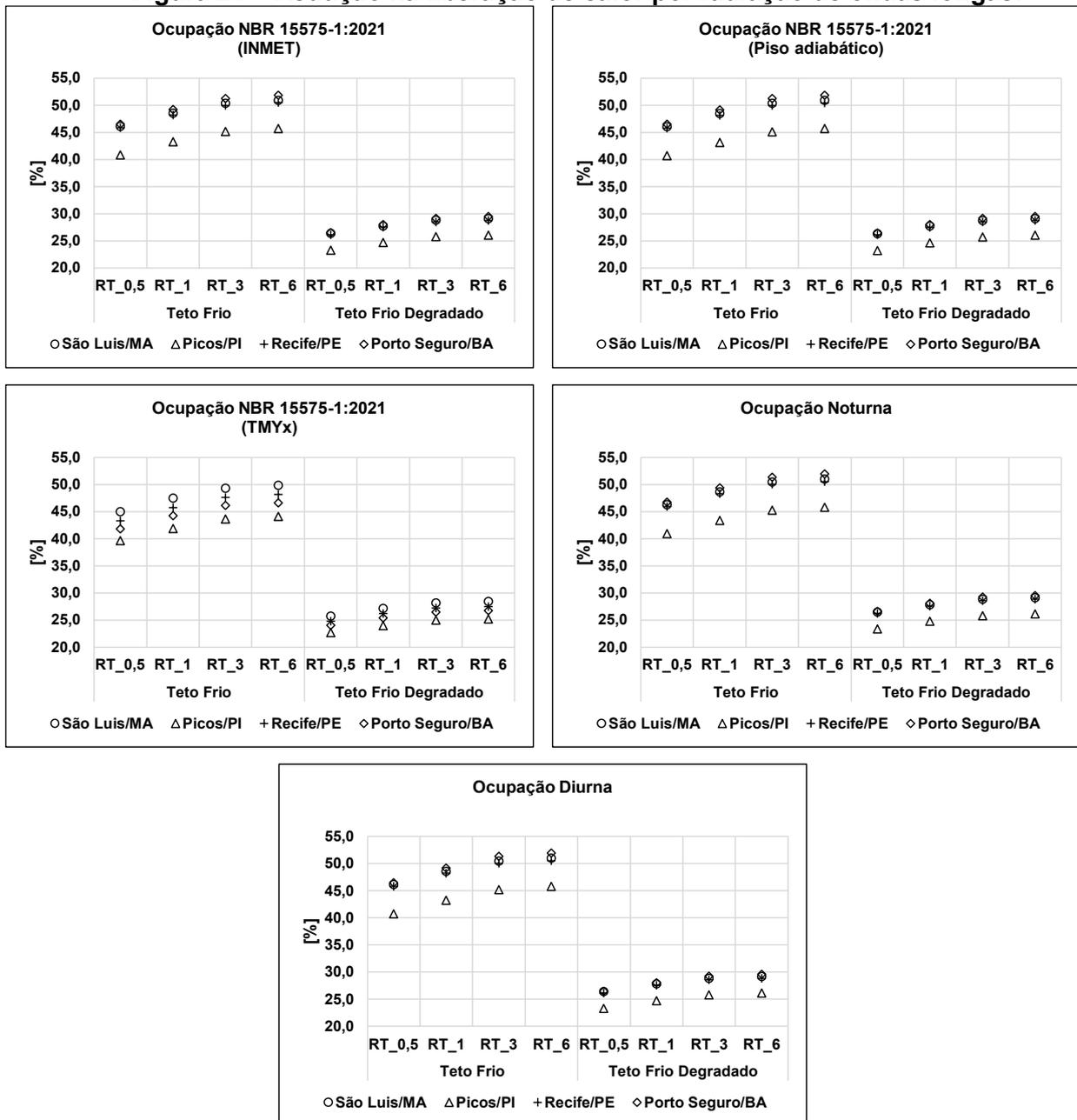
A Figura 22 e Figura 23 indicam, respectivamente, os fluxos radiativos de ondas longas e curtas relativas à face externa do sistema de teto, considerando as hipóteses de simulação apresentadas neste trabalho.

Com base na Figura 22, é admissível alegar que os modelos que adotam os tetos frios ($\alpha=0,25$) implicam em diminuição significativa da liberação de calor proveniente de ondas longas. Atentando para efeitos ambientais como, por exemplo, ilha de calor urbano (ICU), devido à menor emissão por radiação de ondas longas, os tetos frios ($\alpha=0,25$) podem contribuir com mitigações dos efeitos causadores de ICU.

Algumas observações podem ser delineadas tomando como referência a Figura 22, especialmente, no que se refere às reduções obtidas na emissão de radiação de ondas longas a partir da comparação entre tetos frios ($\alpha=0,25$) e degradados ($\alpha=0,42$) com o teto padrão ($\alpha=0,65$), conforme ilustra a Figura 24. Essa comparação foi feita para proposições de tetos com mesma resistência térmica. Assim sendo, por interferência da absortância solar do sistema, em todos os cenários de ocupação avaliados, verifica-se que a opção dos tetos frios ($\alpha=0,25$) pode auxiliar na

redução percentual da emissão de radiação de ondas longas entre 45,0% e 51,0% para a cidade de São Luís/MA, entre 39,0% e 46,0% para a cidade de Picos/PI, entre 43,0% e 46,0% para a cidade de Recife/PE e entre 41,0% e 52,0% para a cidade de Porto Seguro/BA. Neste mesmo sentido, os tetos frios degradados ($\alpha=0,42$) também levam à menor emissão de radiação de ondas longas, os valores variaram entre 25,0% e 30,0% para a cidade de São Luís/MA, entre 22,0% e 27,0% para a cidade de Picos/PI, entre 24,0% e 29,0% para a cidade de Recife/PE e entre 24,0% e 30,0% para a cidade de Porto Seguro/BA.

Figura 24 – Redução na liberação de calor por radiação de ondas longas.



Fonte: autor (2024).

Os resultados evidenciam que a liberação de calor depende essencialmente da absorptância solar e emitância térmica. Entretanto, observam-se pequenas variações ao aumentar a resistência térmica (RT_1, RT_3 e RT_6), as quais acarretam uma leve redução na liberação de calor. Salienta-se que essas reduções estão associadas a um teto padrão com absorptância solar de 0,65 e podem ser ampliadas de acordo com a absorptância solar do sistema ao qual está sendo comparado.

Diferentemente do exposto na Figura 22, a abordagem da radiação de ondas curtas, como esperado, indica que a radiação de ondas curtas efetiva na face externa do teto está intrinsecamente vinculada à absorptância solar dessa face (Figura 23). Como discutido nos tópicos anteriores, a absorptância solar governa a taxa de radiação de ondas curtas absorvida pela superfície (quanto menor a absorptância solar da face externa do teto, menor será a absorção por radiação de ondas curtas).

Em suma, os resultados mostraram que os tetos frios ($\alpha=0,25$) são soluções eficientes para redução dos fluxos radiativos por ondas longas liberados para o exterior, em função da menor temperatura superficial e alta emitância térmica, e podem auxiliar na mitigação de efeitos causadores de ilha de calor urbano em escala. Esta inferência é válida para todas as cidades avaliadas.

4.5 ANÁLISE DA OCUPAÇÃO NA QUANTIDADE DE CARGA TÉRMICA

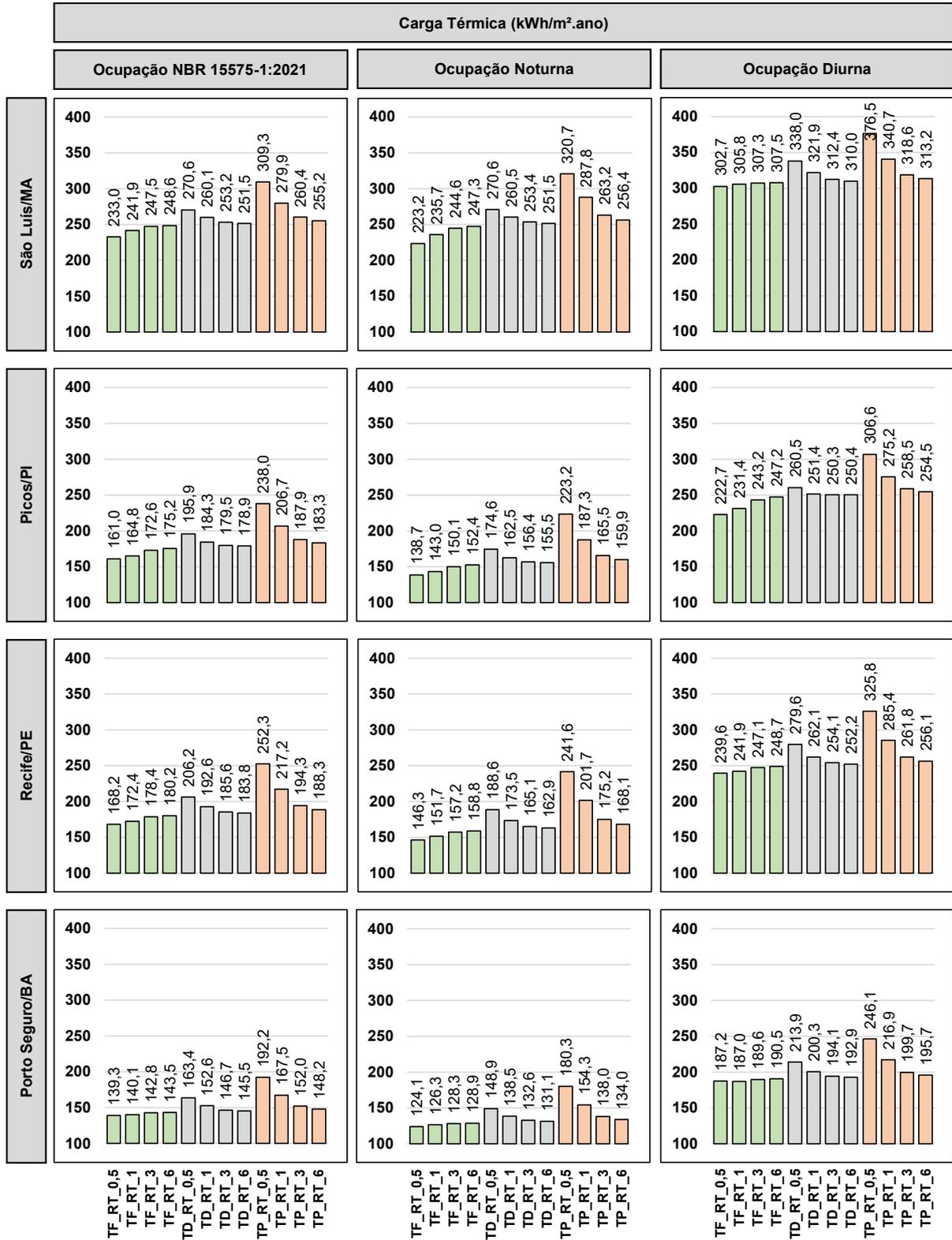
A partir da Figura 25, expõe-se os resultados da análise da ocupação na quantidade de carga térmica frente aos perfis de ocupação, conforme o padrão da NBR 15575-1 (ABNT, 2021), padrão noturno e padrão diurno. Visando uma análise em função da área da edificação, o parâmetro de carga térmica foi adotado na unidade de kWh/m².ano.

Para os perfis analisados de ocupação, observa-se que os padrões de uso atuam de maneira relevante no incremento de carga térmica, isto é, para cada cidade avaliada, o tempo de operação do sistema de condicionamento de ar e o período do dia empregados como parâmetros de entrada são fundamentais na determinação das magnitudes necessárias de carga térmica. Assim sendo, as simulações que consideram o período diurno indicaram as maiores magnitudes de carga térmica, enquanto os cenários de simulações conforme a ocupação NBR 15575-1 (ABNT, 2021) e ocupação noturna indicaram menores incrementos na carga térmica.

As razões para o maior incremento de carga térmica encontrado nas simulações ocorridas no cenário de ocupação diurna podem ser atribuídas ao acionamento no período do dia em que as temperaturas dos APP estão mais altas, o que, a princípio, é bastante análogo, pois será necessária uma maior quantidade de calor para que sejam respeitados os limites de temperatura de setpoint previamente estabelecidos.

Neste sentido, as ampliações da carga térmica oscilam de acordo com a absorvância solar e resistência térmica dos tetos considerados. Em comparação com os resultados obtidos nos perfis de ocupação conforme a NBR 15575-1 (ABNT, 2021), verifica-se que as simulações ocorridas durante a ocupação diurna apresentam incrementos percentuais que variam entre 21,7% e 29,9% para a cidade de São Luís/MA, entre 28,8% e 41,1% para a cidade de Picos/PI, entre 29,1% e 42,4% para a cidade de Recife/PE e entre 28,1% e 34,4% para a cidade de Porto Seguro/BA. De outro modo, quando comparados os resultados do cenário de ocupação noturno com o diurno, constata-se incrementos percentuais no perfil de ocupação diurno situados numa faixa entre 17,4% e 35,6% para a cidade de São Luís/MA, entre 37,4% e 62,2% para a cidade de Picos/PI, entre 34,9% e 63,8% para a cidade de Recife/PE e entre 36,5% e 50,9% para a cidade de Porto Seguro/BA. Os maiores aumentos são identificados nas simulações que adotam tetos frios ($\alpha=0,25$), enquanto os menores ocorrem nos cenários que consideram teto padrão ($\alpha=0,65$).

Figura 25 - Resultados obtidos de carga térmica para cada perfil de ocupação adotado.



Fonte: autor (2024).

Os dados expressos na Figura 25 sustentam a compreensão de que entender o perfil do ocupante, tal como dos usos, torna-se essencial para realizar análises energéticas mais assertivas, da qual, partindo de um padrão não representativo dos ocupantes, é possível observar aumentos consideráveis na demanda de energia. Os resultados desta análise convergem com os trabalhos de Jazaeri, Gordon e Alpcan (2019), Ascione *et al.* (2020) e Ge *et al.* (2021) que, embora conduzidos em cidades distintas, os resultados, bem como orientações acerca do padrão de ocupação na análise computacional como método de predição de carga térmica, são destacados como relevantes, sobretudo, ao buscar otimizar a eficiência energética.

Com base nos resultados, o padrão de uso e ocupação comanda a eficiência energética do sistema simulado e nota-se que os tetos frios ($\alpha=0,25$) apresentaram a melhor performance energética para os três cenários de ocupação.

4.6 EMISSÕES DE CO₂

Os dados relativos às emissões de dióxido de carbono (CO₂) foram determinados mediante a consideração de variáveis como a eficiência do equipamento (Tabela 14), especificações do teto e perfis de ocupação. Os valores correspondentes às emissões de CO₂ estão expostos de forma gráfica na Figura 26 e foram calculados a partir do consumo energético, utilizando o coeficiente de eficiência energética (CEE) baseado no CSPF e nos valores de referência da INI-R (INMETRO, 2022), conforme detalhado na Tabela 14.

Os percentuais de redução na emissão de CO₂, descritos nesta seção, são diretamente proporcionais aos percentuais de redução do consumo de energia. Portanto, para cada redução percentual obtida no consumo de energia, espera-se uma redução percentual equivalente na emissão de CO₂. Posto isso, para determinar o consumo de energia (expresso em kWh/m².ano) a partir da Figura 26, deve-se realizar a divisão da emissão de CO₂ pelo fator f_{eE} , cujo valor adotado foi de 0,09kg.CO₂/kWh.

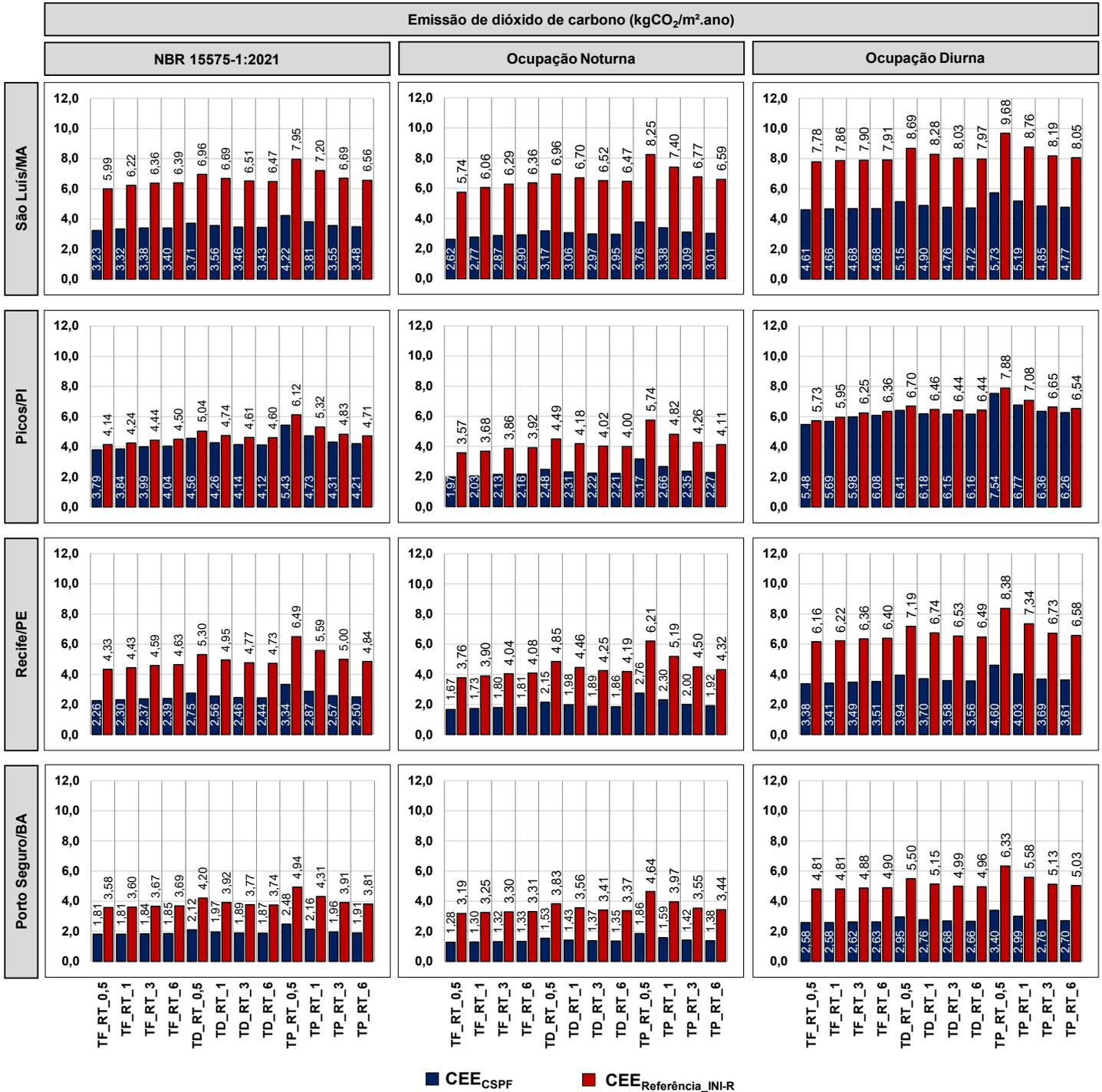
Pra cada perfil de ocupação, percebe-se diversas circunstâncias que levam à redução na emissão de CO₂ em detrimento da economia na demanda de energia por resfriamento. Em todos os casos, por não haver consumo de aquecimento, não há penalidades no consumo de energia, bem como das emissões de CO₂.

No contexto da ocupação, observa-se que os resultados apontam diferentes alternativas que levam em consideração a redução na emissão de CO₂ obtida em relação ao tipo de teto e equipamentos propostos. Sob essas circunstâncias, a análise será guiada dando destaque:

- Às reduções decorrentes da substituição do equipamento;
- Às reduções decorrentes dos tetos para um mesmo equipamento; e
- À redução máxima, resultante da combinação do sistema de teto mais eficiente com o equipamento mais eficiente.

Nos perfis de ocupação de acordo com a NBR 15575-1 (ABNT, 2021), quanto à alteração do equipamento, de CEE baseado na INI-R para CEE baseado no CSPF para cada tipologia de teto admitida (TF, TD e TP), as simulações indicaram que a redução na emissão de CO₂ variou entre 46,0% e 47,0% para a cidade de São Luís/MA, entre 8,4% e 11,3% para a cidade de Picos/PI, entre 47,8% e 48,5% para a cidade de Recife/PE e entre 49,6% e 50,0% para a cidade de Porto Seguro/BA. Nos casos simulados com o CEE do equipamento baseado no CSPF, os cenários mais eficientes fizeram o uso de tetos frios (resistência térmica de 0,49m².K/W) e representaram reduções nas emissões de CO₂ (com relação ao TP_RT_0,5) de 23,3%, 30,2%, 32,4% e 27,3% para as cidades de São Luís/MA, Picos/PI, Recife/PE e Porto Seguro/BA, respectivamente. Nas simulações realizadas considerando os equipamentos com CEE baseado nos valores de referência da INI-R (INMETRO, 2022), os cenários mais eficientes também fazem uso de tetos frios (resistência térmica de 0,49m².K/W) e representaram reduções nas emissões de CO₂ (com relação ao TP_RT_0,5) de, por essa ordem, 24,7%, 32,4%, 33,3% e 27,5% para as cidades de São Luís/MA, Picos/PI, Recife/PE e Porto Seguro/BA. A otimização máxima identificada considerou a condição de maior emissão de CO₂, alcançada ao empregar um teto padrão (resistência térmica de 0,49m².K/W) e um equipamento baseado nos valores de referência da INI-R (INMETRO, 2022). Ao realizar a transição para um sistema de teto frio (resistência térmica de 0,49m².K/W) associado a um equipamento baseado no CSPF, alcançou-se a maior redução na emissão de CO₂. Para as cidades de São Luís/MA, Picos/PI, Recife/PE e Porto Seguro/BA, as reduções foram, nesta ordem, de 59,3%, 38,0%, 65,2% e 63,5%.

Figura 26 – Resultados obtidos de emissão de CO₂ para cada perfil de ocupação adotado.



Fonte: autor (2024).

Nos cenários de ocupação noturna, quanto à alteração do equipamento, de CEE baseado na INI-R para CEE baseado no CSPF para cada tipologia de teto admitida (TF, TD e TP), as simulações indicaram que a redução na emissão de CO₂ foi de 54,4% para a cidade de São Luís/MA, de 44,8% para a cidade de Picos/PI, de 55,6% para a cidade de Recife/PE e de 59,9% para a cidade de Porto Seguro/BA. Nos

casos simulados com o CEE do equipamento baseado no CSPF e nos valores de referência da INI-R (INMETRO, 2022), os cenários mais eficientes são equivalentes, e fizeram o uso de tetos frios (resistência térmica de $0,49\text{m}^2.\text{K/W}$) e representaram reduções nas emissões de CO_2 (com relação ao TP_RT_0,5) de 30,4%, 37,8%, 39,5% e 31,2% e para as cidades de São Luís/MA, Picos/PI, Recife/PE e Porto Seguro/BA, respectivamente. A otimização máxima identificada considerou a condição de maior emissão de CO_2 , alcançada ao empregar um teto padrão (resistência térmica de $0,49\text{m}^2.\text{K/W}$) e um equipamento baseado nos valores de referência da INI-R (INMETRO, 2022). Ao realizar a transição para um sistema de teto frio (resistência térmica de $0,49\text{m}^2.\text{K/W}$) associado a um equipamento baseado no CSPF, alcançou-se a maior redução na emissão de CO_2 . Para as cidades de São Luís/MA, Picos/PI, Recife/PE e Porto Seguro/BA, as reduções foram, nesta ordem, de 68,2%, 65,7%, 73,1% e 72,4%.

Nos cenários de ocupação diurna, quanto à alteração do equipamento, de CEE baseado na INI-R para CEE baseado no CSPF para cada tipologia de teto admitida (TF, TD e TP), as simulações indicaram que a redução na emissão de CO_2 foi de 40,8% para a cidade de São Luís/MA, de 4,4% para a cidade de Picos/PI, de 45,1% para a cidade de Recife/PE e de 46,3% para a cidade de Porto Seguro/BA. Nos casos simulados com o CEE do equipamento baseado no CSPF e nos valores de referência da INI-R (INMETRO, 2022), os cenários mais eficientes são equivalentes, e fizeram o uso de tetos frios (resistência térmica de $0,49\text{m}^2.\text{K/W}$) e representaram reduções nas emissões de CO_2 (com relação ao TP_RT_0,5) de 19,6%, 27,4%, 26,5% e 23,9% para as cidades de São Luís/MA, Picos/PI, Recife/PE e Porto Seguro/BA, respectivamente. A otimização máxima identificada considerou a condição de maior emissão de CO_2 , alcançada ao empregar um teto padrão (resistência térmica de $0,49\text{m}^2.\text{K/W}$) e um equipamento baseado nos valores de referência da INI-R (INMETRO, 2022). Ao realizar a transição para um sistema de teto frio (resistência térmica de $0,49\text{m}^2.\text{K/W}$) associado a um equipamento baseado no CSPF, alcançou-se a maior redução na emissão de CO_2 . Para as cidades de São Luís/MA, Picos/PI, Recife/PE e Porto Seguro/BA, as reduções foram, nesta ordem, de 52,4%, 30,5%, 59,7% e 59,2%.

Um fato que vale ser destacado é que, na cidade de Picos/PI, no contexto da ocupação conforme a norma NBR 15575-1 (ABNT, 2021) e ocupação diurna, a otimização resultante da modificação do equipamento foi significativamente inferior

quando comparado as demais cidades. Esta discrepância é atribuível à proximidade entre o valor do CSPF e o CEE da INI-R (INMETRO, 2022), que é de 3,5. O CSPF é determinado com base na temperatura do ar e, no contexto específico da cidade de Picos/PI, as temperaturas do ar no período de ocupação diurno e no período de avaliação da *Sala* (NBR 15575-1) influenciaram na obtenção de CSPF mais baixos. Particularmente, no que se refere à ocupação conforme a NBR 15575-1 (ABNT, 2021), o CSPF de resfriamento é distribuído para os cronogramas de ocupação da *Sala* e dos dormitórios. No caso da *Sala*, cuja carga térmica é superior a 75% do total requerido, o fato do CSPF aproximar-se do CEE da INI-R (INMETRO, 2022) provocou a menor eficiência no consumo de energia elétrica e emissões de CO₂ que as demais cidades avaliadas.

5 CONCLUSÃO

A finalidade deste trabalho foi de analisar a influência do uso de tetos frios no comportamento termoenergético de uma edificação unifamiliar térrea, com área equivalente a 46,3m², situada em quatro cidades da região nordeste do Brasil: São Luís/MA, Picos/PI, Recife/PE e Porto Seguro/BA. Foram admitidas variações, tais quais concentram-se no perfil de ocupação, padrão de uso e envoltória. Admitiu-se três perfis de ocupação: perfil conforme NBR 15575-1 (ABNT, 2021), noturno e diurno. No padrão de uso, admitiu-se modelos naturalmente ventilados, operação de carga térmica em regime contínuo e híbrido. Na envoltória, foi selecionado um modelo de telha, comumente empregado no Brasil, e estabelecidos doze cenários variando a taxa de absorvância solar e resistência térmica.

Os resultados englobaram análise do desempenho térmico, análise energética e balanço térmico de superfície, ambos correlatos às simulações computacionais. A análise do desempenho térmico foi fundamentada considerando os parâmetros de temperatura operativa, percentual de horas de ocupação dentro de uma faixa de temperatura operativa (PHFT) e carga térmica para cada cenário de simulação, conforme o procedimento preconizado pela NBR 15575-1 (ABNT, 2021). Na análise energética, investigou-se o potencial de redução nas emissões de CO₂ dos tetos frios em função do consumo de energia elétrica pelo uso de aparelhos de ar-condicionado. O balanço térmico de superfície permitiu uma análise detalhada da eficiência dos tetos frios na redução o calor liberado por radiação de ondas longas.

Não foram identificados cenários nos quais o desempenho do teto frio fosse inferior ao do teto padrão. Para tanto, a eficácia dos tetos frios está associada a sistemas de coberturas com baixo isolamento térmico. Nesse sentido, à medida que o isolamento térmico aumenta, o impacto da absorvância solar do teto sobre o desempenho térmico da unidade habitacional diminui. Os resultados indicaram que todos os parâmetros de desempenho térmico tendem a se aproximar conforme o isolamento térmico da cobertura é incrementado.

Na avaliação do desempenho térmico, os resultados indicaram que o uso de tetos frios melhora o ambiente térmico da unidade habitacional, pois são otimizados os parâmetros de temperatura operativa máxima anual, PHFT_{UH} e carga térmica total. Na temperatura operativa, a maior otimização foi observada nas cidades Picos/PI e Recife/PE, onde identificou-se reduções de 2,1°C, provenientes da diferença entre o

uso de um teto frio de baixa resistência térmica (TF_RT_0,5) com o teto padrão de baixa resistência térmica (TP_RT_0,5). No PHFT_{UH}, os tetos frios (TF_RT_0,5) apresentaram os melhores percentuais, em Recife/PE, por exemplo, pode-se obter PHFT_{UH} superior em 19,8 pontos percentuais se comparado a um teto padrão de baixa resistência térmica (TP_RT_0,5). Nas demais cidades, o acréscimo no PHFT_{UH} pela adoção dos tetos frios variou entre 11,8 e 19,3 pontos percentuais. Os resultados de carga térmica, por sua vez, demonstraram que a solução dos tetos frios tem o potencial de mitigar a quantidade, com relação ao *modelo de referência (MREF)*, em 19% a 35%. A investigação do atendimento à norma de desempenho térmico NBR 15575-1 (ABNT, 2021) conclui que tanto as proposições de tetos frios quanto os tetos frios degradados atendem aos critérios normativos em nível mínimo para todos os cenários de simulação. Entretanto, as proposições de teto padrão com baixa resistência térmica (TP_RT_0,5) nas cidades de Recife/PE e Porto Seguro/BA não atenderam ao nível mínimo de desempenho.

Em complemento à avaliação do desempenho térmico, a análise do impacto do tipo do arquivo climático revelou que a base de dados interfere não somente nos parâmetros de avaliação como no nível de desempenho térmico da unidade habitacional. Em comparação aos resultados obtidos por meio do arquivo climático INMET, os parâmetros apresentados pelo arquivo climático TMYx, com exceção dos resultados de temperatura operativa máxima anual pertinente à cidade Porto Seguro/BA, indicaram valores mais desfavoráveis ao desempenho térmico. Na quantidade de carga térmica, há um incremento médio de 18,8%, 33,7%, 17,4% e 24,8% nas cidades de São Luís/MA, Picos/PI, Recife/PE e Porto Seguro/BA, respectivamente. Entretanto, constatou-se uma melhoria no nível de desempenho térmico, visto que a proposição de teto padrão com baixa resistência térmica (TP_RT_0,5), que anteriormente não atendia ao requisito de desempenho térmico para as cidades de Recife/PE e Porto Seguro/BA, passou a atender em nível mínimo.

Esta análise evidencia que existem discrepâncias notáveis entre tipos de arquivos climáticos que não podem ser subestimadas. Embora o arquivo climático INMET seja o padrão normativo para avaliação de desempenho térmico, a constatação de diferentes resultados fundamentados no tipo de arquivo climático desperta uma necessidade de análise crítica das escolhas metodológicas, uma vez que tais discrepâncias têm a capacidade de impactar o desempenho térmico da unidade habitacional, podendo resultar na aprovação de sistemas construtivos

baseada exclusivamente na alteração do arquivo climático. Adicionalmente, reforça-se a importância da constante atualização e validação dos arquivos climáticos para assegurar estimativas mais realistas em termos de desempenho térmico.

Embora seja uma exigência normativa, a verificação do impacto da modelagem do solo no desempenho térmico demonstrou que a adoção do piso adiabático exerce influência significativa nos parâmetros de avaliação. Tal influência resultou em valores que desfavorecem o desempenho térmico da habitação, dado o aumento na temperatura operativa máxima anual e carga térmica total, além da redução do $PHFT_{UH}$. Atestou-se que a unidade habitacional sofreu aumento na temperatura operativa máxima entre $0,5^{\circ}C$ e $1^{\circ}C$, redução no $PHFT_{UH}$ em até 7 pontos percentuais, já na carga térmica total, houve incrementos que variaram entre 3,1% e 15,8%. Apesar disso, nas variações decorrentes da configuração do piso como adiabático, o desempenho térmico da unidade habitacional se manteve equivalente ao quadro inicial de avaliação (Quadro 1), não apresentando alteração no nível de desempenho térmico para nenhum dos cenários simulados. Logo, a configuração da interação do piso da edificação com o solo, bem como o modelo de cálculo utilizado, resulta em impactos significativos no ambiente térmico da unidade habitacional. Ainda que não tenha sido observada alteração no nível de desempenho térmico da habitação, as variações obtidas nos parâmetros de avaliação não podem ser ignoradas ao ponto de considerar o piso como adiabático.

Os diferentes perfis de ocupação evidenciaram a relevância que a especificação de um perfil típico detém no que se refere ao incremento de carga térmica. Assim sendo, estimativas mais assertivas de carga térmica estão intrinsecamente ligadas à correta caracterização do perfil de ocupação, bem como dos hábitos de uso. Conforme esperado, os padrões de ocupação diurna apresentaram uma demanda de carga térmica superior em relação aos padrões de ocupação noturna e conforme a NBR 15575-1 (ABNT, 2021). Inclusive, independentemente do perfil de ocupação e usos, as proposições de tetos frios representaram os cenários de menor demanda de carga térmica. Registraram-se reduções no intervalo de $52,9kWh/m^2.ano$ a $97,5kWh/m^2.ano$, condicionadas ao clima e perfil de ocupação, mediante a escolha de implementação de tetos frios (TP_RT_0,5) em detrimento do teto padrão (TP_RT_0,5).

Não há dúvidas de que a delimitação precisa do perfil de ocupação e padrão de uso dos aparelhos de ar-condicionado é um grande desafio. Contudo, é crucial

entender que a admissão de um padrão não representativo dos usuários pode acarretar variações significativas na demanda de carga térmica, distanciando-se bastante da realidade. Portanto, compreender estes fatores é fundamental para condução de simulações mais confiáveis.

Relativamente ao sistema de teto padrão, a implementação de tetos frios tem a capacidade de reduzir os fluxos de calor liberados por radiação de ondas longas entre 39% e 52%, sendo estes valores sujeitos à cidade, perfil de ocupação e resistência térmica. Diante disto, os tetos frios revelam um potencial relevante para atenuar impactos ambientais, sobretudo no que diz respeito à ilha de calor urbano.

Na análise das emissões de CO₂, notou-se que, além dos benefícios proporcionados pelos tetos frios na redução das emissões, as características do aparelho utilizado são fundamentais na determinação do consumo de energia elétrica e, por conseguinte, na quantidade de emissões de CO₂ liberadas na atmosfera. Dito isso, a transição de um sistema de teto padrão (TP_RT_0,5) para um teto frio (TF_RT_0,5) resultou em reduções na emissão de CO₂ entre 19,6% e 39,5%. Ao alterar exclusivamente um equipamento com CEE baseado nos valores de referência da INI-R (INMETRO, 2022) para outro com CEE baseado no CSPF, as reduções na emissão de CO₂ variaram entre 4,4% e 59,9%. Vale destacar que, neste cenário, o CEE do aparelho é um fator preponderante na determinação das emissões. Por último, a maior otimização foi alcançada ao alterar um sistema de teto padrão (TP_RT_0,5), com CEE do aparelho baseado nos valores de referência da INI-R (INMETRO, 2022), para um teto frio (TF_RT_0,5) combinado ao aparelho com CEE baseado no CSPF, sendo alcançadas reduções na emissão de CO₂ de 30,5% a 73,1%. Ressalta-se que essas interferências estão sujeitas às variáveis adotadas nesse trabalho, tais como o clima, perfil de ocupação, usos e CEE do equipamento.

O método de determinação do consumo energético, que leva em conta o CEE do equipamento baseado no CSPF, sugere que a determinação do consumo energético através do CEE do equipamento fundamentado no índice IDRS, amplamente disponível no mercado brasileiro para os consumidores, pode ser enganosa. Isso ocorre porque CEE fixos podem mascarar a realidade dos resultados de consumo energético, enquanto ao calcular o consumo energético considerando CEE do equipamento baseado no CSPF, é possível perceber que o equipamento pode perder eficiência considerável quando acionado durante o dia e apresentar maior eficiência quando acionado durante a noite, conforme observado na cidade de

Picos/PI. Portanto, dependendo das condições climáticas, a eficiência do equipamento pode não ser satisfatória durante determinados períodos e a escolha do mesmo deve considerar esses aspectos.

De maneira geral, os resultados atingidos para os tetos frios degradados indicaram que o sistema obtém uma boa performance, demonstrando que, mesmo o teto frio em condições degradadas, estes ainda apresentam resultados eficientes quando comparados ao sistema de teto padrão.

Por fim, este trabalho apresenta uma contribuição no âmbito dos tetos frios. O método empregado é reprodutível e aplicável em diferentes contextos. Sustenta-se que os tetos frios são soluções eficazes em termos de otimização termoenergética da unidade habitacional, bem como atenuação de efeitos ambientais, sobretudo, em uma região como o nordeste do Brasil que detém cidades de climas quentes, com altas temperaturas do ar e radiação solar intensa durante todo o ano. No contexto climático do Nordeste brasileiro, evidenciou-se o potencial dessa solução, uma vez que, diferentemente de outras condições climáticas, por não haver necessidade de aquecimento nos ambientes de permanência prolongada, não há penalidades na carga térmica da unidade habitacional. Ademais, constatou-se que, em nenhuma hipótese de simulação, as proposições de tetos frios foram menos eficientes que as de teto padrão. Ainda mais, em circunstâncias que não requerem alto isolamento térmico no sistema de cobertura. Sob tais condições, o teto frio se apresenta como uma boa alternativa para melhoria do desempenho térmico de unidades habitacionais unifamiliares.

5.1 LIMITAÇÕES DESTE TRABALHO

Ressalta-se a importância de esclarecer algumas limitações que contemplam este trabalho:

- Os resultados são característicos para as cidades avaliadas: São Luís/MA, Picos/PI, Recife/PE e Porto Seguro/BA;
- Os resultados se limitam a um modelo computacional de uma edificação unifamiliar térrea, sem sombreamento de vizinhança;
- As intervenções na envoltória foram direcionadas exclusivamente ao sistema de cobertura, promovendo alterações na absorvância solar externa e na resistência térmica, não sendo contemplado alterações na

capacidade térmica e nas propriedades dos vidros, sistemas de piso e de vedações verticais;

- Os procedimentos e padrões utilizados podem não ser representativos para outras localidades.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A seguir, sugere-se algumas recomendações para trabalhos futuros:

- Ampliar a análise, por meio de linguagem computacional, incluindo um maior número de cidades brasileiras;
- Reproduzir o método para tipologias de edifícios comerciais e edifícios industriais de um pavimento;
- Analisar diferentes composições de envoltória;
- Considerar o efeito dos diferentes modelos calibrados por Amorim *et al.* (2023) de ondas longas do EnergyPlus no desempenho dos tetos frios.

REFERÊNCIAS

ADITYA, L.; MAHLIA, T. M. I.; RISMANCHI, B.; NG, H. M.; HASAN, M. H.; METSELAAR, H. S. C.; MURAZA, OKI.; ADITIYA, H. B. A review on insulation materials for energy conservation in buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. v. 73, p. 1352-1365, 2017. ISSN 1364-0321. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.034>.

AKBARI, H.; LEVINSON, R.; RAINER, L. Monitoring the energy-use effects of cool roofs on California commercial buildings. *Energy and Buildings*. v. 37, p. 1007-1016. 2005. ISSN 0378-7788. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.11.013>.

AKBARI, H.; XU, T.; TAHA, H.; WRAY, C.; SATHAYE, J. Using Cool Roofs to Reduce Energy Use, Greenhouse Gas Emissions, and Urban Heat-Island Effects: Findings from an India Experiment. Estados Unidos, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.2172/1026804>.

AKBARI, H.; MATTHEWS, H.D. Global cooling updates: Reflective roofs and pavements. *Energy and Buildings*. v. 55, p. 2-6, 2012. ISSN 0378-7788. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.02.055>.

ALVARES, C. A; STAPE, J. L; SENTELHAS, P. C; GONÇALVES, J. L. M; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

Amorim, R. P. L.; Melo, A. P.; Mantelli Neto, S. L.; Lamberts, R. Sky emissivity model calibration with data from Brazil and building simulation sensitivity analysis. *Solar Energy*. v. 263. 2023. ISSN 0038-092X. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.111963>.

ANDROUTSOPOULOS, A. V.; STAVRAKAKIS, G. M.; DAMASIoTIS, M. Cool Roof Impacts on a School-building Thermal and Energy Performance in Athens, Greece. *Procedia Environmental Sciences*. v. 38, p. 178-186. 2017. ISSN 1878-0296. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2017.03.103>.

ANH, L. D. H.; PÁSZTORY, Z. An overview of factors influencing thermal conductivity of building insulation materials. *Journal of Building Engineering*. V. 44. 2021. ISSN 2352-7102. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102604>.

ASCIONE, F.; BIANCO, N.; MASI, R. F.; MASTELLONE, M.; MAURO, G. M.; VANOLI, G. P. The role of the occupant behavior in affecting the feasibility of energy refurbishment of residential buildings: Typical effective retrofits compromised by typical wrong habits. *Energy and Buildings*. v. 223. 2020. ISSN 0378-7788. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110217>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 15.220-2: Desempenho térmico de edificações: Parte 2: Componentes e elementos construtivos das edificações — Resistência e transmitância térmica — Métodos de cálculo (ISO 6946:2017 MOD). Rio de Janeiro, 2022.

_____. NBR 15.220-3: Desempenho térmico de edificações: Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro, 2005.

_____. NBR 15.575: Edificações habitacionais - Desempenho. Rio de Janeiro, 2021.

_____. NBR 15.575: Edificações habitacionais – Desempenho. Parte 1: Requisitos gerais. NBR 15575-1. Rio de Janeiro, 2021.

_____. NBR 15.575: Edificações habitacionais – Desempenho. Parte 1-1: Base-padrão de arquivos climáticos para a avaliação do desempenho térmico por meio do procedimento de simulação computacional. NBR 15575-1-1. Rio de Janeiro, 2021.

ASHRAE, American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineering (ANSI/ASHRAE). *Advanced energy design guide for small to medium office buildings: Achieving Zero Energy*. Atlanta (GA): American Society of Heating, Refrigerating, and Air- Conditioning Engineers, Inc. 2019.

_____. ANSI/ASHRAE Standard 169-2021 Climatic Data for Building Design Standards. 2021.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. E1980-11: Standard Practice for Calculating Solar Reflectance Index of Horizontal and Low-Sloped Opaque Surfaces. ASTM International, 2011.

BERDAHL, P.; MARTIN, M. Emissivity of clear skies. *Solar Energy*. 1984. v. 32, p. 663–664. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(84\)90144-0](https://doi.org/10.1016/0038-092X(84)90144-0).

BOIXO, S.; DIAZ-VICENTE, M.; COLMENAR, A.; CASTRO, M. A. Potential energy savings from cool roofs in Spain and Andalusia. *Energy*. v. 38, p. 425-438, 2012. ISSN 0360-5442. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.11.009>.

BRANDER, M.; SOOD, A.; WYLIE, C.; HAUGHTON, A.; LOVEL, J. Technical Paper Electricity-Specific Emission Factors for Grid Electricity. 2011. Disponível em: <http://ecometrica.com/assets/Electricity-specific-emission-factors-for-grid-electricity.pdf>. Acesso em 11 abr. 2024.

BRASIL. Lei nº. 8.078, de 11 de setembro de 1990. Código de Defesa do Consumidor. Dispõe sobre a proteção do consumidor e dá outras providências. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/L8078.htm. Acesso em 23 fev. 2023.

BRUNA, C. R., SOUZA, H. A., GOMES, A. P., CRISTELI, P. S. Análise da influência do solo no desempenho térmico de ambientes subterrâneos em uma edificação térrea. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 17., 2018, Foz do Iguaçu. Anais... Porto Alegre: ANTAC, 2018.

Brunt, D. Notes on radiation in the atmosphere. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. v. 58, p.389-420. 1932. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/qj.49705824704>.

COSTANZO, V.; EVOLA, G.; MARLETTA, L. Cool roofs for passive cooling: performance in different climates and for different insulation levels in Italy. *Advances*

in *Building Energy Research*. v. 7, p. 155-169. 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/17512549.2013.865556>.

COSTANZO, V.; EVOLA, G.; MARLETTA, L. Energy savings in buildings or UHI mitigation? Comparison between green roofs and cool roofs. *Energy and Buildings*. v. 114, p. 247-255, 2016. ISSN 0378-7788. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.04.053>.

Clark, G.; Allen, C. The estimation of atmospheric radiation for clear and cloudy skies. 1978. In: Proc. 2nd National Passive Solar Conference (AS/ISES), Philadelphia.

DOE – UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY. EnergyPlus: Version 22.2.0. Disponível em: <https://energyplus.net/>. Acesso em: 11 jan. 2023.

_____. Getting Started – EnergyPlus™ Version 22.2.0 Documentation. 2022.

DORNELLES, K. A. Absortância solar de superfícies opacas: métodos de determinação e base de dados para tintas látex acrílica e PVA. Orientador: Dr. Maurício Roriz. 2008. 160 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008. f. 30.

D&S. DEVICES AND SERVICES COMPANY. AE1 & RD1. 2020. Disponível em: <https://www.devicesandservices.com/prod03.htm>. Acesso em: 02 dez. 2022.

EIA, U.S. Energy Information Administration. In 2020, 27% of U.S. households had difficulty meeting their energy needs. 2022. Disponível em: <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=51979>. Acesso em 10 jan. 2022.

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 DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2019, João Pessoa. Anais... Porto Alegre: ANTAC, 2019.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Consumo Mensal de Energia Elétrica por Classe (regiões e subsistemas). Rio de Janeiro: EPE, 2023. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/consumo-de-energia-eletrica>. Acesso em: 07 jan. 2023.

FERNANDES, M. S.; RODRIGUES, E.; GASPAR, A. R.; COSTA, J. J.; GOMES, A. The impact of thermal transmittance variation on building design in the Mediterranean region. *Applied Energy*. v. 239, p. 581-597. 2019. ISSN 0306-2619. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.239>.

GARG, V.; SOMAL, S.; ARUMUGAM, R.; BHATIA, A. Development for cool roof calculator for India. *Energy and Buildings*. v. 114, p. 136-142. 2016. ISSN 0378-7788. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.022>.

GENTLE, A.R.; AGUILAR, J.L.C.; SMITH, G.B. Optimized cool roofs: Integrating albedo and thermal emittance with R-value. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. v. 95, p. 3207-3215, 2011. ISSN 0927-0248. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2011.07.018>. 2011, 95, 3207–3215.

GE, J.; LI, S.; CHEN, S.; WANG, X.; JIANG, Z.; SHEN, C. Energy-efficiency strategies of residential envelope in China's Hot Summer–Cold Winter Zone based on intermittent thermal regulation behaviour. *Journal of Building Engineering*. v. 44. 2021. ISSN 2352-7102. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103028>.

HONG, C.; YANG, Y.; GE, S.; CHAI, G.; ZHAO, P.; SHUI, Q.; GU, Z. Is the design guidance of color and material for urban buildings a good choice in terms of thermal performance?. *Sustainable Cities and Society*. v. 83, 2022. ISSN 2210-6707. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103927>.

IDSO, S. B. A set of equations for full spectrum and 8- to 14- μm and 10.5- to 12.5- μm thermal radiation from cloudless skies. *Water Resources Research*. 1981. v. 17, p. 295–304. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/WR017i002p00295>.

IEA, INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. World Energy Balances, 2022. Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/world-energy-balances>. Acesso em 05 jan. 2023.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA (INMETRO). Portaria Nº 309, de 6 de setembro de 2022. Aprova as Instruções Normativas e os Requisitos de Avaliação da Conformidade para a Eficiência Energética das Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas e Residenciais – Consolidado. 2022. Disponível em: http://www.inmetro.gov.br/LEGISLACAO/detalhe.asp?seq_classe=1&seq_ato=2989. Acesso em 25 mar. 2023.

_____. Condicionadores de ar: condicionadores-de-ar-indices-novos-IDRS_2023-08-02 v2. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/inmetro/pt-br/assuntos/avaliacao-da-conformidade/programa-brasileiro-de-etiquetagem/tabelas-de-eficiencia-energetica/condicionadores-de-ar>. Acesso em 09 set. 2023.

JAZAERI, J.; GORDON, R. L.; ALPCAN, T. Influence of building envelopes, climates, and occupancy patterns on residential HVAC demand. *Journal of Building Engineering*. v. 22, p. 33-47. 2019. ISSN 2352-7102. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2018.11.011>.

KAMIMURA, A.M.; RUPP, R.F.; FOSSATI, M.; LAMBERTS, R. Fatores de conversão de energia elétrica e térmica em energia primária e em emissões de dióxido de carbono a serem usados na etiquetagem de nível de eficiência energética de edificações. CB3E, 2020. Disponível em: http://www.pbgedifica.com.br/sites/default/files/Relatorio-atualizado-fatores_energia-primaria_CO2_28_11_2020.pdf. Acesso em 24 mar. 2023.

KOLOKOTRONI, M.; GOWREESUNKER, B. L.; GIRIDHARAN, R. Cool roof technology in London: An experimental and modelling study. *Energy and Buildings*. v. 67, p. 658-667. 2013. ISSN 0378-7788. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.07.011>.

KOLOKOTRONI, M.; SHITTU, E.; SANTOS, T.; RAMOWSKI, L.; MOLLARD, A.; ROWE, K.; WILSON, E.; BRITO FILHO, J. P.; NOVIETO, D. Cool roofs: High tech low cost solution for energy efficiency and thermal comfort in low rise low income houses in high solar radiation countries. *Energy and Buildings*. v. 176, p. 58-70. 2018. ISSN 0378-7788. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.07.005>.

KOLOKOTSA, D.; DIAKAKI, C.; PAPANTONIOU, S.; VLISSIDIS, A. Numerical and experimental analysis of cool roofs application on a laboratory building in Iraklion, Crete, Greece. *Energy and Buildings*. v. 55, p. 85-93. 2012. ISSN 0378-7788. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.09.011>.

KUMAR, D.; ALAM, M.; ZOU, P. X. W.; SANJAYAN, J. G.; MEMON, R. A. Comparative analysis of building insulation material properties and performance. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. v. 131. 2020. ISSN 1364-0321. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110038>.

LAPISA, R.; BOZONNET, E.; ABADIE, M. O.; SALAGNAC, P. Cool roof and ventilation efficiency as passive cooling strategies for commercial low-rise buildings – ground thermal inertia impact. *Advances in Building Energy Research*. v. 7, p. 192-208. 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/17512549.2013.865559>.

LAWRIE, LINDA; CRAWLEY, D. B. 2022. Development of Global Typical Meteorological Years (TMYx). Disponível em: https://climate.onebuilding.org/WMO_Region_3_South_America/BRA_Brazil/index.html. Acesso em 11 jan. 2023.

LEI, J.; YANG, J.; YANG, E. Energy performance of building envelopes integrated with phase change materials for cooling load reduction in tropical Singapore. *Applied Energy*. v. 162, p. 207-217, 2016. ISSN 0306-2619. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.10.031>.

LUCERO-ÁLVAREZ, J.; RODRÍGUEZ-MUÑOZ, N. A.; MARTÍN-DOMÍNGUEZ, I. R. The Effects of Roof and Wall Insulation on the Energy Costs of Low Income Housing in Mexico. *Sustainability*. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su8070590>.

NEW, J.; MILLER, W. A.; HUANG, YU (JOE); LEVINSON, R. Comparison of software models for energy savings from cool roofs. *Energy and Buildings*. v. 114, p. 130-135, 2016. ISSN 0378-7788. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.020>.

PROGRAMA BRASILEIRO DE ETIQUETAGEM DE EDIFICAÇÕES (PBE EDIFICA). Interface Web para a determinação do IDRS e CSPF. (s.d). Disponível em: <https://pbeedifica.com.br/cspf/>.

PISELLI, C.; SAFFARI, M.; GRACIA, A.; PISELLO, A. L.; COTANA, F.; CABEZA L. F. Optimization of roof solar reflectance under different climate conditions, occupancy, building configuration and energy systems. *Energy and Buildings*. v. 151, p. 81-97, 2017. ISSN 0378-7788. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.06.045>.

PISELLO, A. L.; SANTAMOURIS, M.; COTANA, F. Active cool roof effect: impact of cool roofs on cooling system efficiency. *Advances in Building Energy Research*. v. 7, p. 209-221. 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/17512549.2013.865560>.

PISELLO, A. L.; COTANA, F. The thermal effect of an innovative cool roof on residential buildings in Italy: Results from two years of continuous monitoring. *Energy and Buildings*. v. 69, p. 154-164. 2014. ISSN 0378-7788. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.10.031>.

PYRGOU, A.; CASTALDO, V. L.; PISELLO, A. L.; COTANA, F.; SANTAMOURIS, M. Differentiating responses of weather files and local climate change to explain variations in building thermal-energy performance simulations. *Solar Energy*. v. 153, p. 224-237. 2017. ISSN 0038-092X. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.05.040>.

RAWAT, M.; SINGH, R. N. A study on the comparative review of cool roof thermal performance in various regions. *Energy and Built Environment*. v. 3, p. 327-347. 2022. ISSN 2666-1233. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2021.03.001>.

REPUBBLICA ITALIANA. Ministro Dello Sviluppo Economico. Decreto interministeriale del 26 giugno 2015 - Applicazione delle metodologie di calcolo delle

prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici, 2015. Disponível em: <https://www.mise.gov.it/it/normativa/decreti-interministeriali/decreto-interministeriale-26-giugno-2015-applicazione-delle-metodologie-di-calcolo-delle-prestazioni-energetiche-e-definizione-delle-prescrizioni-e-dei-requisiti-minimi-degli-edifici>. Acesso em 01 de fev. 2023.

ROMEO, C.; ZINZI, M. Impact of a cool roof application on the energy and comfort performance in an existing non-residential building. A Sicilian case study. *Energy and Buildings*. v. 67, p. 647-657. 2013. ISSN 0378-7788. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.07.023>.

SALAMANCA, F.; GEORGESCU, M.; MAHALOV, A.; MOUSTAOU, M.; MARTILLI, A. Citywide Impacts of Cool Roof and Rooftop Solar Photovoltaic Deployment on Near-Surface Air Temperature and Cooling Energy Demand. *Boundary-Layer Meteorology*. v. 161, p. 203–221. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10546-016-0160-y>.

SANTOS, A.C.; LIMA, J.V.S.; J.R.G.; M.S.G.C. Uso do EnergyPlus em pesquisas brasileiras. XVII ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO – ENTAC 2018. Foz do Iguaçu, 2018.

SCHIAVONI, S.; D’ALESSANDRO, F.; BIANCHI, F.; ASDRUBALI, F. Insulation materials for the building sector: A review and comparative analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. v. 62, p. 988-1011. 2016. ISSN 1364-0321. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.045>.

SEIFHASHEMI, M.; CAPRA, B. R.; MILLER, W.; BELL J. The potential for cool roofs to improve the energy efficiency of single storey warehouse-type retail buildings in Australia: A simulation case study. *Energy and Buildings*. v. 158, p. 1393-1403, 2018. ISSN 0378-7788. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.11.034>.

SHI, Z.; ZHANG, X. Analyzing the effect of the longwave emissivity and solar reflectance of building envelopes on energy-saving in buildings in various climates. *Solar Energy*. v. 85, p. 28–37. 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2010.11.009>.

SHIRAKAWA, M. A.; MARINOSKI, D. L.; MARQUES, S. A.; LOH, K.; LAMBERTS, R.; MAESTRI, A.; JOHN, V. Superfícies Frias - agregando valor à cadeia de tintas e telhados pela eficiência energética de edifícios. In: Congresso Internacional de Tintas - ABRAFATI 2017, 2017, São Paulo - SP. Anais, 2017.

SILVA, M. P.; MARINOSKI, D. L.; GÜTHS, S. Avaliação de telhados cerâmicos de alta refletância solar através de simulação termoenergética e análise econômica em uma residência unifamiliar. In: Anais do XVIII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Porto Alegre, Brasil, 2020a.

SILVA, M.P.; MARINOSKI, D.L.; GÜTHS, S. Simulação termoenergética e análise econômica do uso de telhados de fibrocimento de alta refletância solar em uma residência unifamiliar. In: Anais do XVIII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Porto Alegre, Brasil, 2020b.

SPROUL, J.; WAN, M. P.; MANDEL, B. H.; ROSENFELD, A. H. Economic comparison of white, green, and black flat roofs in the United States. *Energy and Buildings*. v. 71, p. 20-27. 2014. ISSN 0378-7788. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.11.058>.

STAVRAKAKIS, G.M.; ANDROUTSOPOULOS, A.V.; VYÖRYKKÄ, J. Experimental and numerical assessment of cool-roof impact on thermal and energy performance of a school building in Greece. *Energy and Buildings*. v. 130, p. 64-84. 2016. ISSN 0378-7788. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.08.047>.

SYNNEFA, A.; SANTAMOURIS, M.; APOSTOLAKIS, K. On the development, optical properties and thermal performance of cool colored coatings for the urban environment. *Solar Energy*, v. 81, p. 488-497, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2006.08.005>.

TESTA, J.; KRARTI, M. A review of benefits and limitations of static and switchable cool roof systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. v. 77, p. 451-460. 2017. ISSN 1364-0321. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.030>.

TZEMPELIKOS, A.; LEE, S. Cool Roofs in the US: The Impact of Roof Reflectivity, Insulation and Attachment Method on Annual Energy Cost. *Energies*. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en14227656>.

XING, L. Estimations of undisturbed ground temperatures using numerical and analytical modeling. 2014. Tese (Doutorado), Oklahoma State University, Stillwater, 2014.

XU, T.; SATHAYE, J.; AKBARI, H.; GARG, V.; TETALI, S. Quantifying the direct benefits of cool roofs in an urban setting: Reduced cooling energy use and lowered greenhouse gas emissions. *Building and Environment*. v. 48, p. 1-6. 2012. ISSN 0360-1323. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.08.011>.

YEW, M. C.; YEW, M. K.; SAW, L. H.; DURAIRAJ, R. Integration of active and passive cool roof system for attic temperature reduction. in: *AIP Conference Proceedings*. v. 1828. Perak, Malásia, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1063/1.4979394>.

YILDIZ, Y.; ARSAN, Z. D. Identification of the building parameters that influence heating and cooling energy loads for apartment buildings in hot-humid climates. *Energy*. v. 36, p. 4287-4296. 2011. ISSN 0360-5442. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.04.013>.

ZINGRE, K. T.; YANG, X.; WAN, M. P. Performance Analysis of Cool Roof, Green Roof and Thermal Insulation on a Concrete Flat Roof in Tropical Climate. *Evergreen*. v. 2, p. 34-43. 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.5109/1544078>.

ZINGRE, K. T.; WAN, M. P.; TONG, S.; LI, H.; CHANG, V. W. C.; WONG, S. K.; TOH, W. B. T.; LEE, I. Y. L. Modelling of cool roof heat transfer in tropical climate. *Renewable Energy*. v. 75, p. 210-223. 2015a. ISSN 0960-1481. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.09.045>.

ZINGRE, K. T.; WAN, M. P.; WONG, S. K.; TOH, W. B. T.; LEE, I. Y. L. Modelling of cool roof performance for double-skin roofs in tropical climate. *Energy*. v. 82, p. 813-

826. 2015b. ISSN 0360-5442. Disponível em:
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.01.092>.