



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

Clara Zibetti Matuella Veiga

O impacto da envoltória no desempenho térmico de uma HIS:

Avaliação das exigências da portaria MCID nº 725/2023

Florianópolis
2025

Clara Zibetti Matuella Veiga

O impacto da envoltória no desempenho térmico de HIS:

Avaliação das exigências da portaria MCID n° 725/2023

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

Orientadora: Prof^a. Ana Paula Melo, Dra.

Florianópolis

2025

Veiga, Clara Zibetti Matuella

O impacto da envoltória no desempenho térmico de uma
HIS : Avaliação das exigências da portaria MCID n°
725/2023 / Clara Zibetti Matuella Veiga ; orientadora, Ana
Paula Melo, 2025.

128 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil, Florianópolis, 2025.

Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. Habitações de interesse social.
3. Desempenho térmico. 4. Envoltória. 5. Simulação
Computacional. I. Melo, Ana Paula. II. Universidade
Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil. III. Título.

Clara Zibetti Matuella Veiga

O impacto da envoltória no desempenho térmico de HIS:

Avaliação das exigências da portaria MCID nº 725/2023

O presente trabalho em nível de Mestrado foi avaliado e aprovado, em 12 de setembro de 2025, pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Roberto Lamberts, PhD

Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)

Profª. Letícia de Oliveira Neves Dra.

Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)

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



Documento assinado digitalmente
Rafael Holdorf Lopez
Data: 28/11/2025 13:27:24-0300
CPF: ***.262.979-**
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Coordenação do Programa de Pós-Graduação



Documento assinado digitalmente
Ana Paula Melo
Data: 27/11/2025 17:45:26-0300
CPF: ***.918.339-**
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Profª. Ana Paula Melo, Dra.

Orientadora

Florianópolis, 2025.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, por tornarem possível minha chegada até aqui, por me ensinarem a importância da luta pela democratização do conhecimento e acreditarem em mim e nos meus ideais (mesmo que, às vezes, utópicos). Por me mostrarem que a vida é muito mais que dinheiro trabalho.

À minha irmã Júlia, por ser minha maior companheira e defensora, estando comigo em cada mínima etapa de todo esse processo. Nós por nós, after all.

Ao meu irmãozinho Pedro, por me ensinar tanto todos os dias e me incentivar a ir atrás daquilo que quero. Amo até nossas diferenças.

À Pulga, pelas noites do pijama diárias e por ser minha melhor amiga.

Às minhas amigas da vida Nathália e Marcela, pelas risadas, papos profundos e fofocas. O que é uma dissertação perto dos nossos dramas semanais?

Aos meus amigos Deschs, Ingryd, Larissa, Agatha, Tuilopesz, Sabrina, e todos que, de alguma forma, contribuíram com um papo, uma cerveja ou um puxão de orelha para que eu finalizasse mais essa etapa.

À profª Ana, pela orientação e paciência.

Ao LabEEE e aos LabEEErs, pelos anos de trocas valiosas.

À UFSC, universidade pública e de excelência, por me acolher com tanto carinho há quase dez anos, da qual tenho orgulho de ter feito parte.

RESUMO

O Brasil enfrenta hoje um déficit habitacional de mais de seis milhões de moradias. Para suprir este déficit, foram realizadas tentativas governamentais ao longo dos anos, culminando no programa Minha Casa, Minha Vida (MCMV), vigente desde 2009. Apesar da satisfação geral dos beneficiários, as habitações apresentam problemas que comprometem a qualidade de vida dos usuários. Diante disso, a Portaria MCID nº 725/2023 estabeleceu requisitos obrigatórios para os projetos dessas moradias. Este trabalho teve como objetivo avaliar o impacto da envoltória no desempenho térmico de uma habitação de interesse social de tipologia geminada, conforme as exigências da referida portaria. Para isso, foram simuladas variações nos parâmetros da envoltória indicados pela portaria - pé-direito, absorvância, veneziana e varanda -, analisados isoladamente e em combinações, que resultaram nos modelos obrigatório e otimizado, comparados a um modelo de referência. A modelagem da varanda foi realizada com base em duas abordagens distintas previamente analisadas, permitindo selecionar a que melhor representa o sombreamento da solução adotada. As simulações foram realizadas para as cidades de Curitiba e São Luís, considerando as orientações solares norte e oeste, e uma unidade habitacional localizada no térreo e outra na cobertura. Foram utilizados os indicadores da NBR 15575:2021 para avaliação do desempenho térmico. Os resultados mostram que a absorvância solar exerceu o maior impacto na carga térmica, elevando o nível de desempenho térmico de mínimo para superior em São Luís, reduzindo a carga térmica em 47% e aumentando PHFT em quase 60% na unidade da cobertura orientada a oeste, com relação ao caso de referência. A presença e a profundidade da varanda também melhoraram os indicadores, especialmente na unidade térrea orientada a norte em São Luís, com aumento de aproximadamente 10 pontos percentuais no PHFT. O impacto das venezianas foi mínimo, com pouca redução de carga térmica em todos os casos. Já o aumento do pé-direito para 2,6 m não apresentou resultados significativos. A combinação dos parâmetros no modelo obrigatório, conforme a Portaria MCID nº 725/2023, elevou o nível de desempenho para superior em todos os casos para São Luís. O modelo otimizado ampliou esses ganhos, reduzindo a carga térmica em até 85% e aumentando o PHFT em mais de 57% quando comparado ao caso de referência. Em Curitiba, onde o clima é mais ameno, o modelo otimizado reduziu a carga térmica em 46% e a temperatura máxima em mais de 6 °C na unidade da cobertura orientada a oeste. Em resumo, a Portaria MCID nº 725/2023 representa um avanço importante para o desempenho térmico das habitações de interesse social, sobretudo em climas quentes e úmidos. Pequenas alterações adicionais, com baixo custo, podem ampliar os benefícios energéticos, promovendo a otimização dos projetos para diferentes condições climáticas no Brasil.

Palavras-chave: Envoltória; Desempenho térmico; Simulação computacional; Habitações de interesse social.

ABSTRACT

Brazil currently faces a housing deficit of more than six million homes. To address this deficit, various government initiatives have been implemented over the years, culminating in the Minha Casa, Minha Vida (MCMV) program, in place since 2009. Despite the general satisfaction of beneficiaries, the housing units present issues that compromise users' quality of life. In response, MCID Ordinance No. 725/2023 established mandatory requirements for the design of these dwellings. This study aimed to evaluate the impact of the building envelope on the thermal performance of a semi-detached social housing unit, in accordance with the requirements of the aforementioned regulation. To this end, variations in the envelope parameters indicated by the regulation - ceiling height, solar absorptance, shutters, and balcony - were simulated, both individually and in combination, resulting in the mandatory and optimized models, which were compared to a reference model. The balcony modeling was carried out based on two previously analyzed approaches, allowing the selection of the one that best represents the shading of the adopted solution. The simulations were conducted for the cities of Curitiba and São Luís, considering north and west-facing orientations, and evaluating one unit on the ground floor and another on the top floor. The thermal performance indicators from NBR 15575:2021 were used in the assessment. The results show that solar absorptance had the greatest impact on thermal load, increasing the thermal performance level from minimum to superior in São Luís, reducing thermal load by 47%, and increasing PHFT by nearly 60% in the top-floor west-facing unit, compared to the reference case. The presence and depth of the balcony also improved performance indicators, especially in the north-facing ground-floor unit in São Luís, with an increase of approximately 10 percentage points in PHFT. The impact of shutters was minimal, with little reduction in thermal load in all cases. Increasing the ceiling height to 2.6 m did not produce significant results. Combining the parameters in the mandatory model, as required by MCID Ordinance No. 725/2023, raised the performance level to superior in all cases for São Luís. The optimized model further enhanced these gains, reducing thermal load by up to 85% and increasing PHFT by more than 57% compared to the reference case. In Curitiba, where the climate is milder, the optimized model reduced thermal load by 46% and the maximum temperature by more than 6 °C in the top-floor west-facing unit. In summary, MCID Ordinance No. 725/2023 represents an important advancement for the thermal performance of social housing, especially in hot and humid climates. Small additional, low-cost adjustments can further amplify the energy benefits, promoting the optimization of housing designs for different climatic conditions across Brazil.

Keywords: Building envelope; Thermal performance; Building simulation; Social housing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tipologia dos empreendimentos do programa MCMV	18
Figura 2 - Resumo dos procedimentos de avaliação do desempenho térmico	33
Figura 3 - Padrão de ocupação dos APP	36
Figura 4 - Padrão de iluminação dos APP.	38
Figura 5 - Padrão de uso de equipamentos nos APP.	38
Figura 6 - Fluxo de calor entre a laje e o solo.	40
Figura 7 - Esquema metodológico	52
Figura 8 - Comparação entre variáveis dos arquivos climáticos de São Luís	54
Figura 9 - Comparação entre variáveis dos arquivos climáticos de Curitiba	54
Figura 10 - Temperatura de bulbo seco média anual	56
Figura 11 - Planta baixa do pavimento térreo da edificação (sem varanda)	58
Figura 12 - Modelo de referência	59
Figura 13 - “Modelo shade” 3D de simulação	61
Figura 14 - “Modelo ZT” 3D de simulação	62
Figura 15 - Unidades habitacionais analisadas	69
Figura 16 - Orientações solares adotadas	69
Figura 17 - Localização da porta-janela e da abertura da varanda na UH	74
Figura 18 - Temperatura operativa da sala para diferentes formas de configuração do coeficiente de pressão do vento	75
Figura 19 - Fluxo de calor por condução na parede limite entre a sala e a varanda	77
Figura 20 - Radiação solar transmitida pela porta-janela da varanda	78
Figura 21 - Temperatura interna média da sala	80
Figura 22 - Resultados de PHFT e CgTT para a cidade de Curitiba	82
Figura 23 - Resultados de Tomáx e Tomín para a cidade de Curitiba	82
Figura 24 - Resultados de PHFT e CgTT para a cidade de São Luís	83
Figura 25 - Resultados de Tomín e Tomáx para a cidade de São Luís	83
Figura 26 - Resultados de CgTT para a cidade de Curitiba – orientação Norte	86
Figura 27 - Resultados de PHFT para a cidade de Curitiba – orientação Norte	87
Figura 28 - Resultados de CgTT para a cidade de Curitiba – orientação Oeste	87
Figura 29 - Resultados de PHFT para a cidade de Curitiba – orientação Oeste	88
Figura 30 - Resultados de CgTT para a cidade de São Luís – orientação Norte	89
Figura 31 - Resultados de PHFT para a cidade de São Luís – orientação Norte	90

Figura 32 - Resultados de CgTT para a cidade de São Luís – orientação Oeste	90
Figura 33 - Resultados de PHFT para a cidade de São Luís – orientação Oeste	91
Figura 34 - Resultados de CgTT e PHFT para a UH térrea - Curitiba	92
Figura 35 - Resultados de Tomáx e Tomín para a UH térrea - Curitiba	93
Figura 36 - Resultados de CgTT e PHFT para a UH da cobertura - Curitiba	94
Figura 37 - Resultados de Tomáx e Tomín para a UH da cobertura - Curitiba	95
Figura 38 - Resultados de CgTT e PHFT para a UH térrea – São Luís	96
Figura 39 - Resultados de Tomáx e Tomín para a UH térrea – São Luís	96
Figura 40 - Resultados de CgTT e PHFT para a UH da cobertura –São Luís	98
Figura 41 - Resultados de Tomáx e Tomín para a UH da cobertura –São Luís	98
Figura 42 - Resultados de CgTT e PHFT para os modelos obrigatório e otimizado - Curitiba	101
Figura 43 - Resultados de Tomáx e Tomín para os modelos obrigatório e otimizado - Curitiba	101
Figura 44 - Resultados de CgTT para a cidade de Curitiba	102
Figura 45 - Resultados de PHFT para a cidade de Curitiba	102
Figura 46 - Resultados de CgTT e PHFT para os modelos obrigatório e otimizado - São Luís	104
Figura 47 - Resultados de Tomáx e Tomín para os modelos obrigatório e otimizado - São Luís	104
Figura 48 - Resultados de CgTT para a cidade de São Luís	106
Figura 49 - Resultados de PHFT para a cidade de São Luís	106

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Indicadores de desempenho utilizados	70
Quadro 2 - Dados de saída utilizados para o “modelo shade”	72
Quadro 3 - Dados de saída utilizados para o “modelo ZT”	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades dos materiais construtivos	35
Tabela 2 - Intervalos de temperatura externa de bulbo seco	44
Tabela 3 - Dimensões dos elementos transparentes	59
Tabela 4 - Dados de entrada para o vidro no “modelo ZT”	63
Tabela 5 - Configuração do modelo obrigatório	66
Tabela 6 - Tarifas de energia elétrica	68
Tabela 7 - Resultados dos indicadores de desempenho térmico	81
Tabela 8 – Comparação entre indicadores de desempenho em relação ao modelo de referência	81
Tabela 9 - Configuração dos modelos paramétricos	86
Tabela 10 - Parâmetros utilizados nos modelos	100

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
APP	Ambiente de Permanência Prolongada
APT	Ambiente de Permanência Transitória
BNH	Banco Nacional de Habitações
CgTT	Carga Térmica Total
DPI	Densidade de Potência Instalada
FGTS	Fundo de Garantia por Tempo de Serviço
FNH	Sistema de Financiamento de Habitações
HIS	Habitação de Interesse Social
IDF	Input Data File
MCID	Ministério das Cidades
MCMV	Minha Casa, Minha Vida
NBR	Norma Brasileira
PAC	Programa de Aceleração do Crescimento
PAIH	Plano de Ação Imediata para a Habitação
PAR	Programa de Arrendamento Residencial
PHFT	Percentual de Horas ocupadas dentro de uma Faixa de Temperatura operativa
REF	Referência
SNH	Sistema Nacional de Habitações
TBS	Temperatura de Bulbo Seco
TBS _m	Temperatura de Bulbo Seco Média
Tomáx	Temperatura Operativa Máxima
Tomín	Temperatura Operativa Mínima
UH	Unidade Habitacional
ZB	Zona Bioclimática

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 JUSTIFICATIVA	12
1.2 OBJETIVOS	14
1.2.1 Objetivo Geral	14
1.2.2 Objetivos Específicos	14
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1 HABITAÇÕES DE INTERESSE SOCIAL NO BRASIL	15
2.2 ENVOLTÓRIA DAS EDIFICAÇÕES	21
2.2.1 Absortância solar	23
2.2.2 Pé-direito	25
2.2.3 Venezianas	27
2.2.4 Varandas	29
2.3 DESEMPENHO TÉRMICO EM EDIFICAÇÕES	31
2.3.1 Materiais construtivos	35
2.3.2 Padrão de ocupação e taxa metabólica	36
2.3.3 Padrão de uso de equipamentos e iluminação	38
2.3.4 Contato com o solo	39
2.3.5 Ventilação Natural	40
2.3.6 Carga térmica	42
2.3.7 Dados Climáticos	44
2.4 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE EDIFICAÇÕES	45
2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	50
3 MÉTODO	52
3.1 CLIMAS AVALIADOS	53
3.2 APRESENTAÇÃO DA TIPOLOGIA	57
3.3 MODELAGEM E CASOS SIMULADOS	59
3.3.1 Modelo de referência	59
<i>3.3.1.1 Modelagem da varanda</i>	<i>60</i>
3.3.2 Modelos paramétricos	63
<i>3.3.2.1 Absortância</i>	<i>63</i>
<i>3.3.2.2 Pé-direito</i>	<i>64</i>
<i>3.3.2.3 Venezianas</i>	<i>64</i>
<i>3.3.2.4 Varanda</i>	<i>65</i>
3.3.3 Modelo obrigatório e modelo otimizado	65
3.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS	67
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	70
4.1 MODELAGEM DA VARANDA	70
4.2 MODELOS PARAMÉTRICOS	85
4.3 MODELO OBRIGATÓRIO E MODELO OTIMIZADO	100

5 CONCLUSÕES	108
5.1 LIMITAÇÕES DA PESQUISA	111
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	112
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	113

1 INTRODUÇÃO

1.1 JUSTIFICATIVA

A população brasileira enfrenta uma realidade de quase um terço da população em situação de pobreza (Barreto *et al.*, 2024). Um dos pontos de grande vulnerabilidade por parte da população de baixa renda é a falta de moradia. Em 2009, momento em que foi lançado pelo governo federal o programa Minha Casa, Minha Vida (MCMV), o déficit habitacional chegava a quase 6 milhões de residências, concentrado, principalmente, no setor da sociedade cuja renda mensal não ultrapassava três salários mínimos (FJP, 2010).

Desde sua criação, o programa MCMV foi responsável pela entrega de mais de 8 milhões de moradias (Brasil, 2025), das quais mais de 1,5 milhões destinadas à faixa 1 do programa (Brasil, 2023a), que oferece subsídio de até 100% para as famílias beneficiárias. Apesar de 77% dos beneficiários do programa associarem melhora na qualidade de vida à nova residência (ABRAINC, 2024), muitas são as críticas relacionadas à qualidade destas habitações. Böhm (2018) exemplifica essas críticas, por meio de um levantamento relacionado às principais causas da falta de qualidade nas habitações do programa MCMV, que vão desde a ausência de equipamentos comunitários nas proximidades, até graves vícios construtivos, mostrando que por vezes o combate ao déficit habitacional quantitativo acaba por nutrir o déficit qualitativo.

A Secretaria Nacional de Habitações (SNH) (Brasil, 2014), em um estudo realizado a respeito da satisfação dos beneficiários do programa MCMV, elenca diversos critérios que medem o contentamento dos usuários com suas residências, uma vez que, em se tratando de habitações de interesse social (HIS), o sucesso do empreendimento está relacionado com a satisfação do usuário e ao seu bom relacionamento com o ambiente construído. Dentre os critérios que quantificam a satisfação dos usuários de HIS elencados pela SNH, a temperatura interna das unidades habitacionais (UHs) foi um dos critérios que apresentou nível de satisfação bastante reduzido, em especial em climas com temperatura média anual acima dos 28 °C.

A norma brasileira NBR 15220-3:2024 (ABNT, 2024), divide o país em doze zonas bioclimáticas com características distintas e, conseqüentemente, necessidades

de estratégias construtivas também distintas. Em vista a essa diversidade, é importante destacar a importância da adequação dos projetos de habitações às características climáticas do local onde se inserem, evitando que um mesmo projeto seja replicado por todo o território sem que possam ser adotadas as melhores estratégias de desempenho térmico e eficiência energética.

Em decorrência da baixa qualidade observada nas habitações, traduzida em críticas ao programa MCMV, em junho de 2023 foi publicada a portaria nº 725 do Ministério das Cidades, que trata de novas disposições urbanísticas, de projeto, obra e valores para as habitações do programa MCMV, com o intuito de elevar a qualidade das unidades e satisfação dos beneficiários (Brasil, 2023c). No que diz respeito aos novos projetos dessas moradias, são estabelecidos diversos critérios voltados aos sistemas construtivos, como absorvância de paredes e coberturas, aberturas para ventilação cruzada, sistemas de sombreamento e área mínima dos ambientes, além de materiais com qualidade superior. As medidas estabelecidas pela portaria MCID nº 725/2023 foram embasadas em um estudo realizado pelo Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LabEEE) em parceria com *Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit* (GIZ) para a Secretaria Nacional de Habitação, intitulado “Eficiência Energética no Desenvolvimento Urbano Sustentável, Foco: Habitação Social”. Essas medidas têm caráter obrigatório ou recomendável e, além de melhorarem a satisfação do usuário, impactam na vida útil da edificação e em seu comportamento térmico, considerando que estão alinhadas à norma NBR 15575:2021 (ABNT, 2021a), que trata do desempenho de edificações residenciais.

A norma ABNT NBR 15575:2021 estabelece os requisitos de desempenho para edificações residenciais relacionados às suas qualidades térmicas, acústicas, lumínicas e de segurança ao fogo. Esta norma tem caráter mandatório para todos os projetos de HIS e traz, em seu item 11, os critérios necessários para a avaliação do desempenho térmico da edificação. Por meio de três indicadores de desempenho térmico, a unidade habitacional é enquadrada, ou não, em um dos níveis de desempenho térmico: mínimo, intermediário ou superior. É de caráter obrigatório, para todas as UHs, o atendimento aos critérios estabelecidos para o nível de desempenho térmico mínimo, de acordo com a zona bioclimática onde se inserem, sendo o atendimento aos níveis intermediário e superior, opcionais.

Diante das adequações obrigatórias estabelecidas pela portaria MCID nº 725/2023 para os projetos do programa Minha Casa, Minha Vida, ganha relevância a

discussão sobre como essas exigências, especialmente aquelas relacionadas aos elementos da envoltória, impactam o desempenho térmico das habitações de interesse social. Nesse contexto, busca-se avaliar o desempenho térmico de uma edificação representativa desse tipo de habitação, considerando os critérios estabelecidos pela NBR 15575:2021 (ABNT, 2021a), utilizando o procedimento de simulação computacional.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho consiste em avaliar o impacto de alterações realizadas na envoltória, de acordo com as exigências da portaria MCID nº 725/2023, no desempenho térmico de uma habitação de interesse social, segundo a NBR 15575:2021.

1.2.2 Objetivos Específicos

Dentre os objetivos específicos, destacam-se:

- a) Comparar diferentes formas de modelagem da varanda no programa de simulação computacional *EnergyPlus* identificando as lacunas relacionadas a esse processo;
- b) Identificar os parâmetros da envoltória que exercem maior influência no desempenho térmico de uma edificação, levando em consideração as alterações exigidas pela portaria do Ministério das Cidades nº 725/2023;
- c) Comparar o impacto dos parâmetros da envoltória em função da orientação solar adotada, localização da unidade habitacional e clima avaliado;
- d) Identificar a melhor combinação de parâmetros da envoltória para compor um modelo otimizado para cada cidade considerada;

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta uma revisão dos estudos acerca dos principais temas tratados no presente trabalho. A fundamentação teórica está dividida em três itens que apresentam as habitações de interesse social e a portaria MCID n° 725/2023, o desempenho térmico de edificações e a simulação computacional de edificações. Por fim, é apresentada uma breve discussão sobre os temas revisados.

2.1 HABITAÇÕES DE INTERESSE SOCIAL NO BRASIL

O direito à moradia, garantido pela Declaração dos Direitos Humanos do ano de 1984, é um direito humano universal que assegura que toda e qualquer pessoa tenha direito a uma habitação digna. Segundo Villaça (1986), a moradia é muito mais que um teto sobre paredes: é o atendimento a muitas necessidades inerentes à existência humana, como abrigo, proteção, privacidade e desenvolvimento individual, familiar e social. A origem das habitações como mercadoria e, conseqüentemente, da falta delas para a população, está relacionada com a propriedade privada, que trouxe consigo “o problema da habitação”. O problema da habitação nada mais é que o não cumprimento ao direito fundamental à moradia e, conseqüentemente, o não atendimento às necessidades básicas asseguradas pelas habitações.

Para Bolaffi (1977) o déficit habitacional não existe, a quantidade de habitações existente é exatamente o número para o qual existe uma demanda monetária. Ou seja, uma vez que a moradia é uma mercadoria, quem não pode pagar por ela, não pode tê-la. É no contexto mercantil das habitações que o Estado surge como remediador, provendo moradia àqueles que não possuem condições financeiras suficientes para aquisição, na tentativa de cumprir com o fundamental que deveria contemplar a todos, na busca de reparar as conseqüências da desigualdade social ocasionada pelo sistema econômico atual.

No Brasil, a primeira iniciativa em escala nacional de políticas de habitação social é datada de 1946 com a Fundação da Casa Popular, com a finalidade de oferecer à população não apenas residências, mas infraestrutura, estudos, materiais e ciência relacionada ao problema da habitação. Na década de 1950, a população urbana sofreu um aumento considerável, elevando a desigualdade social no país bem como o déficit habitacional (Zapelini; Lima; Guedes, 2017). Porém, o próximo passo em direção às políticas públicas mais eficientes com foco em habitações aconteceu

somente em 1964, com a criação do Sistema Financeiro de Habitações (FNH) e do Banco Nacional de Habitação (BNH).

Durante os anos de sua vigência, o BNH financiou cerca de um quarto de todas as moradias construídas no país, destinadas a todas as faixas de renda. No entanto, a característica principal da produção habitacional era a produção em massa, sem que fossem atendidas as necessidades da população, com a preocupação voltada somente em solucionar o déficit habitacional quantitativo. Além disso, por atender a todas as faixas de renda, o BNH logo percebeu que não era rentável a construção de habitações para a população de maior vulnerabilidade econômica, uma vez que os recursos empregados nos financiamentos não vinham do governo, mas sim do fundo de garantia e de cadernetas de poupança dos trabalhadores. Assim, em meados da década de 1960, o BNH passou a financiar, principalmente, habitações para a população de média e alta renda, deixando de lado, mais uma vez, as habitações de interesse social, que antes faziam parte de cerca de 20% de todos os financiamentos concedidos pelo banco (Rubin; Bolfe, 2014).

Em 1986, o BNH foi extinto e seus encargos transferidos para a Caixa Econômica Federal, que herdou a função de combate ao déficit habitacional do país, que estava longe de ser solucionado. A partir daí, surgiram novos planos para habitações como o PAIH (Plano de Ação Imediata para a Habitação), o Pró-Moradia e o PAR (Programa de Arrendamento Residencial) (Bendlin, 2020).

Durante o período de 1995 a 2003, as políticas públicas destinadas à habitação foram bastante elogiadas. O retorno do financiamento de residências com o Fundo de Garantia de Tempo de Serviço (FGTS) para famílias com renda de até três salários mínimos reacendeu a luta contra o problema habitacional do país. No mesmo período, também foi proposta a criação do Ministério das Cidades, concretizada mais tarde, em 2003 (Rubin; Bolfe, 2014).

Com a criação do Ministério das Cidades, a inclusão dos setores excluídos da cidade passou a ser uma pauta, frisando a habitação como aspecto fundamental para a dignidade humana e cidadania. Em 2004, foi criado o Sistema Nacional de Habitação (SNH), que passou a concretizar os objetivos relacionados ao déficit habitacional, traçando planos habitacionais nas esferas municipais, estaduais e nacionais.

Em 2007, é lançado o Programa de Aceleração do Crescimento (PAC), trazendo fortes investimentos não apenas em habitações, mas em saneamento e urbanização de conjuntos habitacionais precários. Dois anos depois é lançado o

programa Minha Casa, Minha Vida (MCMV), o maior programa habitacional da história do Brasil.

Quando da criação do programa MCMV, o Brasil enfrentava um déficit habitacional de quase seis milhões de domicílios. Mesmo com os índices demográficos em alta, nos cinco primeiros anos desde sua criação, o programa foi responsável em reduzir a escassez de residências em uma taxa de 2,8% ao ano, especialmente para famílias de baixa renda, onde o subsídio do governo chegava, em alguns casos, a mais de 90%. Além disso, os novos empreendimentos aqueceram a economia e contribuíram para a geração de milhares de empregos, especialmente no setor da construção civil.

Com o passar dos anos, o programa MCMV sofreu algumas alterações, atravessando um período de paralisação entre 2018 e 2022, sendo substituído pelo programa Casa Verde e Amarela, responsável pela entrega de cerca de 1,4 milhões de habitações. Em 2023 o programa MCMV volta a vigorar, passando por uma reestruturação que objetiva a correção de falhas com a retomada de seu principal objetivo inicial: o combate ao déficit habitacional voltado principalmente na entrega de moradias a famílias em situação de vulnerabilidade econômica, enquadradas na faixa 1 de renda.

Na versão atual, na área urbana, o programa atende a famílias com renda bruta de até 8 mil reais e que não possuam imóveis registrados em seu nome, com enquadramento dos beneficiários em três faixas de renda (Brasil, 2023b):

- Faixa 1: renda mensal familiar bruta de até R\$ 2.640,00 beneficiados com habitações com até 100% de subsídio ou financiadas;
- Faixa 2: renda mensal familiar bruta entre R\$ 2.640,01 e R\$ 4.400,00 beneficiados com habitações financiadas;
- Faixa 3: renda mensal familiar bruta entre R\$ 4.400,01 e R\$ 8.000,00 beneficiados com habitações financiadas.

Em abril de 2025, o governo federal anunciou uma nova modalidade do programa MCMV chamada de “Classe Média”, que atende famílias com renda familiar bruta de até R\$ 12.000,00, popularmente denominada “Faixa 4” de renda.

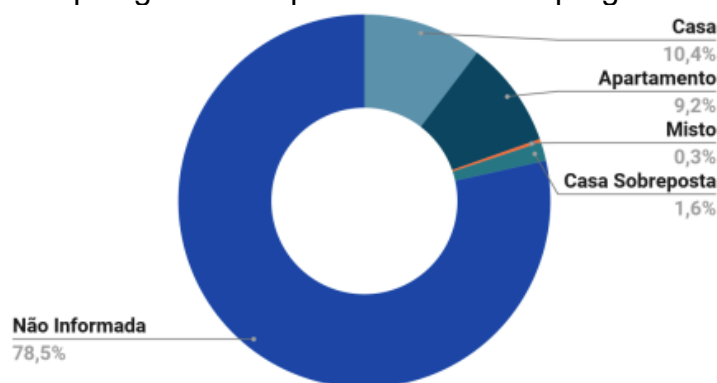
Ao longo dos anos, o ritmo de implementação de empreendimentos do programa MCMV não foi constante, apresentando um pico entre 2012 e 2013 e um declínio a partir de 2019. Ao todo, segundo o Governo Federal (Brasil, 2025), até o

ano de 2024 foram registradas 8,4 milhões de unidades habitacionais entregues pelo programa. O estado de São Paulo é responsável pela maior concentração de UHs entregues, enquanto o Amapá apresenta os menores números.

Em relação às tipologias dos empreendimentos do programa MCMV, conforme Lamberts *et al.* (2023), são observadas no Brasil quatro tipologias divididas pelos autores em: casa, casa sobreposta, apartamento e mista, que define a união de mais de uma tipologia. A Figura 1 traz, numericamente, essa divisão, segundo dados da SNH de empreendimentos registrados até 2022.

Além de levantar as tipologias presentes nos empreendimentos, os autores observaram que a maior parte das unidades construídas pelo programa é referente a casas e apartamentos, com mais casas nas regiões Norte e Nordeste e mais apartamentos nas regiões Sul e Sudeste.

Figura 1 - Tipologia dos empreendimentos do programa MCMV



Fonte: Lamberts *et al.*, 2023.

Diante da necessidade de padronizar os projetos das tipologias habitacionais observadas para facilitar as análises, principalmente com ênfase no desempenho termoenergético, Triana, Lamberts e Sassi (2015) definiram projetos representativos de cada tipologia com base na análise de 108 projetos das faixas de renda 1 e 2. Como produto do estudo, obtiveram cinco modelos representativos das tipologias observadas que passaram a ser utilizados como base para estudos mais aprofundados neste setor.

Apesar dos inúmeros benefícios trazidos com a implementação do programa, as críticas às moradias entregues são constantes desde sua origem, e, para Böhm (2018), o combate ao déficit habitacional quantitativo, prioridade declarada do programa MCMV, acaba por alimentar o déficit habitacional quantitativo. Complexos

habitacionais construídos longe dos grandes centros, com infraestrutura e saneamento básico precário, além de vícios construtivos e materiais de baixa qualidade empregados nas obras tornaram-se, lamentavelmente, marcas do programa MCMV, em especial para a menor faixa de renda atendida.

De Martins e Lima (2018) afirmam que o programa MCMV não reduziu efetivamente o problema habitacional do Brasil e ainda deu origem a outras questões relacionadas justamente à renda, como o ônus excessivo com aluguel e transporte urbano.

Uma pesquisa realizada pelo Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea) em 2023 (Krause *et al.*, 2023) avaliou o programa MCMV frente ao déficit habitacional que deveria ser atendido e à localização dos empreendimentos. A pesquisa foi realizada para vinte cidades brasileiras e foram medidos indicadores de acessibilidade a empregos e serviços básicos de saúde e educação. Os resultados mostram que, em quase todas as cidades, o acesso a oportunidades de emprego e serviços básicos é pior nos empreendimentos analisados quando comparados aos moradores de comunidades e domicílios de baixa renda, reforçando a necessidade de implantação das habitações em terrenos mais bem localizados.

No entanto, apesar das duras críticas, em especial de ordem técnica e urbanística, os beneficiários da faixa 1 estão satisfeitos com suas habitações. Em um país onde a presença de comunidades na periferia é uma realidade em todos os grandes centros, as residências proporcionadas pelo programa MCMV são sinônimo de dignidade e qualidade de vida para as famílias beneficiárias, como mostra uma pesquisa realizada pela Secretaria Nacional de Habitações (Brasil, 2014).

Em vista a essa dualidade no que diz respeito à qualidade das habitações, onde aspectos mais subjetivos elevam-na enquanto aspectos técnicos a reduzem, considerou-se necessária uma reformulação mais rígida dos requisitos obrigatórios exigidos na construção de novas HIS, por meio da portaria do Ministério das Cidades nº 725/2023 (Brasil, 2023c), que dispõe das “especificações urbanísticas, de projeto e de obra e sobre os valores de provisão de unidade habitacional para empreendimentos habitacionais no âmbito das linhas de atendimento de provisão subsidiada de unidades habitacionais novas em áreas urbanas”. O objetivo das alterações dispostas nesta portaria, além da busca pela melhoria contínua do programa, é de promover empreendimentos mais sustentáveis: ecologicamente corretos, economicamente viáveis, socialmente justos e culturalmente diversos.

A nova portaria MCID nº 725/2023, que começou a vigorar no ano de 2023 para todas as novas habitações que venham a ser construídas a partir desta data, trata o Brasil como o país de proporções continentais que de fato é. As particularidades culturais e climáticas de cada região passaram a ser consideradas, como a previsão de ganchos de suporte para rede nas regiões Norte e Nordeste, e sombreamento na sala nas regiões mais quentes, deixando para trás o projeto padrão que se repetia por todo o país. Observou-se também um cuidado quanto ao local de implantação dos empreendimentos para evitar que a população contemplada continue afastada das regiões centrais.

Dentre as alterações descritas na portaria MCID nº 725/2023, algumas são mandatórias e outras recomendáveis, ao passo que estas são, em geral, alterações mais rigorosas das alterações obrigatórias. Dentre os extensos e necessários requisitos obrigatórios da portaria, alguns merecem destaque e são elencados abaixo:

- Inserção do empreendimento em área urbana consolidada ou em expansão com disponibilidade de infraestrutura básica e acesso a equipamentos públicos comunitários de educação, saúde e transporte;
- Área útil mínima da unidade habitacional igual a 40 m² para casas ou 41,50 m² para apartamentos ou casas sobrepostas (área interna mais varanda de 1,50 m² de área útil);
- Emprego de estratégias passivas de projeto para garantir o conforto das unidades habitacionais, tais como o aproveitamento da iluminação e ventilação natural;
- Presença de veneziana em todos os dormitórios e elemento de sombreamento na sala a depender da zona bioclimática em que a UH se insere;
- Valores de absortância e transmitância das paredes externas e cobertura variando de acordo com a zona bioclimática em que a UH se insere;
- Presença de varanda em apartamentos e casas sobrepostas com 1,50 m² de área útil mínima e largura mínima de 0,80 m;
- Pé-direito mínimo de 2,60 m, admitindo-se 2,30 m no banheiro;
- Atendimento ao Programa Brasileiro da Qualidade e Produtividade do Habitat (PBQP-H), com emprego de materiais de qualidade nas obras.
- Atendimento às especificações de desempenho com base na NBR 15575 vigente.

Além dos requisitos obrigatórios, a portaria MCID nº 725/2023 também estabelece algumas especificações recomendáveis para os projetos e obras dos empreendimentos, com requisitos que elevam ainda mais a qualidade das habitações. Cabe ressaltar que a portaria do Ministério das Cidades, apesar de respeitar as particularidades climáticas regionais, é baseada no antigo zoneamento bioclimático brasileiro, datado do ano de 2004. A partir de 2024, passou a vigorar o novo zoneamento bioclimático no país, composto por 12 novas zonas bioclimáticas.

Dentre as especificações obrigatórias de projeto das edificações e unidades habitacionais, uma parcela se refere à envoltória das edificações, tema central desta pesquisa, que será discutida com mais detalhes na seção 2.2 a seguir.

2.2 ENVOLTÓRIA DAS EDIFICAÇÕES

Os crescentes esforços voltados para a evidente necessidade da redução do consumo energético mundial não são novidade. O setor residencial brasileiro é hoje responsável por mais de 10% do consumo de energia elétrica do país, valor que, de acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (2024), vem apresentando um aumento gradual, com crescimento de mais de 4% de 2022 para 2023. Esse aumento, observado não apenas no Brasil, é uma consequência, também, das mudanças climáticas induzidas pela humanidade, responsáveis por uma elevação de 1,1 °C na temperatura terrestre, além da destruição da camada de ozônio por gases estufa (Boehm; Schumer, 2023).

As mudanças climáticas são uma realidade. Quanto mais extremos se tornam os eventos climáticos, com verões extremamente quentes e invernos muito frios, a demanda por energia para resfriamento e aquecimento das habitações se eleva, gerando um ciclo vicioso que acelera este cenário (ONU, 2024).

As moradias, ao longo do tempo, foram se adaptando às necessidades dos usuários. Inicialmente, cumpriam o papel de apenas servir de abrigo contra animais e intempéries, enquanto hoje são uma extensão do indivíduo, que cria vínculos e se apropria do lugar adaptando-o não apenas conforme suas necessidades, mas de acordo com seus interesses e sentimentos (Brasil, 2022a). Nos últimos anos, no entanto, essa adaptação das habitações torna-se cada vez mais necessária, em vista das mudanças climáticas, cada vez mais severas. Para contornar essa situação, é

importante compreender o impacto que a envoltória das edificações exerce na nova realidade climática.

A separação entre o ambiente externo e interno de uma edificação é feita por meio dos elementos da envoltória. A envoltória de uma edificação, também chamada de envelope, nada mais é que o conjunto de componentes que define seus limites, sendo responsável por todas as trocas de calor entre o meio interno e externo, que ocorrem por condução, convecção ou radiação. Sabendo disso, os materiais e técnicas utilizadas para compor a envoltória podem acelerar ou retardar a velocidade com que essas trocas de calor ocorrem, e devem ser escolhidos a depender da necessidade ou finalidade da edificação, levando em consideração as características climáticas onde a edificação se insere (Pessoa; Ghisi; Lamberts, 2013).

No Brasil, existem normativas que trazem especificações e recomendações acerca das características da envoltória das edificações. A NBR 15220 (ABNT, 2005; 2024) define métodos de cálculo para propriedades térmicas de componentes da envoltória bem como a classificação destes, além de diretrizes para projetos de habitações levando em consideração o zoneamento bioclimático brasileiro. Complementarmente, o Programa Brasileiro de Etiquetagem de Edificações (PBE Edifica), por meio das Instruções Normativas do INMETRO INI-C e INI-R, propõe uma avaliação da eficiência energética de edificações comerciais, públicas e residenciais, classificando a envoltória da edificação em função das características geométricas e propriedades térmicas dos sistemas construtivos (INMETRO, 2025a; INMETRO, 2025b). A NBR 15575 (ABNT, 2021a) também traz requisitos mínimos acerca dos elementos da envoltória, não apenas no que diz respeito ao desempenho térmico, mas referente a estanqueidade, durabilidade e manutenção. Além das citadas, existem normas brasileiras específicas para componentes como esquadrias, vedações externas e coberturas, reforçando a importância do tratamento adequado da envoltória para garantir conforto, bom desempenho térmico e eficiência energética nas edificações, especialmente em um país com ampla diversidade climática.

Dentre os diversos elementos da envoltória que podem ser elencados, quatro deles estão relacionados com as alterações exigidas pela portaria MCID nº 725/2023 e serão discutidos mais detalhadamente nos tópicos a seguir: absorvência solar, pé-direito, venezianas e varandas.

2.2.1 Absortância solar

A absortância solar é uma propriedade dos materiais definida como a razão entre a quantidade de radiação solar absorvida por uma superfície e a quantidade total de radiação solar incidente sobre ela (ABNT, 2005). Isto é, quanto maior a absortância solar de um material, maior a quantidade de radiação absorvida por ele e, consequentemente, maior o aumento da temperatura superficial e o fluxo de calor.

A incidência da radiação solar é uma das maiores fontes de ganhos térmicos em uma edificação, principalmente em países de clima predominantemente quente, como o Brasil (Coelho; Gomes; Dornelles, 2017). Por esse motivo, controlar a incidência e a absorção da radiação solar pelos edifícios é uma forma bastante eficiente de diminuir os ganhos térmicos, o que pode ser feito com alterações na absortância de fachadas e coberturas (Dornelles; Caram; Sichieri, 2014).

Bavaresco *et al.* (2021) revisam a literatura acerca de aspectos que impactam no desempenho energético de HIS no Brasil e cita a absortância solar como um dos parâmetros mais influentes no desempenho de habitações segundo o método do Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (RTQ-R). Nesse sentido, considerando que o território brasileiro abriga doze diferentes zonas bioclimáticas (ABNT, 2024), absortâncias solares mais elevadas são recomendadas para climas com estações bem definidas, enquanto nos locais de climas mais quentes é indicado o uso de absortâncias mais baixas no envelope das edificações.

É importante destacar que a alteração da absortância nas fachadas e cobertura das edificações é reconhecidamente uma das estratégias com benefícios térmicos significativos em uma edificação em vista ao baixo investimento inicial e, por isso, vista como um ótimo recurso para melhorar o desempenho térmico de habitações populares, com ganhos expressivos em desempenho e baixo custo (Candido; Dornelles; Lukiantchuki, 2023). É o que afirmam Schaefer *et al.* (2014), em um estudo que levantou os valores de absortância de fachadas de 101 habitações na região de Florianópolis a fim de verificar sua influência no desempenho térmico das mesmas. Por meio de simulações computacionais, os autores utilizaram os indicadores de graus-hora de resfriamento e aquecimento para avaliar o desempenho térmico de habitações com absortâncias entre 0,13 e 0,87. Como resultados, concluíram que a absortância exerce maior influência nas situações onde há necessidade de

resfriamento quando comparada a necessidade de aquecimento, com aumento gradual no valor de graus-hora conforme a absorptância se eleva.

Cheung, Fuller e Luther (2005), em estudo que discutiu envoltórias eficientes em energia para apartamentos residenciais, avaliaram um edifício residencial na cidade de Hong Kong quanto a uma série de componentes da envoltória e relacionaram a queda da demanda por energia de resfriamento com a absorptância solar. Segundo os autores, redução de cerca de 12% na energia requerida foi verificada com a redução de 30% da absorptância solar das fachadas.

Um estudo a respeito do desempenho térmico relacionado à absorptância de telhas de fibrocimento realizado por Coelho, Gomes e Dornelles (2017) avalia as alterações na absorptância de coberturas ao longo de sua vida útil e os impactos dessas mudanças no desempenho térmico na cidade de Campinas (SP). Como resultado, observaram que a carbonatação, por reduzir a absorptância das telhas, atuou reduzindo as temperaturas superficiais das telhas, contribuindo para a melhora do desempenho térmico. Em contrapartida, a deposição de fungos ao longo do tempo eleva a absorptância dos materiais, incrementando os ganhos de calor por radiação solar nas edificações.

Sabendo que o sistema de coberturas é um dos elementos responsáveis pela maior parte dos ganhos térmicos da edificação, Silveira, Marinoski e Lamberts (2012) também analisaram telhas de fibrocimento em diferentes estados de conservação relacionando a absorptância solar e a temperatura superficial das mesmas. Os resultados apresentaram diferenças de absorptância de até 0,73 em valor absoluto associadas a até 12 °C de diferença na temperatura superficial das telhas, na cidade de Florianópolis. As conclusões evidenciam os ganhos térmicos significativos à medida que a absorptância da cobertura é elevada.

Em vista à relevância da escolha da absorptância adequada para o clima em que a edificação se insere, a portaria MCID nº 725/2023 estabelece valores de absorptância para as paredes externas e coberturas que variam de acordo com a zona bioclimática em que a edificação será inserida (de acordo com a NBR 15220:2005), seguindo as especificações abaixo:

- Unidades habitacionais localizadas nas zonas bioclimáticas 1, 2 e 3: pintura das paredes externas predominantemente em cores claras a médias (absorptância solar máxima de 0,6) ou o uso de acabamentos externos predominantemente com absorptância solar máxima de 0,6.

Cores escuras são admitidas em detalhes. Para coberturas, a absorptância solar do telhado deve ser menor ou igual a 0,6 (cores claras e médias), com exceção de coberturas em telhas de barro não vitrificada e cobertura verde.

- Unidades habitacionais localizadas nas zonas bioclimáticas 4, 5, 6, 7 e 8, deve ser garantida a pintura das paredes externas predominantemente em cores claras (absortância solar máxima de 0,4) ou o uso de acabamentos externos predominantemente com absorptância solar máxima de 0,4. Cores escuras são admitidas em detalhes. Para coberturas, a absorptância solar do telhado deve ser menor ou igual a 0,4 (cores claras e médio-claras), com exceção de coberturas em telhas de barro não vitrificada e cobertura verde

2.2.2 Pé-direito

Segundo os princípios da termodinâmica, as trocas térmicas de um ambiente estão intimamente ligadas à sua volumetria. Quanto maior o volume, maior a inércia térmica e, conseqüentemente, mais lenta a variação de temperatura interna de um ambiente frente a trocas térmicas que ali ocorrem (Johra, 2019). Isso significa que, quanto maior o volume de um ambiente, mais tempo será necessário para que ocorram trocas térmicas que alterem sua temperatura, fenômeno que pode ser desejado ou evitado dependendo da necessidade.

Nesse contexto, a volumetria de uma edificação, que está associada, também, à altura do pé-direito dos ambientes, exerce influência significativa sobre seu desempenho térmico, pois ambientes com maiores volumes de ar interno exigem maior energia para serem aquecidos ou resfriados, resultando em menores variações na temperatura interna. Em climas onde há uma grande oscilação nas temperaturas ao longo do dia a inércia térmica pode ser bem quista, favorecendo o conforto do usuário. Já em climas quentes, a dificuldade em resfriar o ambiente pode ser um ponto negativo, com maiores gastos em energia e conforto térmico reduzido.

Um estudo realizado para o contexto climático quente e úmido testou dez diferentes alturas de pé-direito em relação ao desempenho térmico, variados de 3 m a 6 m de altura. As análises foram realizadas considerando ambientes naturalmente ventilados e verificou-se um aumento na temperatura interna de 0,1 °C a cada 30 cm de aumento do pé-direito. Além disso, verificou-se que a porcentagem de diferença

de temperatura do ar interno reduz exponencialmente à medida que o pé-direito aumenta (Jeyalaxmi, 2023).

No contexto brasileiro, Guimarães, Carvalho e Santos (2013) construíram três modelos de 8m² para testar a influência da altura do pé-direito na temperatura interna do ambiente. Seguindo as especificações do Código de Obras da cidade de Belo Horizonte, foram testadas as alturas de 2,6 m, 2,8 m e 3 m com a utilização de termopares em diferentes alturas. Os testes foram realizados sem o uso de ventilação natural e os resultados mostram um aumento em 1 °C na temperatura interna para cada redução de 20 cm no pé direito.

Karimi, Chikamoto e Lee (2025) também avaliaram o impacto da altura do pé-direito no consumo de energia de uma habitação no Afeganistão, de clima semiárido. Por meio de simulação computacional com o programa *EnergyPlus*, os autores variaram alguns parâmetros da envoltória, inclusive o pé-direito, que foi variado de 2,44 m até 4,57 m, concluindo que, em média, para cada 30,5 cm adicionados ao pé-direito, observa-se um aumento de 8%, 6,5% e 5,1% no consumo de energia para a edificação, considerando cenários com janela de vidro simples, duplo e triplo, respectivamente.

Os estudos citados mostram que, a depender do contexto climático e modo com que a edificação é operada, com o uso, ou não, da ventilação natural, o aumento do pé-direito, e consequente aumento da volumetria da edificação, pode ser favorável ou não para o desempenho térmico da edificação. Além disso, o aumento do pé direito também significa um aumento na superfície externa da edificação o que aumenta a área de contato com o meio externo, favorecendo as trocas térmicas.

Sabendo disso, a portaria MCID n° 725/2023 estabelece um aumento na altura mínima do pé-direito dos ambientes das edificações do programa Minha Casa, Minha Vida, passando de 2,5 m para 2,6 m. Para o contexto brasileiro, onde 80% das residências ainda não possuem aparelhos de ar-condicionado (Lara, 2025), a ventilação natural ainda é a estratégia mais utilizada para resfriamento, o que justifica esse aumento obrigatório do pé-direito nas residências do programa MCMV.

2.2.3 Venezianas

Dentre os elementos da envoltória, Li e Wu (2024) afirmam que as janelas são responsáveis por grande parte das trocas térmicas que ocorrem na edificação. Por esse motivo, em especial em climas tropicais, onde a incidência de radiação solar é

alta, o sombreamento de janelas mostra-se como um dos recursos mais eficazes para combater o desconforto causado pela radiação (Martins, 2013), seja pelo desconforto da incidência direta da radiação, como pelo aquecimento indesejado dos ambientes.

Existem diversos dispositivos de proteção solar bastante conhecidos na construção civil, podendo ser citados brises, toldos, marquises, elementos vazados, pérgulas, sacadas, cortinas, persianas e venezianas. Dentre os elementos citados, muitos são dispositivos fixos que não proporcionam ao usuário a liberdade de controlar seu funcionamento. No entanto, venezianas, persianas e cortinas, em geral, dão ao usuário maior autonomia, pois existe a possibilidade de acionamento conforme a necessidade ou preferência.

Viana, Barbosa e Ghisi (2023), investigaram a influência da operação de janelas e venezianas no desempenho térmico de residências em três cidades brasileiras, trazendo para a discussão o impacto do comportamento do usuário na interação com o ambiente construído. Utilizando simulações computacionais, os autores estabeleceram alguns perfis de comportamento do usuário na operação das janelas e venezianas, concluindo que os perfis adotados provocaram variações de até 13% no percentual de horas de ocupação dentro de uma faixa de temperatura operativa (PHFT), segundo o método de simulação computacional da NBR 15575:2021.

A NBR 15575:2021-1 (ABNT, 2021a) define veneziana como um objeto formado por haletas horizontais, verticais ou inclinadas, superpostas, paralelas entre si, ou peça contínua, que permite que os ambientes sejam ventilados de forma permanente, porém controlando a entrada de luminosidade. As venezianas podem ser fabricadas em diferentes materiais, angulação das haletas, acabamentos e localização e distância dos vidros das janelas.

Um estudo realizado por Tan *et al.* (2020) avaliou o potencial das venezianas em reduzir o consumo de energia em edifícios residenciais, utilizando simulações computacionais com auxílio dos programas *EnergyPlus* e *WINDOW* para um clima quente e um clima frio. Com análises paramétricas de mais de 9000 combinações de características de venezianas, os autores evidenciam o potencial das venezianas em reduzir o consumo energético em 44% para resfriamento no clima quente escolhido e em mais de 65% para o clima frio.

Da mesma forma, El-Deeb (2023) também procurou encontrar quais características que fazem com que as venezianas proporcionem a maior economia de

energia para climas áridos. A pesquisa foi realizada considerando os climas das cidades de Riyadh, Cairo e Arizona e variou o ângulo das haletas das venezianas de 15° a 90°, considerando sua inserção na face interna, externa ou entre janelas de vidro duplo. Como resultados, o autor verificou que as maiores economias de energia para as localidades avaliadas foram observadas quando a veneziana é inserida na parte externa das janelas, com mais de 30% de economia de energia de resfriamento para diferentes angulações das venezianas.

Um dos benefícios da utilização de venezianas, além do sombreamento proporcionado por esses dispositivos, é a possibilidade do uso da ventilação natural associado ao sombreamento, uma vez que, no Brasil, utiliza-se a ventilação natural como principal estratégia de condicionamento térmico, enquanto aparelhos de ar condicionado e ventiladores são observados como estratégias complementares, em especial em habitações de baixa renda (Buonocore *et al.*, 2024). É o que mostram Nico-Rodrigues *et al.* (2015), em pesquisa que avalia a influência dos tipos de janela no desempenho térmico de ambientes naturalmente ventilados, concluindo que, para a cidade de Vitória (ES), janelas sem venezianas apresentam desempenho térmico insuficiente quando os ambientes são operados com ventilação natural, necessitando de venezianas ou persianas para controle de incidência solar nos períodos mais quentes.

Em relação às venezianas, a portaria MCID nº 725/2023 estabelece que em todas as zonas bioclimáticas, as esquadrias de dormitórios devem apresentar veneziana que permita escurecimento do ambiente, mas permita a ventilação natural e a entrada de luz natural quando desejado. Além disso, exige que, em unidades habitacionais localizadas nas zonas bioclimáticas 7 e 8, as aberturas da sala apresentem recurso de sombreamento, que pode ser veneziana, varanda, brise, beiral, anteparo ou equivalente.

2.2.4 Varandas

Algumas características observadas em diversas habitações da atualidade, não apresentam, essencialmente, uma origem funcional, como é o caso das varandas, segundo alguns autores. Quando se retorna à história da arquitetura doméstica, a varanda apresenta significados diversos, mas sempre vinculados ao bem-estar. No Brasil, a varanda foi trazida pelos portugueses que, desde os registros de Vasco da

Gama, já tratavam este ambiente como “um local de permanência aprazível” (Brandão, 2012).

A varanda é uma transição gradual entre os espaços internos e externos (Macário, 2013). É o lugar onde a família se reúne, sendo um refrescante local de lazer (Brandão; Martins, 2007). Por mais que em diversas literaturas a varanda seja descrita como exercendo um papel muito mais relacionado ao comportamento humano, sua origem também está bastante relacionada ao sombreamento proporcionado por ela. Para Lemos (1993), a varanda é um telhado que se prolonga para fora da parede, tendo a função de fazer sombra à construção, evitando que o calor do sol se acumule na alvenaria, mantendo fresco o interior da edificação.

É nesse contexto, aliado à necessidade de redução do consumo de energia global, que se observa um aumento da adoção das varandas em edificações, uma vez que são consideradas dispositivos que reduzem a incidência de radiação solar direta por funcionarem como elementos de sombreamento, melhorando consideravelmente as condições térmicas nos ambientes adjacentes (Ribeiro; Ramos; Flores-Colen, 2020).

Embora sejam bastante efetivas como elementos de sombreamento, a presença da varanda impacta no fluxo de ar na habitação, afetando a ventilação natural, uma importante estratégia passiva de condicionamento ambiental, tanto nos aspectos relacionados a conforto e desempenho térmico quando de eficiência energética e qualidade do ambiente interno (Sorgato; Melo; Lamberts, 2016; Candido, 2006). Assim, sua implementação, projeto e forma de uso devem ser cuidadosamente avaliadas, levando em conta, também, as características da localidade, de forma a não comprometer o fluxo de ar na residência visando reduzir a incidência de radiação solar (Loche *et al.*, 2024).

Ribeiro, Ramos e Flores-Colen (2020) realizaram uma revisão dos estudos publicados acerca dos impactos relacionados à presença de diferentes tipos de varandas na qualidade do ambiente interno e no consumo energético de habitações. Para organizar o estudo, os autores definiram três tipos de varandas de acordo com seu projeto e com a maneira que faziam limite com o meio externo, e observaram que os estudos, em geral, são recentes, publicados na última década, e seguem crescendo. Como conclusão, destaca-se a que a recomendação do melhor tipo de varanda é determinada de acordo com o clima em que a edificação se insere.

Yuan, Ryu e Sekartaji (2022) também avaliaram o efeito de diferentes tipos de varanda no ambiente interno de habitações, com maior foco no desempenho termoenergético. A partir de quatro apartamentos localizados no Japão, os autores quantificaram a carga térmica necessária para aquecimento e as temperaturas internas de cada um dos casos, comparando-os entre si e com cenários onde foram utilizados materiais isolantes nas varandas. Como conclusões, destacam que varandas fechadas são recomendadas para o inverno em climas quentes, apresentando um impacto mais positivo no ambiente térmico e na economia de energia quando comparadas com varandas abertas.

Diversos estudos já investigaram o impacto da geometria da varanda em diversos aspectos do ambiente interno de edificações. Izadyar *et al.* (2020) verificaram os efeitos da profundidade e fator de abertura da porta da varanda no conforto térmico e na ventilação natural da sala adjacente a esse cômodo, utilizando simulação computacional para um clima com verão úmido e inverno ameno, constatando que o tamanho da abertura da porta apresenta impacto mais significativo que a profundidade da varanda, atingindo resultados mais confortáveis termicamente para o caso estudado.

Em climas frios e países localizados em latitudes elevadas, os estudos envolvendo varandas geralmente focam na versão envidraçada, onde o limite externo do ambiente é fechado com janelas ou apenas vidro (Ribeiro; Ramos; Flores-Colen, 2020). Para esses lugares, onde as temperaturas são baixas durante todo o ano e a radiação solar é reduzida, o calor estocado nas varandas envidraçadas é bem visto, aquecendo os ambientes internos e reduzindo a demanda por sistemas de aquecimento, característica do “efeito estufa” proporcionado por essa solução construtiva. Além disso, Kim e Kim (2009) ainda citam o isolamento acústico de varandas envidraçadas como um benefício, não apenas para os climas frios.

A recente crise do COVID-19 trouxe de volta à discussão a importância da ventilação natural nas edificações, não apenas como uma ferramenta para a redução das temperaturas internas em vista das mudanças climáticas, mas como uma barreira para a disseminação de diversas doenças respiratórias (Duarte *et al.*, 2023). Além disso, durante esse período, muito foi debatido a respeito da importância dos espaços externos nas residências (Ribeiro; Ramos; Flores-Colen, 2020), em especial em HIS, onde os ambientes são, em geral, pequenos e diversas pessoas coabitam os espaços.

É indiscutível que, quando implementadas de forma coerente à localidade em que a edificação se insere, as varandas proporcionam uma gama de benefícios ao usuário. Não apenas em termos subjetivos, mas em aspectos mensuráveis, como eficiência energética, desempenho e conforto térmico. Por esse motivo, a portaria MCID nº 725/2023 estabelece como obrigatória a inserção da varanda em apartamentos com largura mínima de 0,80 m e área útil mínima de 1,50 m², sendo vedada varanda em balanço.

2.3 DESEMPENHO TÉRMICO EM EDIFICAÇÕES

O desempenho de uma edificação refere-se à capacidade de um edifício em atender às necessidades de seus usuários. Com relação a habitações, o desempenho da edificação assume um papel que extrapola essas necessidades, entrando em campos mais subjetivos, uma vez que trata também da satisfação e do conforto do usuário.

Em termos mais práticos, o desempenho de uma edificação é avaliado, em geral, através de normativas que traduzem os requisitos dos usuários em critérios e indicadores, avaliando a edificação no que diz respeito a durabilidade, segurança, conforto, eficiência, manutenibilidade, entre outros. No Brasil, a norma ABNT NBR 15575:2021 assume este papel, estabelecendo os requisitos e critérios de desempenho de edificações habitacionais, e é de caráter obrigatório.

A primeira versão da norma brasileira de desempenho foi publicada em 2008, com grande enfoque no desempenho térmico das habitações. Nesse momento, o setor da construção civil não se considerou preparado para absorver todas as mudanças e exigências propostas, solicitando sua revisão (CBIC, 2013). Diante da situação, foram realizadas revisões em 2010, 2012 e 2013, sendo que neste último ano a norma passou a vigorar oficialmente.

A partir de 2014, o número de pesquisas relacionadas a esta norma aumentou consideravelmente, traduzindo o interesse da comunidade acadêmica em uma normativa tão necessária para o setor da construção civil. Chvatal (2014) realizou um estudo, logo após a publicação da normativa, que identificou problemas no procedimento simplificado adotado pela NBR 15575:2013, evidenciando lacunas nas representações de transmitância e absorptância dentro dos limites deste procedimento,

constatando que a simulação computacional seria o método mais preciso para as avaliações de desempenho térmico.

No mesmo ano, Silva *et al.* (2014) avaliaram o procedimento de simulação computacional a fim de identificar as incertezas do método aplicado para uma habitação unifamiliar térrea, concluindo que, levando em consideração que essa versão da norma avalia dias típicos de verão e inverno para determinar o nível de desempenho térmico, as variáveis desconsideradas pela norma na criação desses dias típicos exercem considerável influência nos resultados, o que ocasiona uma série de imprecisões nos resultados.

Apesar do avanço que a publicação da NBR 15575 representou no setor da construção civil, algumas limitações e incongruências foram identificadas nos métodos de avaliação do desempenho térmico, como as constatadas por Chvatal (2014) e Silva *et al.* (2014), culminando em uma nova revisão em 2021 que deu origem à versão hoje utilizada.

A versão que hoje vigora é dividida em seis partes, organizadas da seguinte forma:

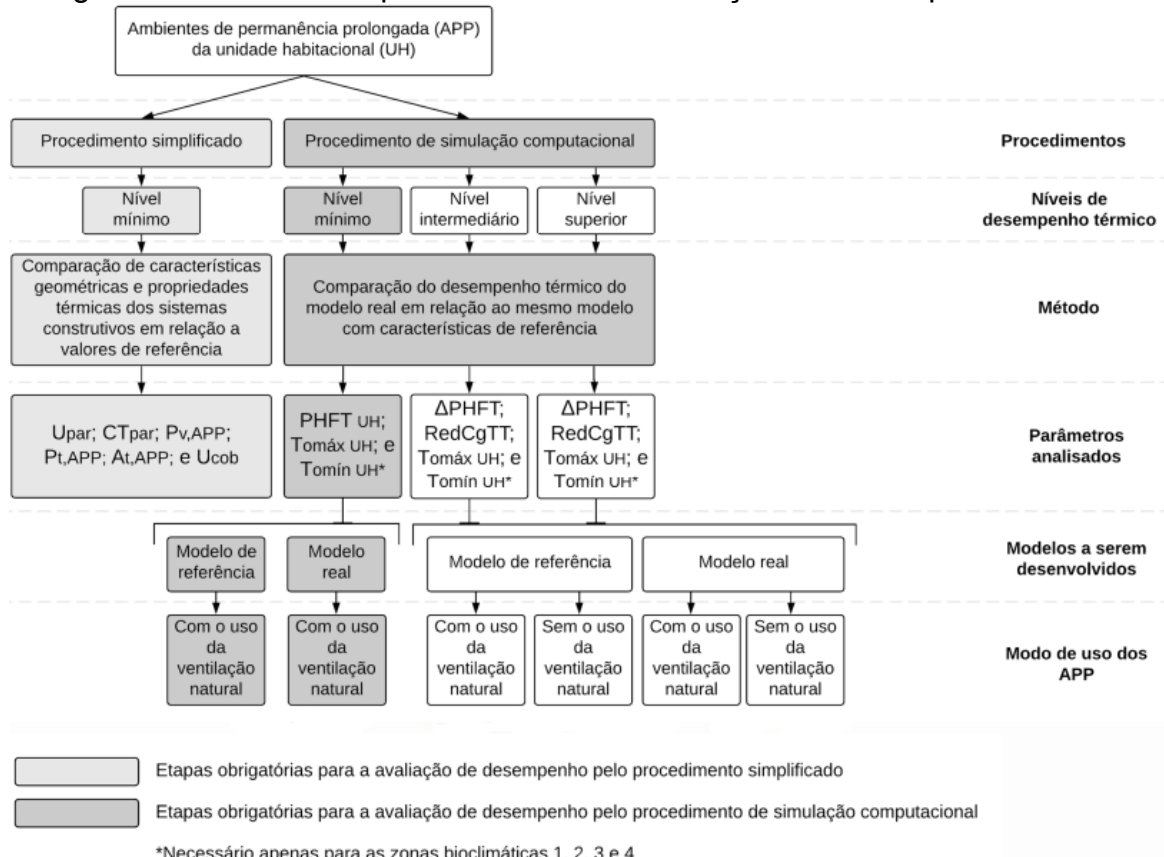
- Parte 1: Requisitos gerais;
- Parte 2: Requisitos para os sistemas estruturais;
- Parte 3: Requisitos para os sistemas de pisos;
- Parte 4: Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas – SVVIE;
- Parte 5: Requisitos para os sistemas de coberturas;
- Parte 6: Requisitos para os sistemas hidrossanitários.

O desempenho térmico, item 11 da parte 1 deste documento normativo, trata dos requisitos relacionados ao desempenho térmico das edificações, ao qual será dado maior atenção no presente trabalho.

Para a avaliação do desempenho térmico, a NBR 15575:2021 estabelece três níveis de desempenho aos quais a edificação pode se enquadrar: mínimo, intermediário e superior, sendo o nível mínimo de caráter obrigatório. A forma com que este enquadramento é realizado pode variar de acordo com o nível de desempenho que se queira avaliar, podendo ser utilizado um dos dois procedimentos descritos na norma: procedimento simplificado e procedimento de simulação computacional. Ambos os procedimentos utilizam como método a comparação de

valores de referência com o modelo real da edificação avaliada, e são resumidos na Figura 2.

Figura 2 - Resumo dos procedimentos de avaliação do desempenho térmico



Fonte: ABNT (2021a).

O procedimento simplificado permite a análise do desempenho térmico para a obtenção do nível mínimo e consiste na comparação das características geométricas e propriedades térmicas dos sistemas construtivos da edificação real em relação a valores de referência considerando a operação da edificação com o uso apenas da ventilação natural. Nesse procedimento, as propriedades térmicas avaliadas são a transmitância térmica (U_{par}) e a capacidade térmica (CT_{par}) das vedações verticais externas, além do percentual de abertura para ventilação (Pv,APP) em cada área de permanência prolongada (APP). Também são avaliados o percentual de elementos transparentes (Pt,APP) e suas áreas superficiais (At,APP) em cada APP. Para as coberturas, apenas sua transmitância térmica (U_{cob}) é avaliada.

Moreira, Celis e Rodrigues (2022) testaram o procedimento simplificado da NBR 15575:2021 por meio da avaliação do desempenho térmico de uma vila operária localizada em Alemirim (PA). A partir da identificação dos materiais construtivos das

paredes e cobertura e suas respectivas propriedades térmicas, foi observado que a edificação não atingiu sequer o nível mínimo de desempenho térmico, independentemente da absorvância adotada para as paredes, o que dispensou uma análise posterior utilizando o procedimento de simulação computacional.

No procedimento de simulação computacional, é possível avaliar, além do nível mínimo de desempenho térmico, os níveis intermediário e superior, considerando que a edificação é utilizada com e sem o uso da ventilação natural. Da mesma forma como é realizado no procedimento simplificado, utiliza-se a comparação do modelo real com valores de referência que, no caso do método de simulação, é realizada a partir da modelagem de dois modelos computacionais: o modelo real e o modelo de referência, como proposto por Krelling *et al.* (2020). O modelo real é, basicamente, uma versão computacional da UH real, que conserva as características de geometria e propriedades dos materiais construtivos conforme observado na realidade. O modelo de referência mantém a geometria da UH real, mas altera algumas características conforme descrito no item 11.4.7.2 da NBR 15575:2021-1, que equivalem à uma edificação que atende ao nível mínimo de desempenho térmico (Krelling *et al.*, 2020). Os dados de entrada utilizados para configurar o modelo de referência no programa de simulação são descritos nos itens que seguem.

2.3.1 Materiais construtivos

A forma com que uma edificação é projetada, construída e utilizada define seu desempenho térmico. Dentre os inúmeros fatores que impactam os indicadores de desempenho, a envoltória apresenta papel fundamental. A norma ABNT NBR 15220-3:2024, ao dividir o território brasileiro em zonas bioclimáticas, evidencia as particularidades de cada localidade, trazendo à discussão a necessidade de diretrizes construtivas para HIS que melhor se adaptem ao clima onde se inserem, reforçando a importância da escolha correta da envoltória.

Estudos como os de De Souza *et al.* (2022), Veiga (2023) e Kamimura (2022) destacam o grande impacto que pequenas alterações apresentam no desempenho térmico de residências. Os autores realizaram testes alterando, entre outros aspectos, os materiais construtivos e a absorvância das vedações verticais, percentual da área de piso referente às aberturas das janelas e a inserção de isolamento na cobertura. Em todos os testes foram identificadas melhoras expressivas com a diminuição do valor da absorvância, tanto das paredes como da cobertura. Comparativamente,

observa-se a diferença das melhores soluções construtivas adotadas para cada localidade considerada, evidenciando o impacto do clima local e a necessidade de uma avaliação prévia desses fatores ainda em fase de projeto.

Com o intuito de identificar os ganhos ou perdas em desempenho térmico relacionados à envoltória das edificações, a ABNT NBR 15575:2021 estipula materiais construtivos padronizados para o modelo de referência, referentes a um modelo de vedação de concreto maciço de 10 cm de espessura para paredes, pisos e lajes. As propriedades térmicas (condutividade, calor específico, absorvância, emissividade de onda longa e densidade) dos materiais utilizados para compor o modelo de referência são descritas na Tabela 1.

A cobertura é composta por laje, câmara de ar com resistência térmica de 0,21 ($\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$) e telha de 6 mm de espessura, com propriedades também descritas na Tabela 1. Além disso, a norma de desempenho estabelece que, para cidades localizadas na zona bioclimática 8, seja incluída sobre a laje uma camada de isolante com resistência térmica igual a 0,67 ($\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$), absorvância igual a 0,7 e emissividade de ondas longas igual a 0,9.

Tabela 1 - Propriedades dos materiais construtivos

Elemento	k [$\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$]	c [$\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$]	α	ϵ	ρ [kg/m^3]
Paredes externas	1,75	1000	0,58	0,9	2200
Paredes internas	1,75	1000	0,50	0,9	2200
Pisos	1,75	1000	0,50	0,9	2200
Lajes	1,75	1000	0,50	0,9	2200
Telha	0,65	840	0,65	0,9	1700

Fonte: adaptado de ABNT (2021a).

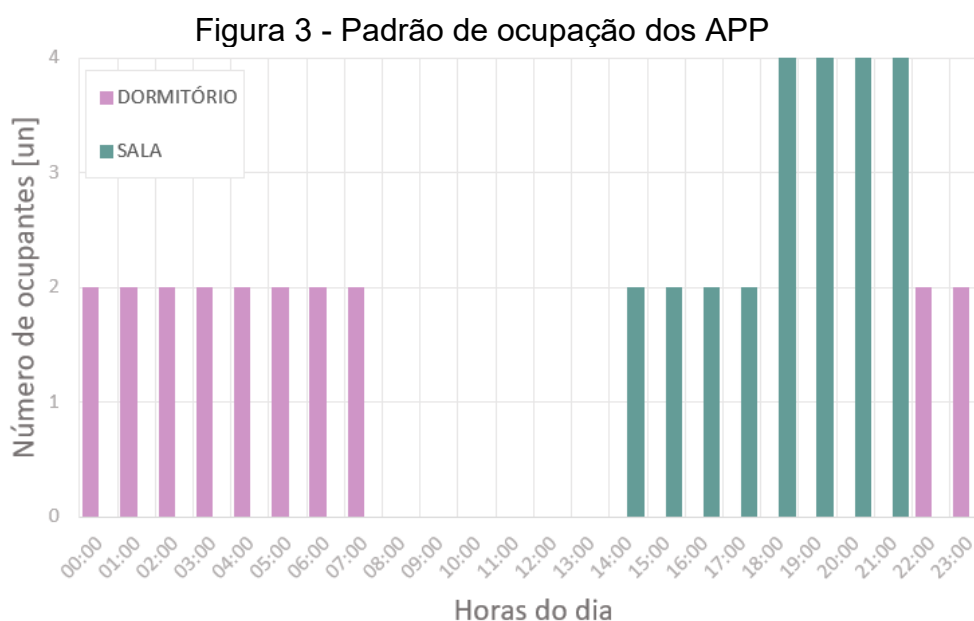
O uso extensivo de fechamentos envidraçados em ambientes residenciais de climas quentes é um dos fatores associados à busca por formas ativas de climatização, como o emprego do ar condicionado (Fonseca *et al.*, 2021). Em 2021, com a nova versão da norma de desempenho de edificações residenciais, um novo critério relacionado aos fechamentos envidraçados foi inserido, relacionado ao percentual e com a área de superfície de elementos transparentes de um ambiente, regulamentando grandes áreas envidraçadas presentes nas fachadas (ABNT, 2021a).

As propriedades e área dos elementos transparentes presentes nos APP da edificação do modelo de referência também são padronizados e correspondem a 17%

da área de piso do APP onde estão inseridos, apresentando fator solar igual a 0,87 e transmitância térmica de $5,7 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, o que equivale a um vidro comum de 6 mm.

2.3.2 Padrão de ocupação e taxa metabólica

O padrão de ocupação contempla apenas os ambientes de permanência prolongada e se refere ao período e a quantidade de usuários que ocupam o APP em questão, inserido no programa *EnergyPlus* por meio de *schedules* de ocupação. A Figura 3 apresenta esse padrão para os dois APPs que são considerados nas análises: dormitório e sala. Para os dormitórios, a capacidade total equivale a duas pessoas por dormitório e para a sala a ocupação total equivale ao somatório da ocupação dos dormitórios, com capacidade máxima de quatro pessoas. As residências da faixa 1 do programa MCMV são compostas por dois dormitórios e uma sala, ou seja, nesse caso, por apresentar dois dormitórios, a ocupação total da sala se acontece a mesma está ocupada por quatro pessoas.



Fonte: a autora.

Nos períodos de ocupação de cada APP, considera-se uma taxa metabólica correspondente ao tipo de atividade desempenhada pelos ocupantes neste ambiente. Nos dormitórios, considera-se que a atividade realizada nos períodos de ocupação equivale a uma pessoa dormindo ou descansando, o que produz 81 W de calor, com fração radiante igual a 0,3, considerando uma pessoa com $1,80 \text{ m}^2$ de área de superfície corporal. Já na sala, o calor produzido durante os períodos ocupados é de

108 W, também com fração radiante igual a 0,3, equivalente a uma pessoa sentada ou assistindo televisão.

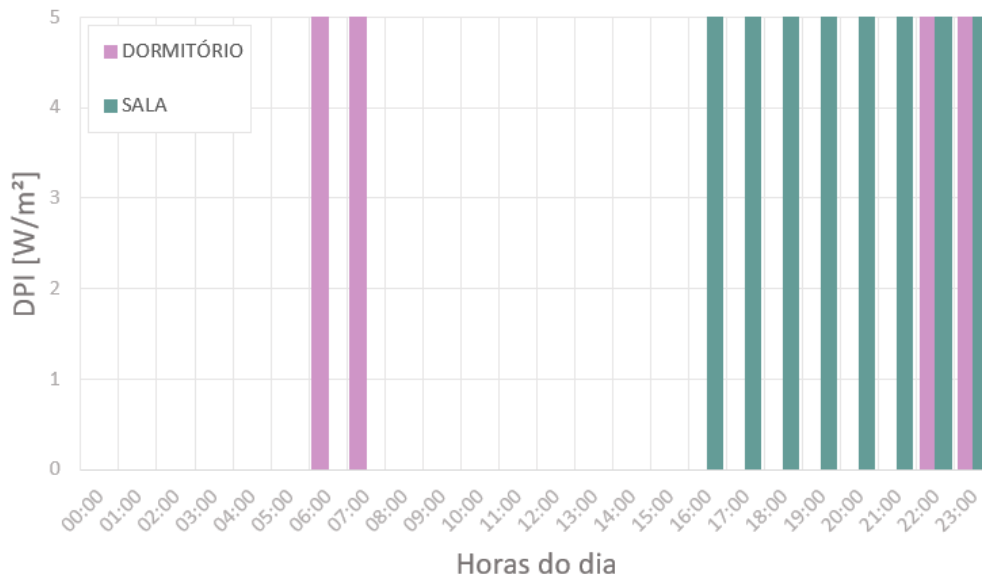
O padrão de ocupação dos espaços influencia diretamente nos resultados de desempenho térmico de uma edificação. Eli (2020) buscou avaliar o impacto de diferentes padrões de uso no desempenho térmico de uma edificação unifamiliar térrea para três climas brasileiros, identificando uma variação de até 85% na carga térmica de resfriamento dependendo da maneira com que a habitação é ocupada e até 4 °C na temperatura operativa, quando utilizado o procedimento de simulação computacional descrito na norma NBR 15575:2021.

Pierozan *et al.* (2023) utilizaram de questionários distribuídos para moradores de um conjunto habitacional localizado em Caxias do Sul (RS) para levantamento e definição da maneira como as residências eram ocupadas e utilizadas. Utilizando também o procedimento de simulação computacional descrito pela NBR 15575:2021, foram computadas as cargas térmicas e as temperaturas operativas para os ambientes, considerando os padrões de ocupação descritos na norma e observados por meio dos questionários. Como resultado, foi observado um consumo de mais de 23% de energia quando considerado o padrão de ocupação descrito na normativa, evidenciando a complexidade da definição de um único padrão de ocupação que contemple a realidade de todas as edificações residenciais.

2.3.3 Padrão de uso de equipamentos e iluminação

Os padrões de acionamento e desligamento dos sistemas de iluminação dos APP são estabelecidos de acordo com a ocupação e hora do dia, com características iguais para a sala e dormitórios, como descrito na Figura 4. Considera-se uma densidade de potência instalada (DPI) igual a 5 W/m², fração radiante igual a 0,32 e fração visível igual a 0,23.

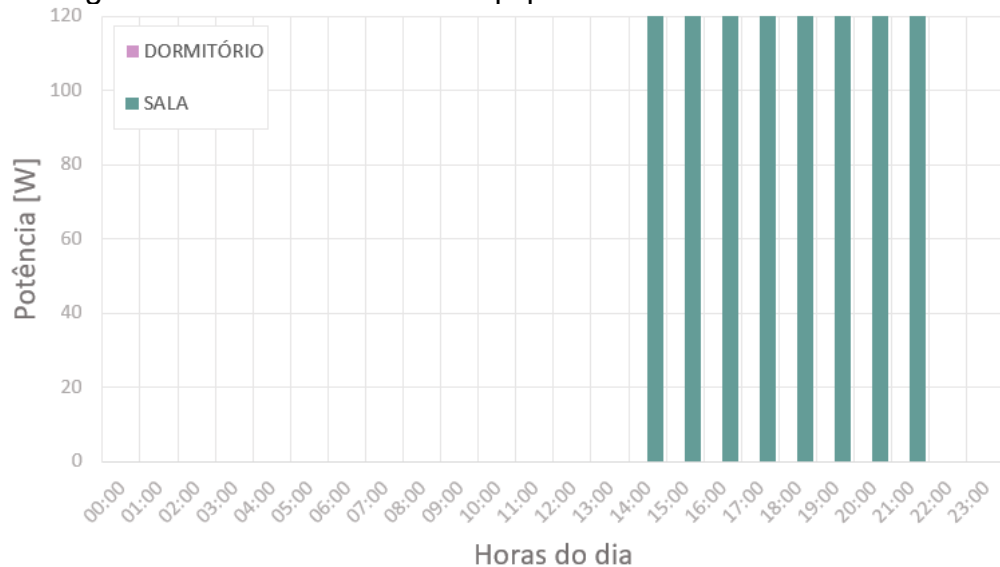
Figura 4 - Padrão de iluminação dos APP.



Fonte: a autora.

Além dos sistemas de iluminação, na sala também é considerada a carga interna de equipamentos durante o período de ocupação do APP, como mostra a Figura 5. A fração radiante dos aparelhos é configurada como sendo igual a 0,3 e a carga interna é constante, no valor de 120 W.

Figura 5 - Padrão de uso de equipamentos nos APP.



Fonte: a autora.

2.3.4 Contato com o solo

Em todas as simulações, em especial para unidades habitacionais térreas, é importante definir como ocorrerão as trocas térmicas entre a edificação e o solo, uma

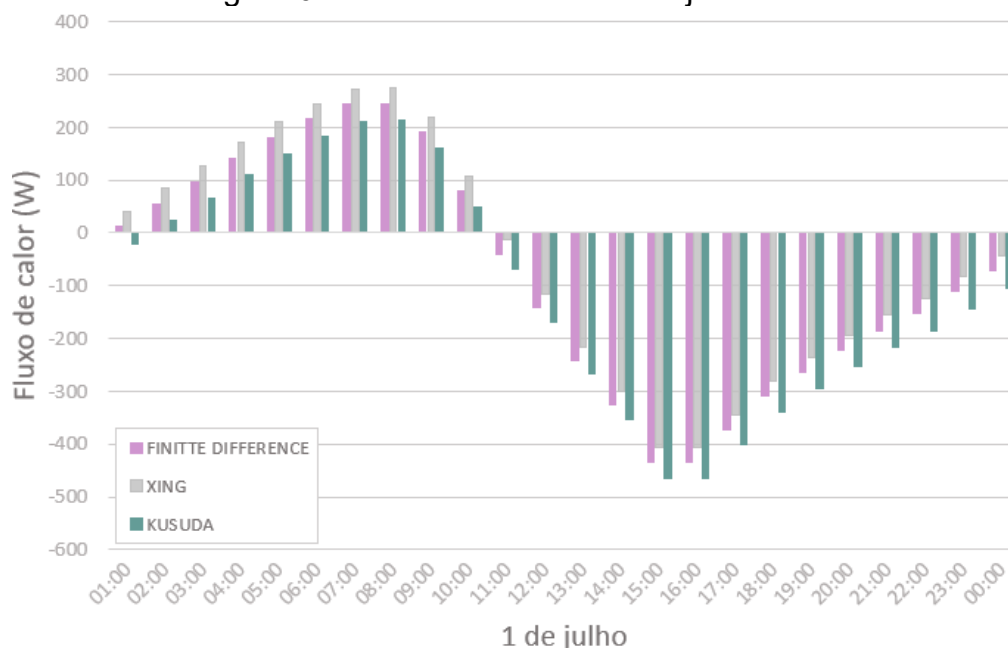
vez que o contato da edificação com o solo permite perdas significativas de calor, reduzindo as temperaturas internas (Mazzafero; Melo; Lamberts, 2015). A NBR 15575:2021-1 não determina a maneira com que o solo deve ser configurado no programa de simulação, apenas orienta que essa modelagem seja realizada da mesma forma no modelo de referência e no modelo real.

O contato com o solo pode ser configurado de várias maneiras no programa *EnergyPlus*: inserindo as temperaturas médias mensais do solo no objeto *Site:GroundTemperature:BuildingSurface*; utilizando o objeto *DetailedGroundHeatTransfer* que engloba dois pré-processadores: *Slab* e *Basement*; ou ainda através do objeto *GroundDomain*, que também é dividido em *Slab* e *Basement* (Eli et al., 2019).

Para a configuração dos modelos utilizados na presente pesquisa, foi utilizado o objeto *GroundDomain:Slab* e o modelo de cálculo *FiniteDifference*, que usa um método de diferenças finitas implícito para obter as temperaturas do solo que estão em contato com as superfícies horizontais (lajes) da edificação. Estas superfícies interagem com o solo, fornecendo temperaturas atualizadas utilizadas nos cálculos de troca de calor da superfície para o objeto *OtherSideConditionsModel*, que é utilizado para caracterizar lajes em contato com o solo.

A modelagem do solo através do método de cálculo *FiniteDifference* foi adotado pois apresenta valores de temperatura intermediários quando comparado aos dois outros métodos de cálculo do objeto *GroundDomain:Slab*: *KusudaAchenbach* e *Xing*, como mostra a Figura 6, que apresenta o fluxo de calor entre a laje e o solo para um dia de inverno na cidade de Curitiba (PR).

Figura 6 - Fluxo de calor entre a laje e o solo.



1 de julho
Fonte: a autora.

2.3.5 Ventilação Natural

Para atender aos requisitos exigidos pelo procedimento de simulação computacional descrito no item 11 da NBR 15575:2021-1, a modelagem da edificação deve ser elaborada considerando duas formas de utilização dos APP: com e sem o uso da ventilação natural.

Quando é utilizada a ventilação natural para avaliação do edifício, as janelas dos ambientes de permanência prolongada da edificação são consideradas operáveis pelo usuário e adota-se a temperatura de bulbo seco de 19 °C no interior do APP como guia para que a janela seja aberta, além de quando a temperatura de bulbo seco interna for superior à temperatura de bulbo seco externa, ou seja, quando a temperatura interna é superior à externa.

Para os ambientes de permanência transitória (APT), deve-se sempre considerar que as janelas estão fechadas, com exceção do banheiro, onde a janela encontra-se permanentemente aberta. Quanto às portas, estas devem estar sempre abertas entre APP e APT, com exceção da porta do banheiro, que deve ser considerada sempre fechada.

Em todos os casos, as aberturas de acesso às APP e APT interna e externamente às UH são fechadas por meio de portas de madeira com condutividade térmica igual a 0,15 W/(m.K), calor específico igual a 2300 J/(kg.K), absorvância à

radiação solar de 0,5, emissividade de onda longa de 0,9 e densidade igual a 650 kg/m³.

Mesmo quando fechadas, em condições reais, as esquadrias apresentam frestas por onde há fluxo de ar. Por esse motivo, essas frestas também são incluídas na interface do programa de simulação, pois irão interferir na ventilação do ambiente. O valor adotado para o coeficiente de fluxo de ar por essas frestas, quando a abertura está fechada, é igual a 0,0024 kg/(s.m) para portas e 0,00063 kg/(s.m) para janelas, enquanto o expoente de fluxo de ar para a mesma situação é igual a 0,59 para portas e 0,63 para janelas. Já o coeficiente de descarga da abertura é igual a 0,6 tanto para portas quanto para janelas.

Os dados de entrada descritos acima são inseridos no programa *EnergyPlus* por meio dos objetos do módulo *AirflowNetwork*, que calcula o fluxo de ar entre as zonas térmicas da edificação e o exterior, através das janelas e frestas encontradas entre as esquadrias. A importância do estudo da ventilação natural em edifícios residenciais é bastante discutida, em especial no cenário de crise energética e consequente necessidade do uso racional de energia.

Ferreira e De Souza (2019) procuraram identificar as variáveis de maior influência no desempenho térmico de duas tipologias de habitações residenciais, considerando diferentes cenários climáticos brasileiros. Utilizando o programa *EnergyPlus*, foram selecionadas sete variáveis relacionadas à geometria da edificação, dentre as quais considerou-se a área e orientação solar da abertura para ventilação, modelada utilizando o objeto *AirflowNetwork*. Os autores observaram que a ventilação natural foi uma das variáveis de maior impacto em todas as zonas bioclimáticas consideradas, especialmente para a edificação unifamiliar, onde a área da envoltória é reduzida quando comparada à tipologia multifamiliar, evidenciando a importância dos estudos relacionados à ventilação natural.

Por ser uma estratégia passiva para o incremento do desempenho térmico de uma edificação, o emprego da ventilação natural deve ser incentivado. Com base nesta afirmação, Castano (2017) avaliou o impacto de dispositivos de sombreamento externos às aberturas de uma HIS no desempenho térmico. Para isso, utilizou dos objetos do *AirflowNetwork* para realizar simulações computacionais, constatando que, dos dispositivos estudados, a veneziana proporcionou os melhores resultados de desempenho térmico, mas foram muros que apresentaram maior impacto nos

coeficientes de pressão analisados e, consequentemente, nas taxas de renovação de ar, que reduziram em mais de 50%.

A partir do entendimento e da simulação do edifício considerando o uso da ventilação natural, a NBR 15575:2021 estabelece a utilização de três indicadores (são quatro no total, um deles referente à carga térmica) utilizados para avaliar o desempenho térmico da unidade habitacional:

1. Percentual de horas de ocupação dentro de uma faixa de temperatura operativa (PHFT): razão entre as horas de ocupação dentro de uma faixa de temperatura operativa estabelecida e o total de horas de ocupação do ambiente, calculado para cada APP e com PHFT da UH obtido a partir da média aritmética entre os valores de PHFT de todos os APP.

2. Temperatura operativa anual máxima (Tomáx): valor médio entre a temperatura do ar e a temperatura radiante média máxima observada em um APP, durante seu período de ocupação. Para a UH, a Tomáx é considerada a maior entre os valores encontrados para os APP.

3. Temperatura operativa anual mínima (Tomín): valor médio entre a temperatura do ar e a temperatura radiante média mínima observada em um APP, durante seu período de ocupação. Para a UH, a Tomín é considerada a menor entre os valores encontrados para os APP. Esse indicador é utilizado apenas para avaliações de edificações localizadas nas zonas bioclimáticas 1, 2, 3 e 4.

2.3.6 Carga térmica

Diversas normas de desempenho térmico existentes no mundo avaliam as edificações apenas considerando o uso de sistemas ativos de climatização, desconsiderando a ventilação natural. A cultura e os hábitos da população brasileira mostram que este tipo de avaliação não se aplica à realidade do país, uma vez que a climatização ativa e passiva é bastante observada nas residências (Kreling *et al.*, 2023). Por isso, a NBR 15575:2021 considera o uso da edificação com e sem ventilação natural, abrangendo ambos os cenários.

Assim, a segunda maneira com que os APP podem ser utilizados, segundo a norma de desempenho em edificações, é adotando condicionadores de ar que podem vir a aquecer ou resfriar o ambiente, com *setpoint* definido através dos *schedules* de acionamento, inseridos no programa de simulação, que são combinados com os *schedules* de ocupação, ou seja, os aparelhos de condicionamento de ar só podem

ser acionados quando há ocupação no APP. Ambos os sistemas, tanto de resfriamento quanto de aquecimento, são considerados ideais, então operam sem perdas de energia durante sua operação, e computam a carga térmica necessária para aquecer ou resfriar o APP até que se atinja a temperatura desejada.

De acordo com a NBR 15575, os sistemas de aquecimento da UH devem ser configurados de forma que sejam acionados quando a temperatura do ambiente interno seja igual a 18 °C, com temperatura de *setpoint* igual a 21 °C. Já os sistemas de resfriamento devem ser acionados quando a temperatura do APP atingir 26 °C e devem apresentar temperatura de *setpoint* igual a 23 °C.

Quando a edificação é utilizada sem que seja considerado o uso da ventilação natural obtém-se o quarto e último indicador de desempenho térmico da norma de desempenho em edificações. Os outros três indicadores são obtidos quando a edificação é operada com o uso da ventilação natural, conforme descrito em 2.3.5. O indicador de carga térmica é apresentado abaixo, conforme a NBR 15575:2021-1:

1. Carga térmica total (CgTT): quantidade de calor, fornecida e/ou retirada do ar, para manter as condições desejadas de um ambiente. Para a UH, a CgTT é calculada a partir da soma da CgTT de todos os APP.

Frente às formas de avaliação do uso das edificações residenciais segundo a normativa NBR 15575:2021, Eli *et al.* (2021) discutem os desafios relacionados às padronizações do uso de uma edificação para uma análise geral, como ocorre em uma norma regulamentadora. No estudo, a climatização em modo misto para resfriamento e aquecimento foi utilizada, considerando diferentes sistemas construtivos e climas, porém frisando que no Brasil a estratégia de resfriamento mais utilizada é a ventilação natural. Foram utilizadas formas de uso observadas em outros países, como considerar o uso de ar condicionado durante todo o ano, concluindo que, no Brasil, o ideal é que a ventilação natural seja priorizada como método de avaliação do desempenho térmico.

Nas duas formas de uso da edificação, grande parte dos dados de entrada são padronizados pela normativa, culminando numa avaliação de desempenho bastante atrelada às soluções construtivas utilizadas, e não tanto ao usuário, cujo comportamento é de difícil previsão.

2.3.7 Dados Climáticos

Para avaliar o desempenho térmico de uma edificação, as informações climáticas são fundamentais. A análise do clima local é crucial para orientar as decisões de projeto e, para isso, é essencial que o arquivo climático utilizado contenha dados confiáveis e bem definidos (ABNT, 2021a).

A NBR 15575:2021 analisa o desempenho térmico das edificações com base em intervalos de temperaturas do ambiente externo. Estes intervalos são definidos de acordo com a média anual da temperatura externa de bulbo seco (TBS_m), retirada do arquivo climático utilizado, como mostra a Tabela 2. Por esse motivo, é importante que o arquivo climático utilizado apresente dados consistentes e confiáveis, uma vez que irá reger as futuras análises.

Tabela 2 - Intervalos de temperatura externa de bulbo seco

Intervalos de temperaturas externas	Média anual da temperatura externa de bulbo seco (TBS_m) [°C]
Intervalo 1	$TBS_m < 25,0\text{ °C}$
Intervalo 2	$25,0\text{ °C} \leq TBS_m < 27,0\text{ °C}$
Intervalo 3	$TBS_m \geq 27,0\text{ °C}$

Fonte: adaptado de ABNT (2021a).

Atualmente, existe uma série de arquivos climáticos que são utilizados em simulações termoenergéticas e análise de dados climáticos. No entanto, em escala global, ainda não existe um consenso a respeito de qual deles deve ser empregado, uma vez que as formas de medição e coleta de dados variam muito. Ainda, discute-se a eficácia em simular projetos de edifícios futuros com dados climáticos que representam o passado (Bracht *et al.*, 2022), levando em conta os impactos das mudanças climáticas que já vem sendo observados no consumo energético das edificações (Bhandari; Shrestha; New, 2012).

Em vista a isso, estudos como os de Bracht *et al.* (2022), Amoako-Attah e B-Jahromi (2016) e Westphal (2020) avaliaram as incertezas e diferenças frente a escolha do arquivo climático na simulação termoenergética de edifícios, identificando diferenças significativas nas temperaturas operativas internas, trocas de ar e carga térmica da mesma edificação, quando alterado o arquivo utilizado. Os autores também destacam a grande fonte de incertezas que a escolha do arquivo climático representa

em uma simulação computacional, frisando a necessidade de se atentar ao método de obtenção e tratamento de dados.

A fim de comparar arquivos climáticos bastante utilizados para simulações de desempenho térmico e energético no Brasil, Scheller *et al.* (2015) publicaram um relatório que compara os arquivos TRY, SWERA e INMET para quinze cidades brasileiras através de quatro variáveis climáticas. Os resultados observados levaram os autores a concluir que os arquivos analisados são imprecisos e de baixa qualidade, ressaltando, também, a necessidade de um maior detalhamento dos dados e estudos mais aprofundados.

Uma vez identificados os problemas e dúvidas presentes na escolha do arquivo climático ideal para as simulações, a NBR 15575:2021 optou por padronizar a base de dados dos arquivos climáticos utilizados para avaliar o desempenho das edificações. Essa base foi elaborada pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) com dados coletados entre os anos de 2001 e 2010 em estações meteorológicas distribuídas pelo Brasil.

Os arquivos da base padrão estão no formato CSV (separado por vírgula), com extensão EPW, e incluem dados horários representativos das 8760 horas do ano meteorológico típico (TMY). Eles contêm informações sobre oito variáveis climáticas, assim como os demais arquivos climáticos existentes: temperatura do ar, umidade relativa, ponto de orvalho, pressão atmosférica, velocidade do vento, direção do vento, pluviosidade e radiação solar global horizontal.

2.4 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE EDIFICAÇÕES

Nos últimos anos, o desenvolvimento de normas e métodos para avaliar o desempenho térmico em edificações tem avançado rapidamente, impulsionado pela urgência de reduzir o consumo de energia, um desafio global. Dada essa necessidade, o surgimento de programas computacionais que simulam as complexas interações entre uma edificação, seu ambiente externo e todos os seus sistemas não é apenas uma inovação útil, mas uma ferramenta indispensável para enfrentar os desafios térmicos de forma eficaz (Trindade; Pedrini; Duarte, 2010).

Os programas de simulação têm a capacidade de prever o comportamento da envoltória da edificação, a dinâmica da transferência de calor entre superfícies e até mesmo as cargas térmicas necessárias para atingir o conforto térmico ideal. Assim, é

possível quantificar a economia de energia, o conforto obtido e a melhora no desempenho térmico com pequenas alterações em projetos, sejam estas no desenho arquitetônico, nos componentes construtivos, nos sistemas de iluminação ou de climatização (Zhai *et al.*, 2001; Mendes *et al.*, 2005). Além disso, essas simulações permitem a análise isolada de cada fator envolvido, algo que muitas vezes não é possível em experimentos reais (Sorgato; Melo; Lamberts, 2016).

Uma das principais vantagens do uso de ferramentas computacionais é a possibilidade de variar um grande número de parâmetros sem a necessidade de intervenção física na edificação. Isso permite analisar diversas possibilidades de maneira combinada ou isolada, e avaliar o impacto de diferentes soluções na melhoria do desempenho térmico, tanto para edificações existentes quanto para novos projetos, auxiliando na tomada de decisão por parte do projetista (Sorgato, 2009).

Frente a este grande potencial da utilização de programas de simulação computacional em fases de projeto, De Souza (2020) propôs um método de ensino de simulações termoenergéticas para estudantes e profissionais envolvidos com projetos, principalmente arquitetônicos. Para isso, a autora realizou um levantamento dos programas aplicáveis a essa etapa, realizando experimentos de aplicação dos programas com arquitetos e estudantes de arquitetura. Ao fim da pesquisa, foi reforçada a necessidade de utilização da simulação computacional para agilizar e otimizar o processo de projeto para a obtenção de edifícios que respondam melhor ao clima inserido.

Os primeiros programas de simulação computacional surgiram na década de 1970, com destaque para o NBSLD, desenvolvido nos Estados Unidos. No final dessa década, outros programas, como DOE-2, BLAST, RADIANCE e ESP-r, foram criados, estabelecendo as bases para o desenvolvimento de ferramentas amplamente utilizadas até hoje, como *EnergyPlus*, FLUENT, CFX e PHOENICS (Mendes *et al.*, 2005). Atualmente, existe uma ampla gama de ferramentas disponíveis para simulação de edifícios, muitas das quais estão listadas no diretório *Building Energy Software Tools*, mantido pelo governo dos Estados Unidos (IBPSA-USA, 2023; IBPSA-Brasil, 2023).

Dentre a vasta quantidade de ferramentas computacionais destinadas à simulação de edifícios, apresenta-se o programa *EnergyPlus*, que será utilizado para a realização das análises do presente trabalho. O *EnergyPlus* é um programa com licença gratuita desenvolvido pelo *Lawrence Berkeley National Laboratory* (LBNL)

pertencente ao governo dos Estados Unidos, baseado nos programas BLAST (utilizado para análise de consumo energético) e DOE-2 (utilizado para análise de desempenho térmico), desenvolvidos no final da década de 1970 (De Souza, 2022). O programa é validado pela ASHRAE Standard 140, que é um método de validação de programas computacionais de avaliação energética de edificações, e apresenta recursos para simular o consumo de energia e as trocas térmicas resultantes dos efeitos radiantes e convectivos nos ambientes internos durante cada intervalo de tempo da simulação, tudo com uma interface bastante simplificada, porém não tão amigável ao usuário, retornando resultados através de arquivos no formato CSV (Crawley *et al.*, 2004). Todos os sistemas da edificação são englobados na análise: climatização, iluminação, cargas internas, propriedades térmicas de materiais, contato com o solo, ventilação natural e outros vários, que podem ser isolados e verificados individualmente (Melo, 2018).

O programa *EnergyPlus* permite que sejam inseridos dados de entrada das características da edificação analisada, como a configuração de seus ambientes, orientação de implantação, sistemas e materiais construtivos. Através destes parâmetros, juntamente com o arquivo climático do local para o qual pretende-se realizar o estudo, são realizadas as simulações. A possibilidade de inserção de diferentes dados de entrada no programa *EnergyPlus* permite a realização de uma simulação bastante realista (Schaedler, 2014).

Como resultado das simulações realizadas no *EnergyPlus* é possível obter dados a respeito das cargas térmicas de refrigeração e aquecimento necessárias para manter o conforto dentro dos ambientes, valores das temperaturas operativas máximas e mínimas de cada um dos ambientes quando utilizada a ventilação natural, além do percentual de horas ocupadas dentro de uma faixa de temperatura operativa. Em posse desses dados, a avaliação das estratégias a serem adotadas torna-se facilitada, tornando o *EnergyPlus* um dos programas mais utilizados mundialmente para diversas finalidades, visando melhorar o desempenho térmico e a eficiência energética das edificações, além de atender aos requisitos mínimos da NBR 15575:2021-1 em relação à ferramenta de simulação.

Toroxel, Silva e Fernandes (2024), com o intuito de avaliar o potencial de varandas envidraçadas em melhorar o comportamento térmico de edificações no norte de Portugal, utilizaram o *EnergyPlus* com o auxílio do *plugin Open Studio*. Para a análise, consideraram três cenários com diferentes tipos de varanda para o mesmo

modelo de edificação: varanda aberta, varanda envidraçada do tipo corredor e varanda envidraçada separada em três ambientes menores. Como resultado para o caso proposto, observou-se a diminuição na demanda por energia para aquecimento e resfriamento em mais de 47% nos casos com varanda envidraçada quando comparados com a varanda aberta, evidenciando a capacidade das varandas em reduzir o consumo energético nas edificações e favorecer o conforto térmico. No entanto, é importante entender as particularidades do caso estudado. O clima considerado no estudo apresenta temperaturas médias mínimas próximas de 6,5 °C, enquanto as médias máximas estão entre 22,8 °C, ou seja, a realidade climática demanda um maior gasto energético com sistemas de aquecimento, o que faz com que varandas envidraçadas sejam bastante úteis, uma vez que funcionam aquecendo a edificação, o que pode ser indesejado em climas quentes.

No âmbito da NBR 15575:2021, diversos estudos vêm sendo realizados utilizando o método de simulação computacional por meio do *EnergyPlus*, comprovando a eficácia das análises quando utilizado este programa. Krelling *et al.* (2023) investigaram mais a fundo o método de simulação computacional da normativa, avaliando os impactos de alguns dados de entrada e destacam a grande influência do comportamento do usuário no desempenho térmico de uma edificação e a dificuldade de padronizar alguns comportamentos e estratégias em vista da vastidão do território nacional brasileiro. Para a análise, utilizaram, além dos indicadores de desempenho térmico descritos na NBR 15575:2021, outros indicadores a fim de complementar a análise, dentre os quais se destacam os indicadores IOD - grau de sobreaquecimento interno e t_R - tempo de recuperação, que complementam os indicadores de PHFT e Tomáx, respectivamente, e elevam a abordagem do desempenho térmico considerando, também, os conceitos de resiliência das edificações.

Veiga, de Souza e Lamberts (2023) avaliaram a influência da orientação solar no desempenho térmico de uma HIS para diferentes climas do Brasil, utilizando o método de simulação computacional da NBR 15575:2021, por meio do programa *EnergyPlus*, variando a orientação de implantação em intervalos de 45°. De acordo com o clima avaliado, observaram que a orientação de melhor desempenho não é a mesma para os climas analisados, e que as orientações intermediárias nem sempre seguem o padrão das orientações mais próximas, e devem ser consideradas.

Eli, Melo e Lamberts (2024), pautados nos princípios de troca de calor, propuseram um método baseado no índice de troca de calor (HEI) para auxiliar nas

análises de desempenho térmico em edificações, utilizando o programa *EnergyPlus*. Para exemplificar a aplicação do *framework* foi utilizada uma HIS unifamiliar e dois climas brasileiros e, a partir do caso base, foram realizadas análises do balanço térmico no ar das zonas térmicas, regidas pelas trocas de calor convectivas, e do balanço térmico nas superfícies de cada uma das zonas térmicas, considerando trocas de calor por condução, convecção e radiação. A partir da análise das trocas de calor, definem-se aquelas que regem o balanço térmico na edificação por meio do índice de troca de calor, a partir das quais são definidas estratégias para melhorar o desempenho térmico da envoltória. As contribuições do estudo estão relacionadas à otimização em identificar os locais com maior necessidade de intervenção na edificação, relacionados ao desempenho térmico, por meio do HEI, que define onde ocorrem as maiores trocas de calor na edificação.

Apesar das vantagens relacionadas à utilização dos programas de simulação, em especial o *EnergyPlus*, ainda são observadas algumas limitações. Kim e Park (2011) questionam a acurácia das considerações dos programas de simulação frente a geometrias de edificações mais complexas, como a presença de fachadas duplas. Veiga *et al.* (2019), ao identificarem lacunas nas trocas de calor em elementos translúcidos quando utilizada a ventilação natural no *EnergyPlus*, procuraram compreender o impacto das limitações nos resultados obtidos. Os autores identificaram, por meio do sistema de controle *Energy Management System*, que o programa não permite a ausência completa de um elemento translúcido nas janelas, afetando o fluxo de radiação e tornando necessária a inserção de um material que simule a abertura total da janela, permitindo a passagem de ondas longas e curtas livremente nos dois sentidos (para o exterior e interior da edificação).

Levando em consideração as limitações nos modelos de simulação ventilados naturalmente descritos por Kim e Park (2011) e Veiga *et al.* (2019), Loche *et al.* (2024) utilizaram programas computacionais de dinâmica de fluidos e de simulação de desempenho de edifícios para avaliar o impacto do projeto da varanda na ventilação natural e desempenho termoenergético de edifícios de escritórios que operam de forma mista (utilizando ventilação natural e condicionamento de ar) em São Paulo (SP). Foram utilizados os programas *CpSimulator* e *EnergyPlus* e constatou-se que, para a fachada sul, varandas curtas e estreitas são a melhor opção, enquanto para a fachada norte varandas largas e profundas fornecem os melhores resultados, reduzindo os ganhos solares devido ao sombreamento proporcionado.

Embora a simulação computacional ofereça inúmeros benefícios que justificam seu uso extensivo, sua aplicação ainda está aquém do desejável. Diversos obstáculos dificultam sua ampla adoção, como a necessidade de integrar múltiplos programas para a realização das simulações, dificultando a análise dos dados, além de custos associados a licenças pagas, que podem restringir o acesso a uma parte significativa dos usuários potenciais (Melo, 2018). Sua aplicação no mercado da construção civil ainda é limitada, pois apenas recentemente, com a implementação da norma de desempenho de edificações residenciais, sua utilização passou a ser exigida, o que faz com que o setor ainda esteja um pouco alheio a essa ferramenta.

2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante do déficit habitacional quantificado em cerca de seis milhões de residências no Brasil, é evidente a necessidade de maiores investimentos governamentais voltados para suprir essa carência. A retomada do programa Minha Casa, Minha Vida em 2023 com o compromisso de injeção massiva de recursos para o subsídio de habitações para a população de baixa renda gera a expectativa de um horizonte otimista.

A portaria MCID nº 725/2023, contemporânea à retomada do programa MCMV, vem para fiscalizar a busca pela solução dessa escassez, que não deve ser apenas quantitativa, mas precisa garantir dignidade e qualidade de vida, com habitações que atendam às necessidades da população com excelência, empregando materiais de qualidade, acesso aos equipamentos urbanos e conforto, como exige a portaria que passou a vigorar em 2023.

Diante da implementação da referida portaria, é importante ressaltar que esta está alinhada às exigências da norma de desempenho em edificações residenciais, NBR 15575:2021. Dentre os diversos tópicos que a norma abrange, o item 11, que trata do desempenho térmico das edificações, merece destaque. Em uma realidade de mudanças climáticas, um desempenho térmico satisfatório da moradia significa qualidade de vida ao usuário.

Dentre as adequações descritas na portaria MCID nº 725/2023, as exigências relativas à envoltória das edificações merecem destaque. Alterações simples, como a coloração das paredes externas e telhas, até algumas relativamente mais complexas como a inserção de varandas, quando aplicadas da maneira correta de acordo com o

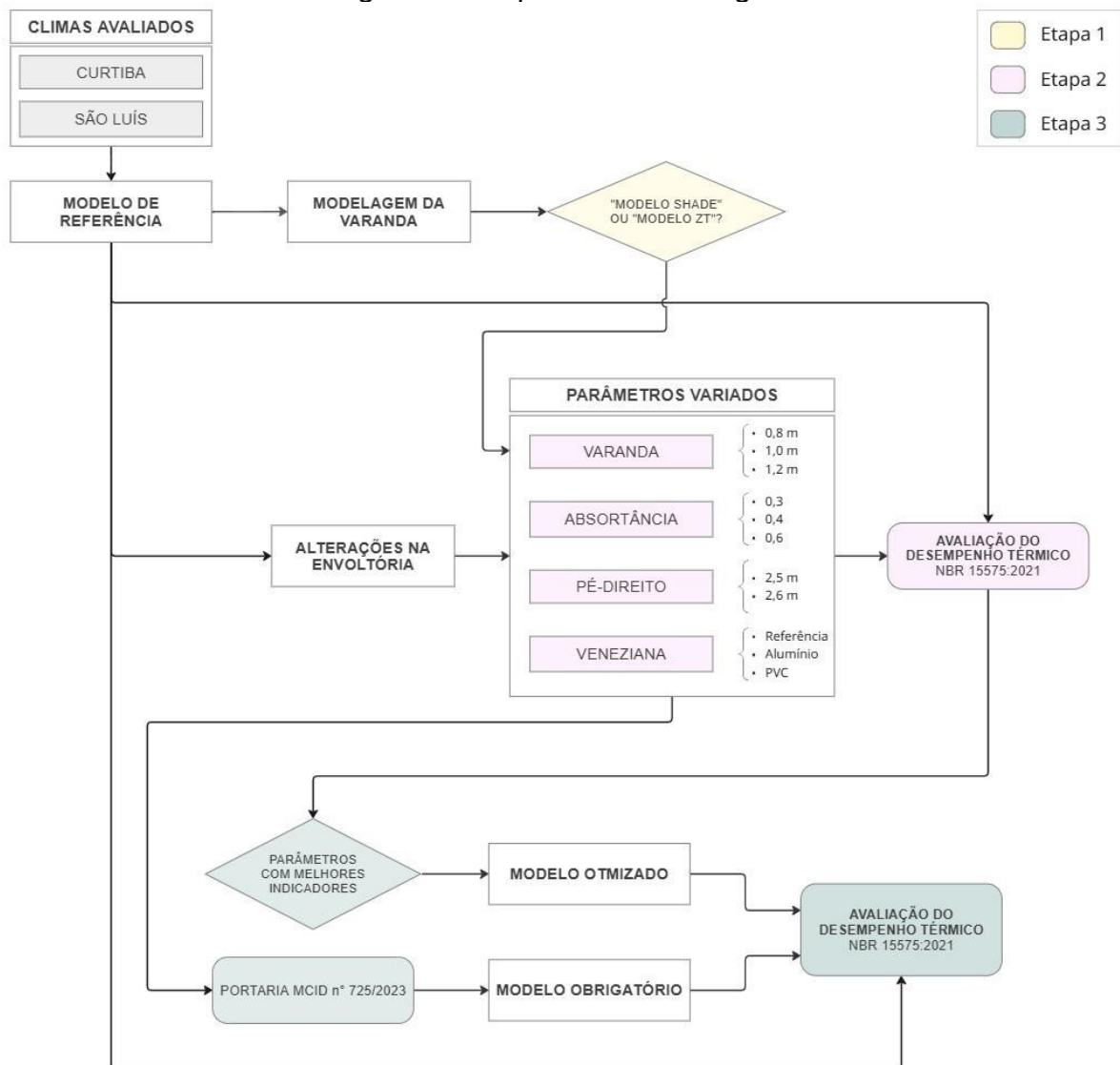
clima local, podem comprovadamente gerar grandes benefícios relacionados ao desempenho térmico.

Por fim, neste capítulo foram apresentados tópicos importantes para a compreensão do ambiente em que o presente trabalho se estrutura, onde as habitações de interesse social ocupam um papel importante, bem como a avaliação do desempenho térmico das mesmas frente à inserção da varanda como medida obrigatória descrita pela portaria nº 725 do Ministério das Cidades. As ferramentas computacionais de simulação de edifícios surgem como aliadas a esse processo, otimizando o trabalho e permitindo que um maior número de cenários de projeto seja considerado.

3 MÉTODO

O presente trabalho foi desenvolvido utilizando uma metodologia que se divide em seções sequenciais voltadas para a comparação entre modelos computacionais distintos de uma mesma edificação, e é apresentada na Figura 7. Três etapas principais compõem o método: a Etapa 1 define os climas avaliados e, a partir do modelo de referência, seleciona a forma com que a varanda será modelada; a Etapa 2 apresenta as alterações na envoltória a partir dos modelos paramétricos e respectivas avaliações de desempenho térmico; e a Etapa 3 consiste na avaliação do desempenho térmico dos modelos obrigatório e otimizado.

Figura 7 - Esquema metodológico



Fonte: a autora.

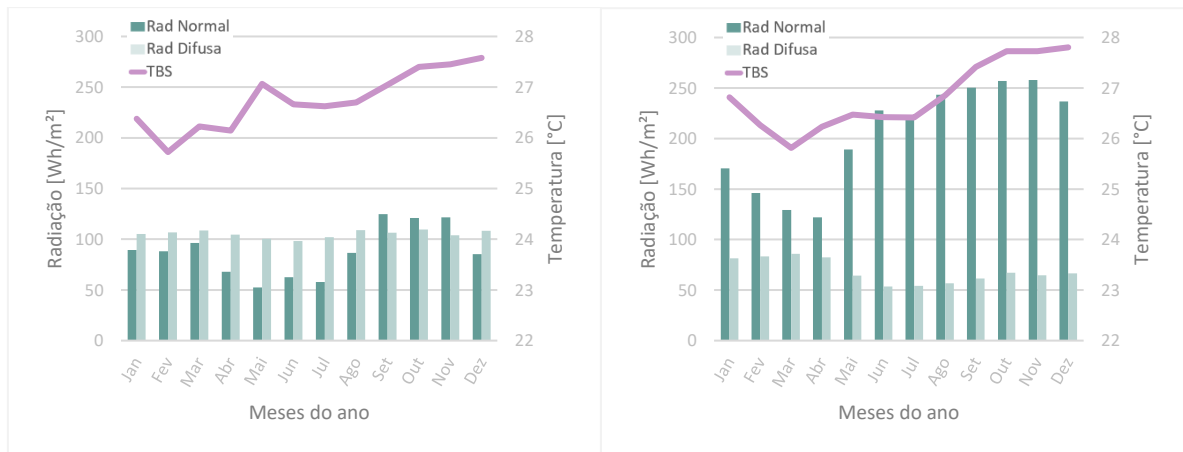
3.1 CLIMAS AVALIADOS

Uma vez que o programa Minha Casa, Minha Vida abrange todo o território nacional e os projetos das tipologias habitacionais sofrem pouca ou nenhuma alteração de projeto de acordo com a localização geográfica em que é inserida (Bavaresco *et al.*, 2021), é importante que a avaliação do impacto das medidas relacionadas à envoltória presentes na portaria do Ministério das Cidades nº 725/2023 seja realizada para diferentes características climáticas presentes no Brasil, com o intuito de realçar a necessidade de soluções construtivas específicas para cada necessidade climática. Para investigar essa diferença, foram escolhidas duas cidades com extremos climáticos brasileiros: Curitiba e São Luís.

Como discutido na seção 2.3.7, a escolha do arquivo climático é uma etapa bastante importante nas simulações termoenergéticas, impactando diretamente nos resultados. Por esse motivo, e pela existência, na literatura, de críticas aos arquivos climáticos INMET da base-padrão para a avaliação do desempenho térmico descrita no relatório técnico ABNT TR 15575-1-1:2021 (ABNT, 2021b), julgou-se necessário realizar uma breve análise comparativa com bases de dados de arquivos climáticos diferentes. Para isso, foram utilizados os arquivos climáticos INMET e TMYx (2009-2023), por apresentarem maior representatividade no território nacional e serem amplamente utilizados em simulações termoenergéticas, com dados confiáveis.

Para a análise comparativa, foram observadas as variáveis presentes nos arquivos climáticos, em especial temperatura de bulbo seco, radiação normal, radiação difusa, velocidade do vento e umidade relativa. A Figura 8 e a Figura 9 trazem graficamente os dados médios mensais de temperatura de bulbo seco (TBS), radiação normal (Rad Normal) e radiação difusa (Rad Difusa) para os dois arquivos climáticos das cidades de São Luís (Figura 8) e Curitiba (Figura 9).

Figura 8 - Comparação entre variáveis dos arquivos climáticos de São Luís



a) INMET

b) TMYx (2009-2023)

Fonte: a autora.

Figura 9 - Comparação entre variáveis dos arquivos climáticos de Curitiba



a) INMET

b) TMYx (2009-2023)

Fonte: a autora.

Analisando os gráficos, observa-se uma discrepância visível nos dados de radiação difusa média entre os arquivos climáticos, para ambas as cidades. Para esta variável, o arquivo climático INMET apresenta valores cerca de 30% maiores que aqueles observados para o arquivo TMYx. No mês de agosto, em São Luís, por exemplo, a radiação média do arquivo INMET é quase o dobro da observada no arquivo TMYx.

Para a radiação direta normal, essa discrepância é ainda mais visível entre os arquivos climáticos. O arquivo TMYx apresenta radiação normal elevada em comparação ao arquivo INMET para as duas cidades e, em diversos casos, essa

diferença chega a quase 80%, como pode ser observado para o mês de junho na cidade de Curitiba.

Em contrapartida, os dados de temperatura de bulbo seco, comparativamente para os dois arquivos climáticos, explicitam uma similaridade entre os valores, com diferenças menores que 1° C para os dados médios mensais da cidade de São Luís e inferiores a 3 °C em Curitiba.

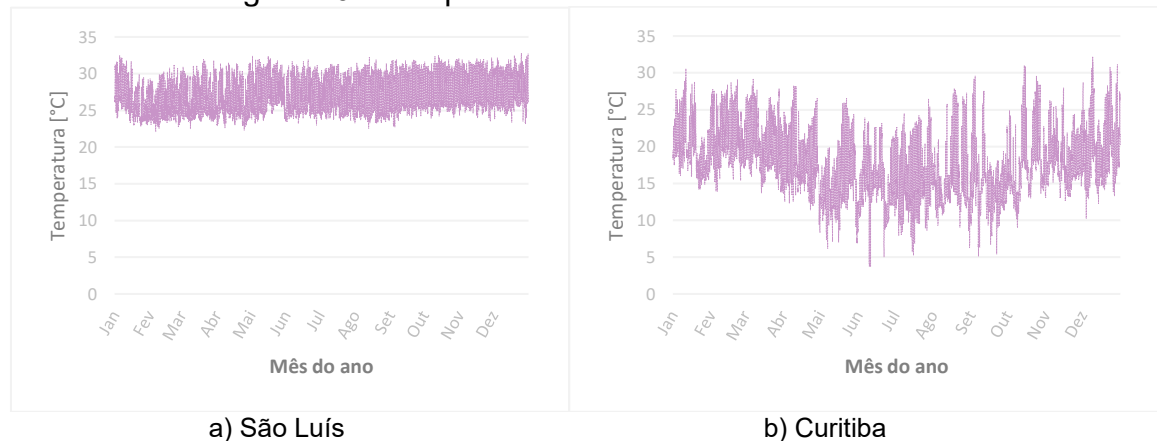
Considerando que a presente pesquisa avalia características da envoltória de uma edificação e que estas variáveis estão diretamente relacionadas às particularidades climáticas do clima onde a edificação está inserida, é importante que o arquivo climático utilizado nas simulações computacionais apresente dados confiáveis.

Dentre os arquivos climáticos existentes, o TMYx é um dos mais utilizados e disponíveis nas principais bases de dados meteorológicos voltadas à simulação computacional (Leitzke *et al.*, 2018). Uma de suas principais características é a utilização de valores reais de radiação solar, com dados de satélite ERA5, tornando as simulações mais precisas por dispensar cálculos para determinar valores de radiação baseadas em outras variáveis climáticas (IBPSA-USA, 2021).

Por esse motivo, e levando em consideração que a envoltória das edificações é bastante impactada pela radiação solar, optou-se por utilizar os arquivos TMYx, ao invés da base-padrão sugerida pelo relatório técnico ABNT TR 15575-1-1:2021 (arquivos INMET). Os arquivos TMYx podem ser encontrados no site *ClimateOneBuilding* (Crawley; Lawrie, s.d.) e, para esta pesquisa, foram utilizados os arquivos TMYx desenvolvidos a partir da série histórica de 2009 a 2023 que, por serem mais atuais, refletem melhor os impactos das mudanças climáticas nas variáveis climáticas.

Definido o arquivo climático a ser utilizado nas simulações computacionais, a caracterização do clima das cidades escolhidas é apresentada abaixo. A Figura 10 apresenta graficamente a temperatura de bulbo seco média anual para as duas cidades avaliadas.

Figura 10 - Temperatura de bulbo seco média anual



Fonte: a autora.

O clima de Curitiba, cidade localizada no sul do país, é definido como temperado, com chuvas bem distribuídas pelo ano todo e verões amenos, sendo a capital com menores temperaturas médias do Brasil. Segundo a NBR 15220-3:2024, Curitiba está inserida na zona bioclimática (ZB) 1M e, para o arquivo climático escolhido, a temperatura de bulbo seco (TBS) média anual é de 17,88 °C. Uma vez que a portaria MCID nº 725/2023 é baseada no antigo zoneamento bioclimático na NBR 15220, de 2008, é importante destacar que, para o zoneamento antigo, a cidade de Curitiba está inserida na ZB 1. De acordo com a ASHRAE 169 (ANSI/ASHRAE, 2020), o clima de Curitiba é incluído na zona 3A (*warm and humid*) e segundo a classificação de Köppen-Geiger, o clima da cidade se enquadra como Cfb, por apresentar estações bem definidas, umidade relativa elevada durante todo o ano e verões frescos, com temperatura superior a 10 °C (EMBRAPA, s.d.).

São Luís caracteriza-se pela presença de clima tropical úmido, com forte presença da massa de ar equatorial atlântica, que garante elevada umidade durante todo o ano, com exceção do período compreendido entre os meses de agosto e novembro, predominantemente seco. O clima de São Luís se enquadra na ZB 6A do novo zoneamento bioclimático da NBR 15220:2024 e na ZB 8 do zoneamento antigo. A temperatura de bulbo seco média anual, de acordo com o arquivo climático utilizado nas simulações, é de 27,13 °C. Segundo a classificação climática de Köppen-Geiger, São Luís apresenta clima do tipo Am, por apresentar temperaturas superiores a 18 °C no mês mais frio e uma breve estiagem compensada pela alta pluviosidade anual (EMBRAPA, s.d.). Segundo a ASHRAE 169 (ANSI/ASHRAE, 2020), o clima de São Luís se insere na zona 0A (*extremely hot and humid*).

Nos gráficos apresentados na Figura 10, expostos na mesma escala de temperatura, é possível perceber a diferença, principalmente, entre a amplitude térmica do clima das duas cidades. Curitiba apresenta amplitude térmica anual bastante elevada, com a presença de temperaturas mínimas próximas de 0 °C, porém dificilmente ultrapassando a temperatura máxima de 30 °C. Já São Luís apresenta temperaturas que variam, em geral, entre 25 °C e 30 °C, mas que superam a temperatura de 30 °C em dois terços dos meses do ano.

3.2 APRESENTAÇÃO DA TIPOLOGIA

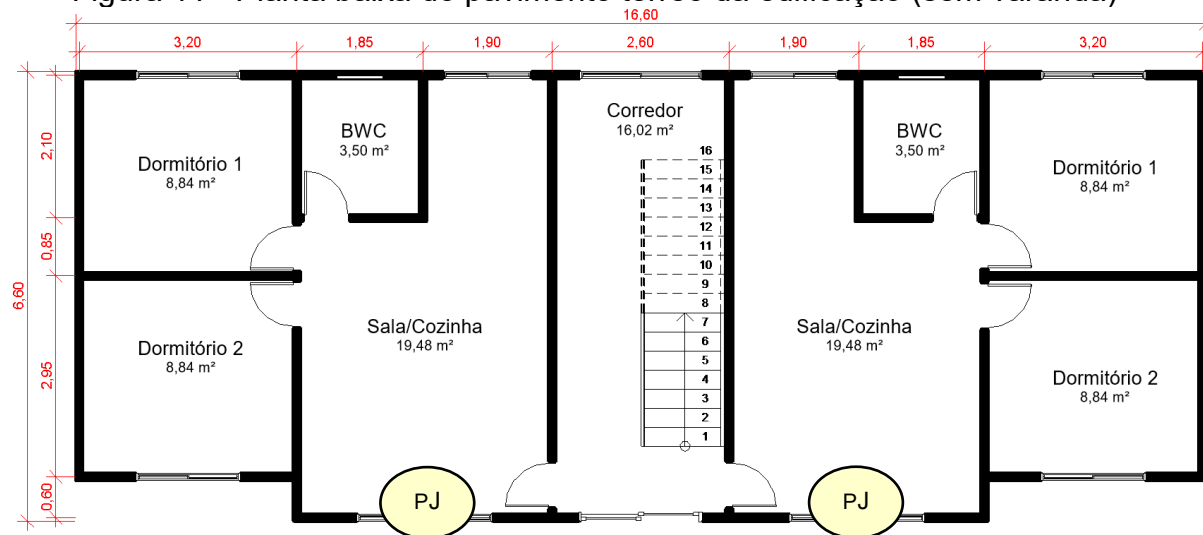
Para a escolha da tipologia da edificação, foram avaliados os modelos representativos de edificações para a faixa 1 do programa MCMV descritos por Triana (2016) e LabEEE (2024a). A partir dos modelos expostos, optou-se por utilizar a tipologia geminada sobreposta representada por LabEEE (2024a) em sua versão pré-portaria MCID nº 725/2023. Ou seja, o projeto da edificação é baseado em modelos concebidos anteriormente à publicação da portaria, uma vez que o objetivo desta pesquisa é avaliar o impacto das exigências da portaria MCID nº 725/2023, tendo como base um modelo anterior à sua promulgação.

A tipologia geminada sobreposta foi selecionada pois apresenta uma grande fachada exposta no ambiente sala, que corrobora para a observação de parâmetros como absortância e sombreamento, que fazem parte das alterações estabelecidas pela portaria MCID nº 725/2023. Além disso, para a avaliação do parâmetro da varanda, é necessário que a edificação selecionada seja multifamiliar e, por apresentar uma quantidade reduzida de UHs na edificação, optou-se por utilizar a tipologia geminada sobreposta. A edificação escolhida não apresenta autossombreamento na sala e permite a avaliação dos dois casos extremos presentes em edificações no que diz respeito à exposição solar e contato com o solo: térreo e cobertura.

A partir da planta baixa proposta pelo projeto hab.labeee desenvolvida por LabEEE (2024a), foram realizadas algumas alterações a fim de que a área total de cada unidade habitacional se aproximasse ao máximo dos 40 m² mínimos estipulados pela portaria MCID nº 725/2023, e atendesse ao programa de necessidades mínimas, isto é, que comportasse o mobiliário mínimo descrito na referida portaria. A planta

baixa do pavimento térreo da tipologia utilizada é apresentada na Figura 11, com duas unidades habitacionais no pavimento, separadas por um corredor.

Figura 11 - Planta baixa do pavimento térreo da edificação (sem varanda)



Fonte: a autora.

As áreas de piso (área útil) de cada ambiente das unidades habitacionais estão descritas na planta baixa, as portas internas e de acesso aos apartamentos são todas de madeira com 2,10 m de altura e 0,8 m de largura e o pé-direito de todos os ambientes é de 2,50 m.

As dimensões dos elementos transparentes das janelas (vidros) são apresentadas na Tabela 3 e, para os ambientes de permanência prolongada, correspondem a 17% da área de piso do ambiente em que estão inseridas, com fator de ventilação de 45%, centralizadas na fachada onde se inserem. No ambiente que engloba a sala e a cozinha da UH existem dois elementos transparentes: a porta-janela (sinalizada na Figura 11 pelo círculo amarelo com as iniciais PJ), que dará acesso à uma futura varanda, localizada na maior fachada do ambiente (sala), e a janela da cozinha, localizada na menor fachada do ambiente (cozinha). Para os dormitórios, a altura do peitoril das janelas é de 1,10 m, enquanto na cozinha e no banheiro o peitoril é de 1,60 m. Além disso, as esquadrias das janelas apresentam condutância de 56 W/m²K, espessura de 5 cm e absorvância igual a 0,58, compatível com o descrito na norma ABNT NBR 15575:2021-1 para o modelo de referência.

Tabela 3 - Dimensões dos elementos transparentes

Ambiente	Largura [m]	Altura [m]
Dormitório 1	1,50	1,00
Dormitório 2	1,50	1,00
Sala	1,20	2,10
Cozinha	1,32	0,60
Banheiro	0,60	0,60

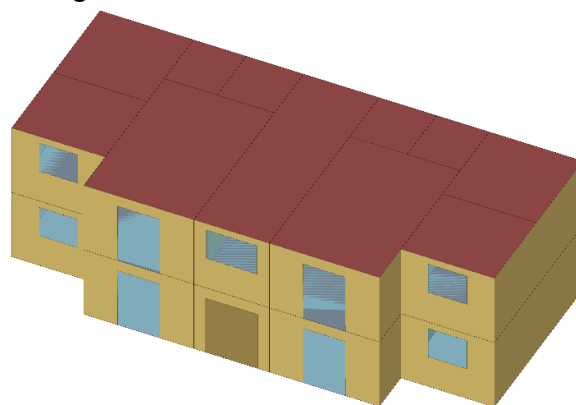
Fonte: a autora.

3.3 MODELAGEM E CASOS SIMULADOS

3.3.1 Modelo de referência

A partir da caracterização da tipologia apresentada, foi realizada a modelagem do modelo de referência conforme descrito no item 2.3 deste trabalho, mantendo a volumetria da edificação e fixando os parâmetros descritos em ABNT NBR 15575:2021-1 para o modelo de referência. Nesta etapa, foi utilizado o programa *SketchUp*, na versão *make* 2017, com o auxílio do *plugin Euclid*, versão 9.4.4, que permite uma configuração preliminar do modelo energético, para que possa ser inserido, em formato IDF (*Input Data File*), no programa de simulação que, neste caso, será utilizado o *EnergyPlus*. Nessa etapa, são modelados a geometria, as aberturas e o contato das superfícies do modelo referência. A Figura 12 traz a visualização 3D do modelo termoenergético.

Figura 12 - Modelo de referência



Fonte: a autora.

Os aspectos relacionados à ocupação, materiais construtivos, operação e cargas internas foram estabelecidos de acordo com o descrito no item 11 da NBR 15575:2021-1 e, com exceção dos materiais construtivos, se replicam para todos os modelos simulados. É importante destacar que para a cidade de São Luís foi inserida,

na cobertura, uma camada equivalente a um material com função de isolante térmico, com resistência térmica de $0,67 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$, como exige a norma de desempenho aqui utilizada.

Como descrito no procedimento de simulação computacional para avaliação do desempenho térmico da NBR 15575:2021-1, a edificação deve ser simulada considerando duas formas de operação: com e sem o uso de ventilação natural. Para o modelo que considera a operação com o uso da ventilação natural, foram utilizados os objetos do grupo *AirflowNetwork* do programa *EnergyPlus*.

Para o modelo que opera sem o uso da ventilação natural foram utilizados os objetos *HVACTemplate:Thermostat*, para definição dos *setpoints* de aquecimento e resfriamento, e *HVACTemplate:IdealLoadsAirSystem*, que configura os aparelhos utilizados para cálculo da carga térmica.

Em relação ao entorno, a edificação foi considerada de forma isolada, sem possíveis obstruções causadas por outras edificações, vegetação ou relevo.

3.3.1.1 Modelagem da varanda

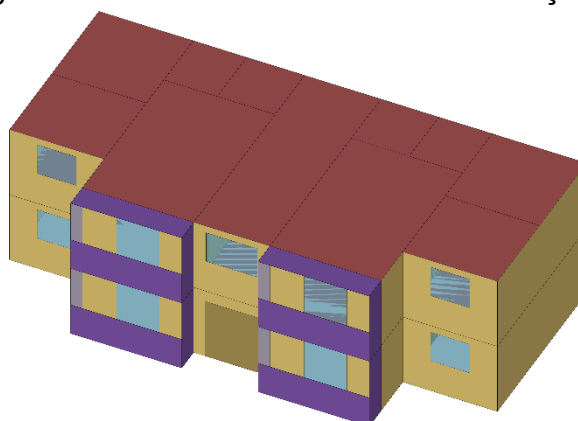
Uma vez que a norma de desempenho de edificações foi implementada anteriormente à promulgação da portaria MCID nº 725/2023, não existem menções à forma de modelagem e outras considerações a respeito da varanda para as habitações residenciais, como o ambiente onde a varanda será inserida. Neste trabalho, optou-se por inserir a varanda anexa à sala da edificação, por ser o local onde a varanda é observada mais comumente em imóveis residenciais, uma vez que sua presença em dormitórios é observada em imóveis de alto padrão, na maioria dos casos (Prates, 2022).

Pela falta de informações exatas referente à forma de modelagem da varanda nos programas de simulação computacional, considerou-se necessário explorar diferentes possibilidades de modelagem da varanda, com o intuito de comparar os resultados e verificar a possibilidade que mais se adapta às necessidades da pesquisa.

A primeira forma de modelagem considera a varanda simplesmente como um elemento de sombreamento, modelando-a da mesma maneira como a presença de brises fixos ou beirais na edificação. Este primeiro caso foi denominado “modelo shade”, e é representado na Figura 13. Para a modelagem, utilizou-se, no programa de simulação *EnergyPlus*, os objetos *Shading:Building:Detailed*, para configuração da

geometria, e *ShadingProperty:Reflectance*, para definição da refletância do elemento de sombreamento, única característica construtiva que qualifica o material construtivo deste objeto, que é inserida manualmente e se aplica para ambos os lados do elemento de sombreamento. Além disso, é importante que a distribuição solar esteja definida de forma que os raios solares sejam projetados em todas as superfícies adjacentes, calculando a forma como refletem nas demais superfícies. Para isso, no objeto *Building*, o campo *Solar Distribution* foi preenchido com *FullInteriorAndExteriorWithReflections*.

Figura 13 - “Modelo shade” 3D de simulação

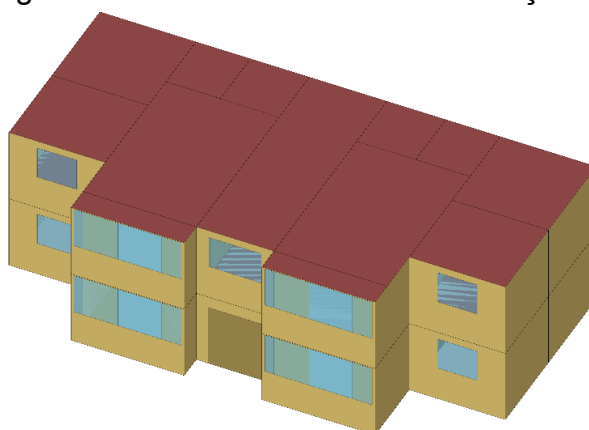


Fonte: a autora.

A segunda forma de modelagem da varanda considera-a como um novo ambiente e, da mesma forma que os demais cômodos da unidade habitacional, é modelado como uma zona térmica, por meio do objeto *Zone*. Para isso, as paredes, o piso e a cobertura da varanda foram modelados e configurados da mesma maneira que os demais ambientes da UH, de acordo com o descrito para o modelo de referência da NBR 15575:2021-1.

No entanto, quando utilizada esta forma de modelagem, são encontradas algumas limitações referentes à abertura da varanda na fachada, que não pode existir sem que haja algum material associado a este vazio, como por exemplo, o vidro de uma janela. Dessa forma, é necessário que, neste modelo, apresentado na Figura 14, que será denominado “modelo ZT”, algumas considerações e adaptações sejam definidas, para que seja possível realizar a simulação.

Figura 14 - “Modelo ZT” 3D de simulação



Fonte: a autora.

No lugar da abertura da varanda do “modelo ZT” foi inserido um elemento envidraçado compreendido pelo *EnergyPlus* como uma janela, configurada para permanecer sempre aberta. No entanto, ainda que permaneça sempre aberta, o programa apresenta a limitação de ainda considerar a existência de um vidro durante a abertura da janela. Por esse motivo, mesmo que o fluxo de ar pela ventilação natural seja considerado, o fluxo de calor por meio da radiação de ondas curtas e longas apresenta alterações. Para corrigir essa deficiência do programa, o vidro considerado na abertura da varanda foi inserido no objeto *WindowMaterial:Glazing*, com características que permitem a troca de calor nos dois sentidos, a fim de imitar um cenário onde a janela estaria, de fato, sempre aberta. De acordo com Veiga *et al.* (2019), os dados de entrada no programa de simulação que melhor descrevem este material são os descritos na Tabela 4.

A janela inserida que reproduz a abertura permanente da varanda, ao contrário das demais janelas da edificação, não possui esquadria e apresenta abertura para ventilação de 100%. Já a porta-janela da varanda foi configurada da mesma maneira que as demais janelas presentes nos APPs da edificação, de acordo com o descrito na NBR 15575:2021, porém com abertura para ventilação de 50%.

Tabela 4 - Dados de entrada para o vidro no “modelo ZT”

Dado de entrada	Valor
Tipo do dado óptico	Média Espectral
Espessura	0,00001 m
Transmitância solar em incidência normal	1
Refletância solar da face frontal em incidência normal	0
Refletância solar da face traseira em incidência normal	0
Transmitância visível em incidência normal	1
Refletância visível da face frontal em incidência normal	0
Refletância visível da face traseira em incidência normal	0
Transmitância infravermelho em incidência normal	0,00001
Emissividade hemisférica de infravermelho da face frontal	0,99999
Emissividade hemisférica de infravermelho da face traseira	0,99999
Condutividade	99999
Fator de correção para transmitância solar e visível	1
Difusão solar	Não
Módulo de Young	72000000000
Coefficiente de Poisson	0,22

Fonte: a autora.

3.3.2 Modelos paramétricos

A partir do modelo de referência, os parâmetros relacionados à envoltória das edificações do programa MCMV, descritos como obrigatórios na portaria MCID 725/2023, foram incorporados ao modelo de referência, parametricamente, a fim de verificar o impacto da implementação de cada medida isolada no desempenho térmico da edificação. Para isso, foram considerados os quatro parâmetros de envoltória que são descritos na portaria MCID 725/2023: absorptância, pé direito, varanda e veneziana. Estes parâmetros foram variados para compreender sua influência nos indicadores de desempenho térmico e suas variações foram definidas com mais detalhes nos itens que seguem. Salienta-se que, com exceção do parâmetro que será variado, o restante do modelo permanece idêntico ao modelo de referência.

3.3.2.1 Absortância

Partindo do modelo de referência, que apresenta absorptância das paredes externas igual a 0,58 e absorptância da cobertura igual a 0,65, as alterações foram realizadas no objeto *Material* para os dois materiais construtivos (paredes externas e cobertura). Foram alterados os valores dos campos *Solar Absorptance* e *Visible Absorptance* para três valores de absorptância: 0,3; 0,4 e 0,6, mantendo os demais campos inalterados, conforme o modelo de referência.

Apesar de valores de absorvência em torno de 0,3 serem frequentemente citados na literatura como representativos de superfícies claras, trata-se de um valor bastante teórico. Na prática, fachadas e coberturas dificilmente mantêm uma absorvência tão baixa ao longo do tempo, já que fatores como envelhecimento, sujeira e acabamento superficial tendem a elevar significativamente esse parâmetro (Araújo, 2022; Roriz; Caram; Roriz, 2012). Ainda assim, para fins desta análise, adota-se o valor de 0,3 por estar em conformidade com a literatura e por ser um valor imediatamente inferior a 0,4, absorvência já exigida pela portaria MCID 725/2023.

3.3.2.2 *Pé-direito*

A alteração do pé-direito dos ambientes para um mínimo de 2,6 m foi uma das exigências da portaria MCID nº 725/2023, alterando a volumetria da edificação e, conseqüentemente, as trocas de calor que nela ocorrem. Para verificar o impacto desta medida, utilizou-se da medida do pé-direito de 2,6 m, com as alterações realizadas diretamente no programa *EnergyPlus*, a partir do objeto *BuldingSurface:Detailed* que, por um sistema de coordenadas cartesianas, define cada uma das superfícies da edificação. Assim, a partir do modelo de referência que apresenta pé-direito de 2,5 m, foram acrescentados 10 cm de pé-direito em todos os ambientes, mantendo o peitoril das janelas inalterado.

3.3.2.3 *Venezianas*

O modelo de referência aqui utilizado não apresenta venezianas, mas a portaria MCID nº 725/2023 passou a exigí-las nos dormitórios para todas as zonas bioclimáticas brasileiras, de forma que permita o escurecimento do cômodo sem comprometer a ventilação natural.

No entanto, mesmo que seja obrigatória, a portaria MCID nº 725/2023 não especifica o tipo ou material das venezianas a serem inseridas. Por esse motivo, foram consideradas venezianas de acordo com o que fora utilizado em um estudo realizado por LabEEE (2024b). Assim, as venezianas foram modeladas no programa de simulação *EnergyPlus* utilizando o objeto *WindowMaterial:Blind*, considerando-as com haletas horizontais de 5 cm de largura, angulação de 45° e espessura de 4 mm. A distância das venezianas até o vidro da janela em que estão inseridas é de 5 cm e a

distância entre as haletas é de 3 cm. A refletância solar e visível foi considerada igual a 0,5 para ambas as faces das haletas.

Sabendo que, em geral, as esquadrias presentes no mercado brasileiro que possuem veneziana integrada apresentam mesmo material para esquadria e veneziana, foram consideradas venezianas de dois materiais: alumínio (com condutividade térmica de 221 W/mK e condutância igual a 44200 W/m²K) e policloreto de vinila (PVC) (condutividade térmica de 0,2 W/mK e condutância igual a 40 W/m²K). Além disso, também foi considerado um material com condutância igual a 56 W/m²K, referente à esquadria descrita para o modelo de referência da NBR 15575:2021-1. É importante destacar, também, que o material das esquadrias das janelas da edificação segue as mesmas características do material das venezianas, ou seja, quando foram alteradas as características das venezianas, alteraram-se também as características das esquadrias de todas as janelas da edificação. Assim, as venezianas, quando presentes, foram inseridas nos dormitórios de todas as UHs e para sua abertura foi considerado o que a norma de desempenho NBR 15575:2021-1 estabelece: as venezianas são abertas quando a temperatura externa de bulbo seco for menor ou igual a 26 °C e devem fechar quando essa temperatura for maior que 26 °C.

3.3.2.4 *Varanda*

Posteriormente às análises exploratórias que culminam na definição de uma forma de modelagem da varanda, como descrito em 3.3.1, selecionou-se uma das modelagens para dar seguimento às demais análises e, a partir do modelo escolhido, que será definido mais a frente neste trabalho, foram utilizadas três variações da profundidade/largura da varanda: 0,8 m (valor mínimo exigido pela portaria MCID n° 725/2023), 1 m e 1,2 m.

3.3.3 **Modelo obrigatório e modelo otimizado**

A partir dos parâmetros definidos para os modelos paramétricos, foi realizada a configuração do modelo obrigatório, que consiste na combinação dos parâmetros da envoltória que foram analisados isoladamente utilizando os valores que a portaria MCID n° 725/2023 descreve como requisitos obrigatórios mínimos.

A portaria traz, para cada zona bioclimática descrita na NBR 15220:2005, uma exigência diferente relacionada aos parâmetros avaliados nos modelos isolados.

Neste trabalho, como descrito no item 3.1, serão exploradas duas zonas bioclimáticas brasileiras e, por este motivo, serão configurados dois modelos obrigatórios distintos, um para cada clima avaliado. A configuração destes modelos é descrita na Tabela 5.

É importante destacar que a condutância das venezianas não é estabelecida pela portaria e, por este motivo, optou-se por utilizar as características das esquadrias do modelo de referência da NBR 15575:2021-1, por ser um intermediário entre os demais valores testados. Além disso, como a portaria MCID nº 725/2023 não traz informações referentes à utilização de materiais com função de isolamento térmico, como é observado no modelo de referência. Por esse motivo, no modelo obrigatório, não foi utilizado isolante térmico na cobertura para a cidade de São Luís.

Tabela 5 - Configuração do modelo obrigatório

Cidade	Pé-direito	Absortância das paredes e cobertura	Profundidade da varanda	Condutância da veneziana
Curitiba	2,6 m	0,6	0,8 m	56 W/m ² K
São Luís	2,6 m	0,4	0,8 m	56 W/m ² K

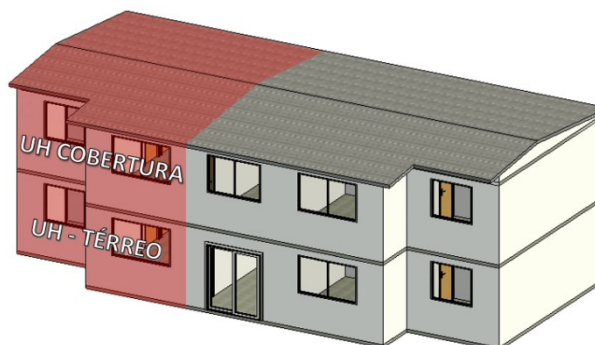
Fonte: a autora.

Já o modelo otimizado consiste em uma combinação das melhores variações dos parâmetros analisados acima, em questão de desempenho térmico. Isto é, para cada um dos modelos paramétricos foi selecionada a variação do parâmetro que apresenta os maiores ganhos em desempenho térmico, com maiores reduções de carga térmica total e temperatura operativa máxima, e maiores aumentos de PHFT. Para a cidade de Curitiba, também foi avaliado o aumento da temperatura operativa mínima. Em seguida, foi realizada a modelagem de um caso com as melhores variações combinadas - o modelo otimizado -, para cada uma das cidades, ou seja, foram obtidos dois modelos otimizados, um para Curitiba e outro para São Luís.

3.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Para compor as análises, optou-se por avaliar duas unidades habitacionais, uma localizada no pavimento térreo e outra na cobertura, como mostra a Figura 15. Essa escolha se deu devido à diferença, já bastante discutida na literatura, entre o desempenho térmico observado em unidades localizadas na cobertura e no térreo, devido à inércia térmica do solo e o grande ganho de calor pelo telhado.

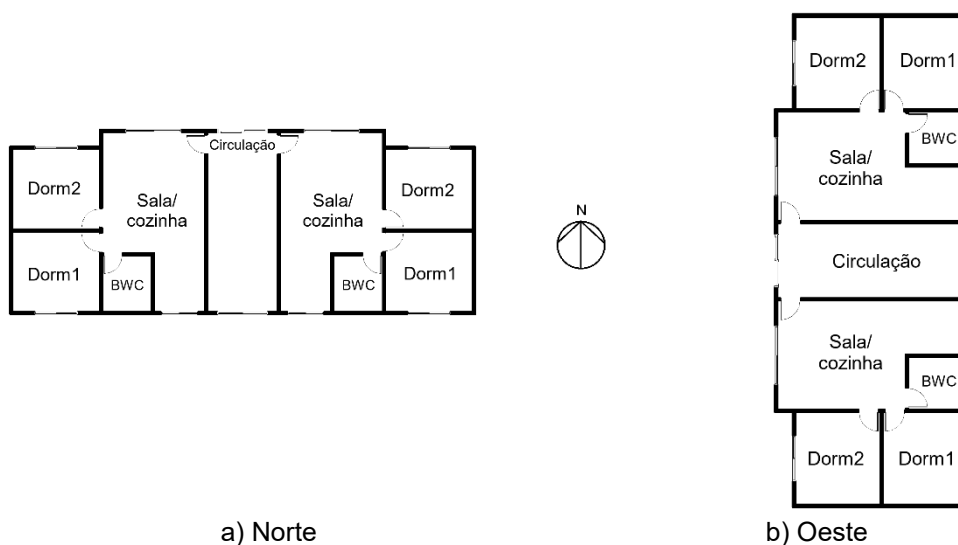
Figura 15 - Unidades habitacionais analisadas



Fonte: a autora.

Além disso, serão avaliadas duas orientações solares para a edificação, que proporcionam diferentes exposições das UHs à radiação solar: a orientação norte onde os quartos recebem radiação solar pela manhã, quando estão ocupados, e orientação oeste, com a sala exposta ao sol no período da tarde, quando o ambiente também está ocupado e há a presença da varanda em alguns casos. As orientações consideradas são apresentadas na Figura 16.

Figura 16 - Orientações solares adotadas



Fonte: a autora.

A análise dos resultados será realizada comparando os indicadores de desempenho térmico descritos na NBR 15575:2021, e mostrados no Quadro 1, para todos os modelos paramétricos considerados, e também pelo nível de desempenho térmico, obtido a partir da comparação entre o modelo de referência e cada um dos modelos paramétricos.

Quadro 1 - Indicadores de desempenho utilizados

Indicador	Descrição	Forma de cálculo
PHFT [%]	Razão entre as horas de ocupação dentro de uma faixa de temperatura operativa estabelecida e o total de horas de ocupação da UH.	$PHFT = \frac{\sum_{i=1}^n PHFT_{APP,i}}{n}$ Onde $PHFT_{APP}$: PHFT calculado do APP; n: número de APP na UH n: número de APP na
Tomáx [°C]	Temperatura operativa anual máxima observada em uma UH durante seu período de ocupação	Dentro dos períodos ocupados, adota-se o maior valor de Tomáx _{APP} a partir da comparação dos valores para todos os APP da UH.
Tomín [°C]	Temperatura operativa anual mínima observada em uma UH durante seu período de ocupação	Dentro dos períodos ocupados, adota-se o menor valor de Tomín _{APP} a partir da comparação dos valores para todos os APP da UH.
CgTT [kWh/ano]	Quantidade total de calor, fornecida e/ou retirada do ar, para manter as condições desejadas em um ambiente	$CgTT = \sum_{i=1}^n CgTR_{APP,i} + \sum_{i=1}^n CgTA_{APP,i}$ $CgTR_{APP}$: Carga térmica de resfriamento do APP $CgTA_{APP}$: Carga térmica de aquecimento do APP n: número de APP na UH

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

Definido o nível das análises, as comparações foram realizadas avaliando os quatro indicadores (Tomáx, Tomín, PHFT e CgTT) e o nível de desempenho térmico (mínimo, intermediário ou superior) dos modelos. É importante destacar que, para a cidade de Curitiba, as cargas térmicas de refrigeração e aquecimento foram somadas para as análises, resultando na carga térmica total. Para a cidade de São Luís, a carga térmica total corresponde à carga térmica de refrigeração, já que, para a zona térmica em que a cidade está inserida, a carga térmica de refrigeração não é contabilizada.

Inicialmente, será apresentada a análise da escolha do método de modelagem da varanda, sem a qual não seria possível ir além nas demais modelagens, uma vez que é utilizada nos casos isolados, obrigatórios e otimizados. Em seguida, apresenta-se a comparação entre os modelos paramétricos e o modelo de referência, com o intuito de identificar os melhores cenários de cada um dos parâmetros isolados para a composição do modelo otimizado. Por fim, são comparados os modelos de referência, obrigatórios e otimizados.

Todos os modelos simulados encontram-se elencados abaixo:

- Referência;

- Pé-direito 2,6 m;
- Absortância 0,3;
- Absortância 0,4;
- Absortância 0,6;
- Varanda 0,8 m;
- Varanda 1 m;
- Varanda 1,2 m;
- Veneziana referência;
- Veneziana alumínio;
- Veneziana PVC;
- Obrigatório;
- Otimizado.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, serão apresentados os resultados da pesquisa, desde as análises realizadas para a escolha da forma de modelagem da varanda até os resultados de desempenho térmico para os casos otimizados.

4.1 MODELAGEM DA VARANDA

Nesta seção, serão discutidas as comparações realizadas para os dois modelos já descritos, denominados “modelo shade” e “modelo ZT”, que exploram duas formas de modelagem da varanda, que serão comparados entre si e com o modelo de referência, que não apresenta varanda. Essa comparação foi realizada em duas etapas. A primeira comparação foi realizada apenas para os dois modelos onde há a presença da varanda, avaliando dados de saída relacionados às trocas de calor que ocorrem para o ambiente sala/cozinha, onde a varanda foi inserida. Já a segunda etapa compara os três modelos (modelo de referência, modelo shade e modelo ZT) por meio da utilização dos indicadores de desempenho térmico descritos no item 11 da norma brasileira de desempenho NBR 15575:2021.

O Quadro 2 e o Quadro 3 mostram os dados de saída que foram utilizados na primeira etapa de análise comparativa, retirados da documentação do programa *EnergyPlus* versão 22.1 (U.S. Department of Energy, 2022).

Quadro 2 - Dados de saída utilizados para o “modelo shade”

Dado de saída	Nível da análise	Significado
<i>Surface Window Transmitted Diffuse Solar Radiation Rate [W]</i>	Superfície: porta-janela da varanda	Quantidade de radiação solar entrando em uma zona por uma janela externa
<i>Surface Window Transmitted Beam Solar Radiation Rate [W]</i>	Superfície: porta-janela da varanda	Quantidade de radiação solar direta transmitida por uma janela
<i>Zone Mean Air Temperature [°C]</i>	Zona térmica: sala	Temperatura média do ar na zona
<i>Surface Outside/Inside Face Convection Heat Gain Rate [W]</i>	Superfície: limite varanda/sala parede entre	Fluxo de calor por convecção entre a superfície considerada e o ar
<i>Surface Outside/Inside Face Conduction Heat Transfer Rate [W]</i>	Superfície: limite varanda/sala parede entre	Fluxo de calor por condução na superfície da parede considerada

Fonte: a autora.

Quadro 3 - Dados de saída utilizados para o “modelo ZT”

Dado de saída	Nível da análise	Significado
<i>Surface Inside Face Initial Transmitted Diffuse Transmitted Out Window Solar Radiation Rate [W]</i>	Superfície: porta-janela da varanda	Quantidade de radiação solar difusa transmitida por uma janela interna para as demais superfícies da zona térmica
<i>Zone Interior Windows Total Transmitted Diffuse Solar Radiation Rate [W]</i>	Zona térmica: sala	Quantidade de radiação solar difusa transmitida para uma zona através de janelas internas
<i>Zone Interior Windows Total Transmitted Beam Solar Radiation Rate [W]</i>	Zona térmica: sala	Quantidade de radiação solar direta transmitida para uma zona através de janelas internas
<i>Zone Mean Air Temperature [°C]</i>	Zona térmica: sala	Temperatura média do ar na zona
<i>Surface Outside/Inside Face Convection Heat Gain Rate [W]</i>	Superfície: parede limite entre varanda/sala	Fluxo de calor por convecção entre a superfície considerada e o ar
<i>Surface Outside/Inside Face Conduction Heat Transfer Rate [W]</i>	Superfície: parede limite entre varanda/sala	Fluxo de calor por condução na superfície da parede considerada

Fonte: a autora.

É importante destacar que, nesta etapa de análise comparativa entre as duas formas de modelagem, nem sempre é possível que isso seja realizado por meio dos mesmos dados de saída. Isso acontece, pois algumas superfícies são consideradas como externas em um modelo, enquanto no outro são consideradas como internas. Por exemplo, no “modelo ZT” a porta-janela da varanda é considerada como uma janela interna, uma vez que a varanda é modelada como uma nova zona térmica adjacente à sala. Já no “modelo shade” essa mesma porta-janela é considerada como uma janela externa, pois faz contato direto com o exterior, sendo “protegida” apenas pelos elementos de sombreamento que definem a varanda neste caso.

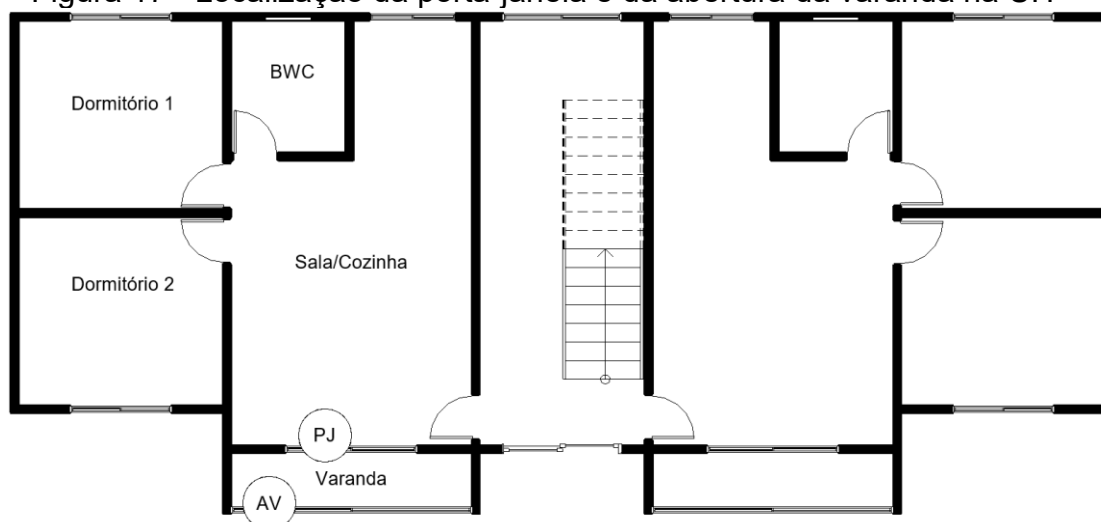
Durante o processo de configuração dos dois casos, considerando diferentes formas de modelagem da varanda, julgou-se necessário explorar os coeficientes de pressão do vento, uma vez que impacta não apenas na ventilação natural, mas também nas trocas de calor da edificação com o meio externo (Ferreira; Amaral; Assis, 2021). Loche *et al.* (2024) salientam a escassez de referências que relacionam ventilação natural, desempenho térmico e varandas, e alertam para o impacto das varandas nos coeficientes de pressão do vento.

O programa de simulação *EnergyPlus* permite ao usuário definir, por meio do objeto *AirflowNetwork: SimulationControl*, se os coeficientes de pressão do vento serão calculados pelo próprio programa ou inseridos manualmente, podendo, nesse caso, ser calculados de diversas maneiras. A fim de investigar a necessidade do cálculo individual dos coeficientes de pressão do vento para cada caso simulado, os

três modelos (modelo de referência, “modelo shade” e “modelo ZT”) foram enviados para a plataforma CP Simulator (Bre; Gimenez, 2022; Gimenez; Bre, 2023), uma plataforma online para obtenção de coeficientes de pressão do vento baseados em dinâmica de fluidos computacional (CFD). A plataforma permite o envio de arquivos em diversos formatos, inclusive do tipo IDF, basta configurar as informações a respeito da *Atmospheric Boundary Layer* (ABL), que diz respeito à camada da atmosfera onde o vento sofre maiores variações. Essas informações dependem do tipo de terreno onde a edificação está localizada, e são importantes para a compreensão de como o vento chega até a edificação analisada. Realizadas essas configurações, o IDF pode ser enviado para a plataforma, que retorna ao usuário em um arquivo do mesmo tipo com os dados de CP já atualizados.

A plataforma CP Simulator retorna os resultados dos coeficientes de pressão do vento para todas as janelas externas da edificação a cada 30°. A Tabela 5 apresenta esses valores para a UH da cobertura para os três modelos, considerando a porta-janela da varanda para o modelo de referência e “modelo shade”, e a abertura da varanda para o “modelo ZT”. A Figura 17 mostra a localização da porta-janela (PJ) e da abertura da varanda (AV), representadas na planta baixa da edificação, apenas para fins de localização.

Figura 17 - Localização da porta-janela e da abertura da varanda na UH



Fonte: a autora.

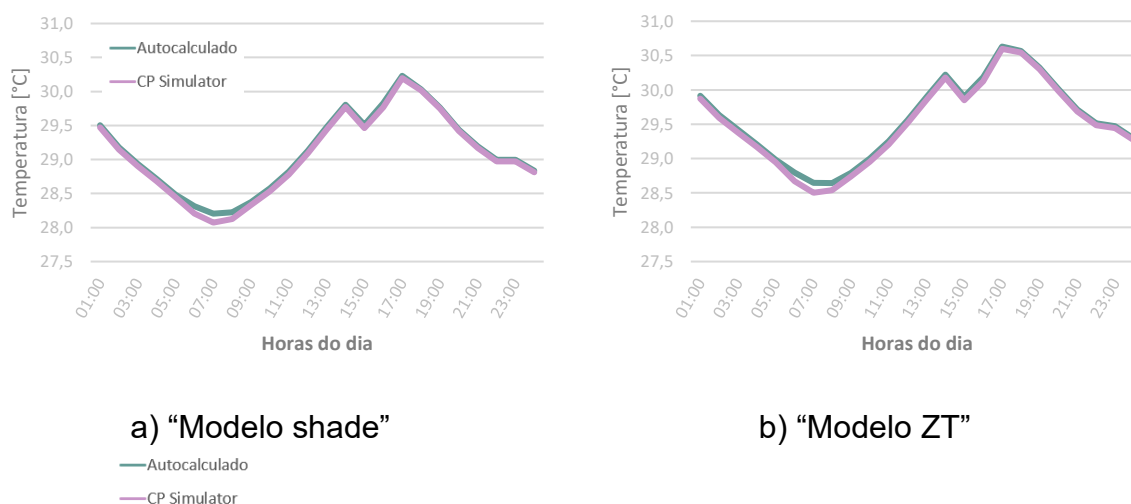
Tabela 5 - Coeficientes de pressão obtidos pela plataforma CP Simulator

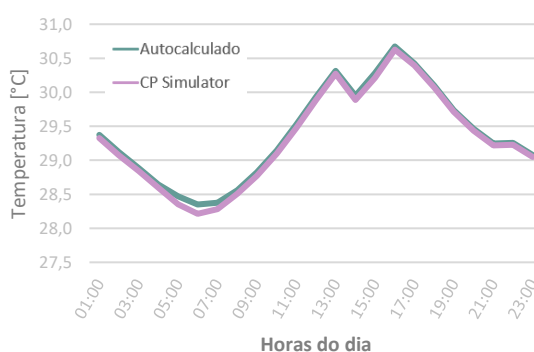
Ângulo	Modelo de referência	“Modelo shade”	“Modelo ZT”
0°	0,774925	0,819213	0,923325
30°	0,719283	0,767354	0,644604
60°	0,283280	0,101774	0,122922
90°	-0,178366	-0,446433	-0,359110
120°	-0,639807	-0,795182	-0,797860
150°	-0,610220	-0,644689	-0,616686
180°	-0,349706	-0,346937	-0,327819
210°	-0,387457	-0,392020	-0,366638
240°	-0,395861	-0,512245	-0,483985
270°	-0,120412	-0,221370	-0,229229
300°	0,172376	0,156608	0,067828
330°	0,521219	0,554594	0,451090

Fonte: a autora.

A observação comparativa dos coeficientes de pressão do vento para os três modelos revela uma similaridade entre os valores encontrados, o que pode ser justificado pela profundidade reduzida da varanda (de apenas 0,8 m), que não altera de forma expressiva o comportamento do vento na fachada da edificação. Por esse motivo, foi realizada a simulação de todos os modelos considerando o modo de operação ventilado naturalmente para os cenários com coeficientes de pressão do vento autocalculados pelo programa *EnergyPlus* e com a inserção manual dos valores obtidos pela plataforma CP Simulator. A Figura 18 mostra os resultados de temperatura operativa do ambiente sala da UH da cobertura para a cidade de São Luís para o dia 15 de fevereiro, um dia típico de verão.

Figura 18 - Temperatura operativa da sala para diferentes formas de configuração do coeficiente de pressão do vento





c) Modelo de referência

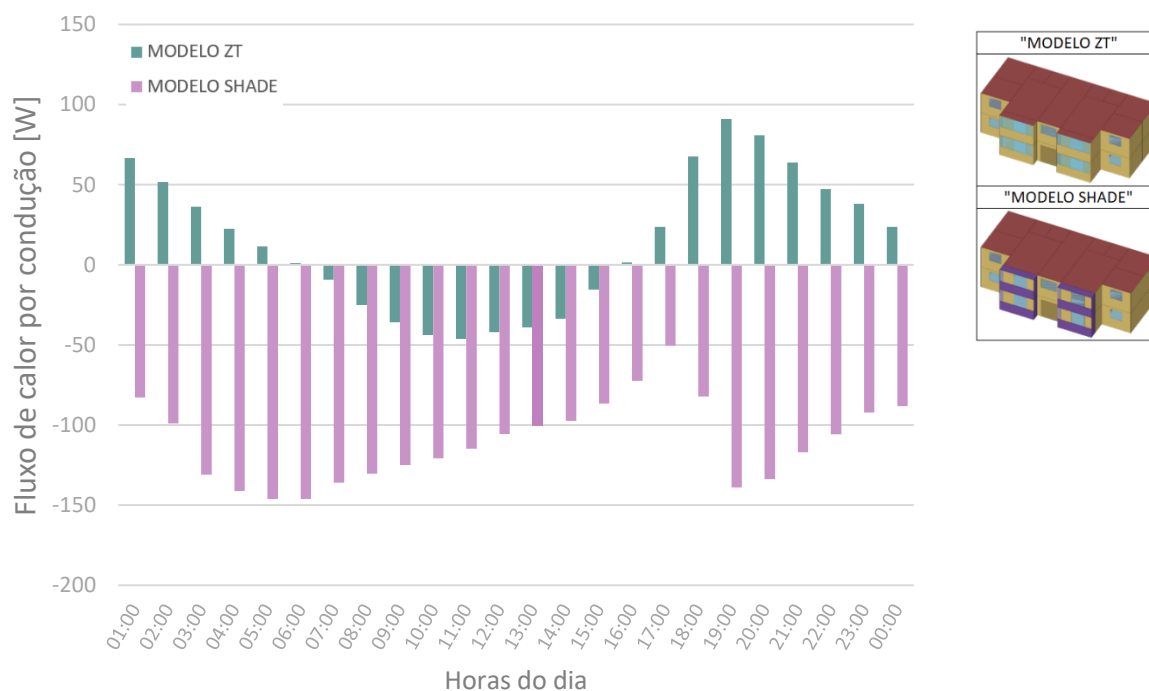
Fonte: a autora.

Os gráficos apresentados deixam clara a equivalência dos resultados de temperatura operativa da sala a depender da forma como são configurados os coeficientes de pressão do vento no programa de simulação. Para os três modelos, as linhas representativas da temperatura operativa no ambiente da sala são bem próximas, com breves exceções nos primeiros horários da manhã, evidenciando a capacidade do *EnergyPlus* de calcular os coeficientes de pressão do vento para casos de edificações com geometria simplificada, como é o caso apresentado. Por esse motivo, optou-se por prosseguir com as análises utilizando os valores de coeficiente de pressão do vento calculados pelo próprio programa de simulação, uma vez que simplifica o processo de modelagem e simulação. Para isso, foi utilizada a opção *Surface Average Calculation* no campo *Wind Pressure Coefficient Type* do objeto *AirflowNetwork:SimulationControl*, no momento da configuração dos modelos.

A seguir, são apresentadas análises em escala diária para o dia 15 de fevereiro para a cidade de São Luís, considerando a UH localizada na cobertura orientada a oeste. O dia 15 de fevereiro foi escolhido por representar um dia típico de verão e, uma vez que a varanda se apresenta como um elemento que barra a entrada de radiação solar no ambiente adjacente, optou-se por utilizar a cidade de São Luís por apresentar menor latitude quando comparada a Curitiba e, consequentemente, maior incidência de radiação solar. Pelo mesmo motivo optou-se por avaliar a UH da cobertura orientada a oeste, já que a cobertura da edificação é mais impactada pela radiação solar quando comparada com o pavimento térreo.

A Figura 19 mostra uma comparação do fluxo de calor realizado por condução na superfície que separa a sala da varanda, para os dois modelos. A direção do fluxo é considerada positiva quando o calor vai da varanda para a sala.

Figura 19 - Fluxo de calor por condução na parede limite entre a sala e a varanda



Fonte: a autora.

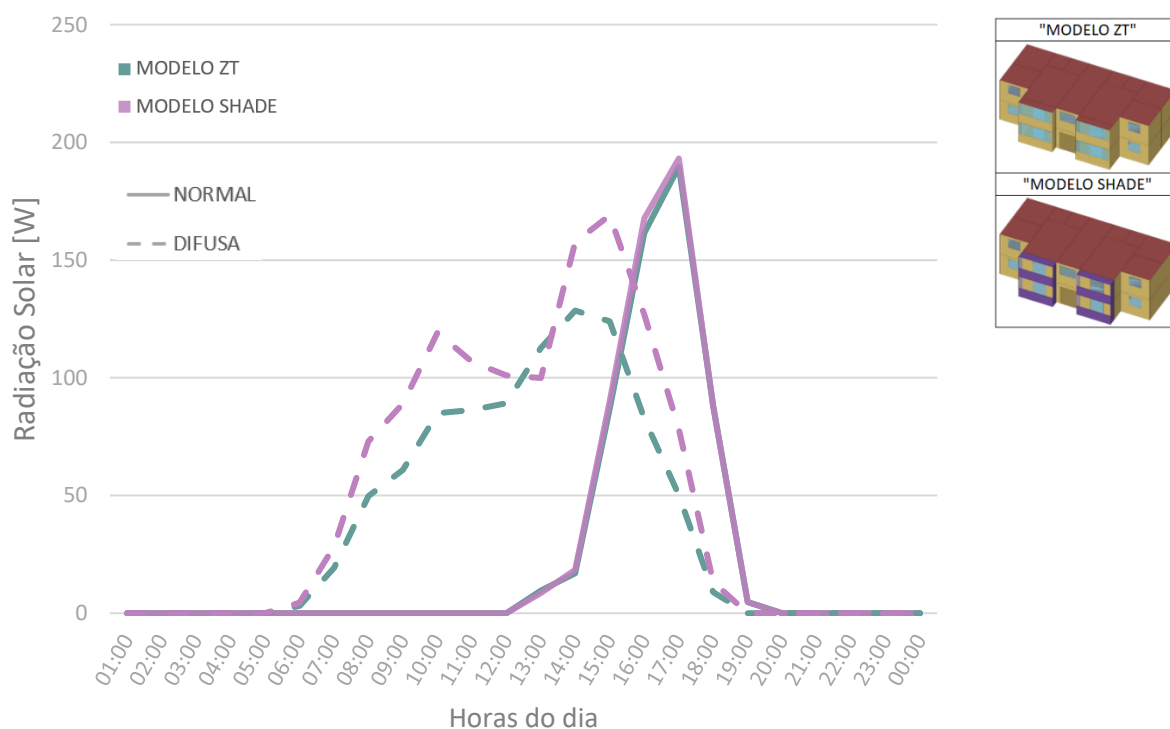
É evidente a diferença no fluxo de calor entre os dois modelos. O “modelo shade” apresenta perda de calor durante todo o dia, enquanto para o “modelo ZT” essa perda ocorre apenas em cerca de 1/3 do dia. Já nas primeiras horas do dia, o “modelo ZT” apresenta ganho de calor na parede em uma taxa de aproximadamente 80% da taxa em que o “modelo shade” perde calor. Com o passar das horas, o ganho de calor na parede do “modelo ZT” diminui, e próximo das 7:00 o fluxo muda de direção e começa a haver perda de calor, que acontece por apenas nove horas, retornando a ganhar calor às 16:00. No “modelo shade” o fluxo de calor apresenta sentido inverso ao “modelo ZT” durante grande parte do dia, com perdas de calor apenas durante o dia.

Na prática, esse comportamento significa que a parede da sala que faz fronteira com a varanda perde calor para o ambiente externo durante todo o período do dia, quando utiliza-se o “modelo shade”. Em contrapartida, no caso do “modelo ZT” a parede da sala ganha calor advindo da varanda durante quase o dia todo.

O comportamento observado pode ser explicado pela presença de materiais construtivos na varanda do “modelo ZT”, onde as paredes são compostas por concreto maciço de 10 cm de espessura, que armazena calor e o libera ao longo do dia, aquecendo a zona térmica da varanda e suas superfícies. No “modelo shade” isso não ocorre, pois os elementos de sombreamento utilizados para compor a varanda são desprovidos de materiais construtivos, funcionando apenas como uma barreira para a radiação.

Uma vez que a radiação é o principal parâmetro influenciado pela presença da varanda no “modelo shade”, buscou-se verificar as diferenças entre este parâmetro nos dois modelos, investigando os dados de saída de radiação direta e difusa, como mostra a Figura 20.

Figura 20 - Radiação solar transmitida pela porta-janela da varanda



Fonte: a autora.

Para os dados do dia 15 de fevereiro, também retirados do arquivo climático de São Luís, são observadas diferenças entre os valores de radiação difusa transmitida pela porta-janela da varanda para os dois modelos. No “modelo ZT”, os valores são de aproximadamente 70% daqueles observados no “modelo shade”. Para a radiação normal isso não ocorre, ambos os modelos apresentam resultados

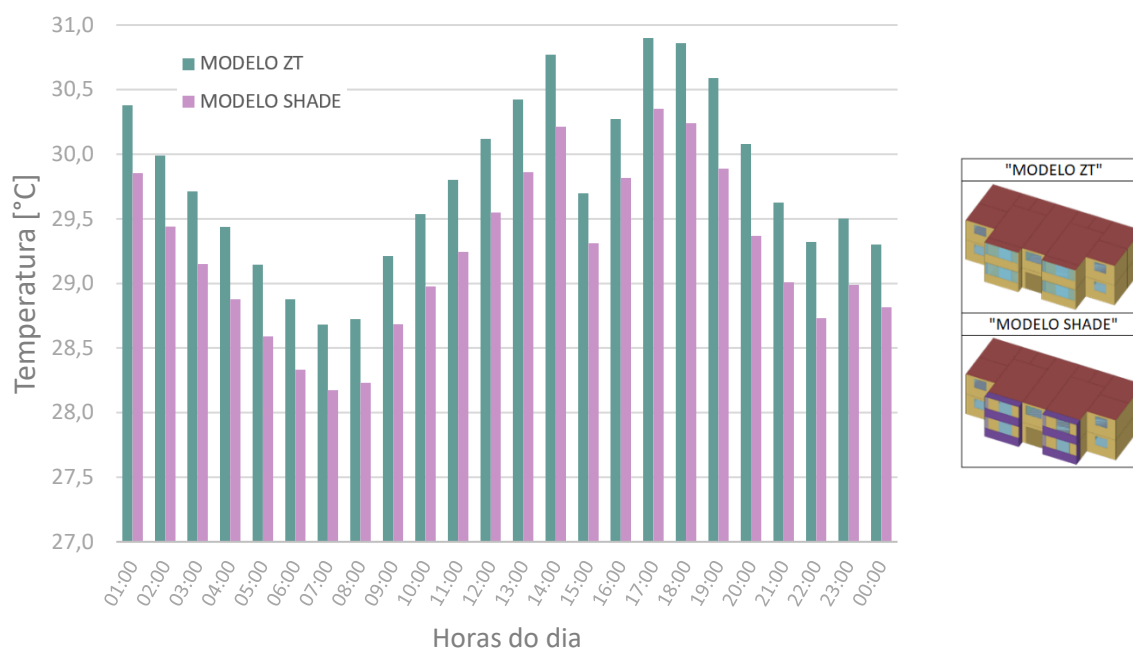
bastante semelhantes, ou seja, a radiação normal transmitida pela janela da varanda é praticamente a mesma nos dois casos.

Devido às limitações do programa de simulação na modelagem e simulação de ambientes abertos como varandas, a porta-janela da varanda é considerada como uma janela interna no “modelo ZT” quando, na prática, a mesma está sujeita às intempéries, assim como uma janela externa, além de que seu acionamento de abertura é configurado igualmente às demais janelas da edificação. A zona térmica da varanda faz com que as superfícies externas da sala sejam consideradas como internas, e existem diferenças na forma com que o programa interpreta essas considerações.

Além disso, de acordo com o próprio manual de utilização do programa *EnergyPlus* (U.S. Department of Energy, 2022), o objeto *Shading:Building:Detailed*, usado para a modelagem do “modelo shade” apresenta como função principal barrar a radiação solar normal e difusa. Por serem componentes que não apresentam massa ou materiais construtivos associados, os elementos de sombreamento do tipo *shade* não participam ativamente das trocas térmicas da edificação, apenas impedem que as zonas térmicas impactadas pelo efeito de sombreamento recebam radiação solar, que acaba por aquecer a zona térmica. Por esse motivo, o comportamento observado no gráfico da Figura 20 é questionável, uma vez que os valores encontrados para radiação são sempre maiores no “modelo shade”, evidenciando possíveis lacunas relacionadas às adaptações realizadas no “modelo ZT” para que a zona térmica modelada se assemelhe a uma varanda.

A avaliação da temperatura interna média do ambiente sala para ambos os modelos é apresentada graficamente na Figura 21. Observa-se que as temperaturas na sala são sempre maiores no “modelo ZT”. Em geral, para o dia 15 de fevereiro, essa diferença não ultrapassa 0,5 °C, chegando a uma máxima diferença de 0,7 °C às 20:00. Esse comportamento pode, também, estar relacionado às paredes de concreto presentes na varanda no “modelo ZT”, que teriam dissipado calor que foi armazenado durante o dia.

Figura 21 - Temperatura interna média da sala



Fonte: a autora.

Considerando que o principal objetivo deste trabalho é a avaliação do desempenho térmico de uma habitação, é importante que a escolha da forma de modelagem da varanda também contemple essa análise. Por esse motivo, a Tabela 7 traz os resultados dos indicadores de desempenho térmico para o “modelo shade”, “modelo ZT” e também para o modelo de referência, necessário para a avaliação do desempenho térmico segundo a NBR 15575:2021. A Tabela 8 apresenta as comparações entre os indicadores de desempenho térmico de cada modelo com varanda em relação ao modelo de referência, apresentados com o aumento do PHFT, redução da CgTT, redução da Tomáx e aumento da Tomín. Na Tabela 8, são apresentados apenas os resultados do “modelo shade” e “modelo ZT” em relação ao modelo de referência que, para esta tabela, teve os resultados ocultados.

Tabela 7 - Resultados dos indicadores de desempenho térmico

CURITIBA													
UH	Orientação	PHFT [%]			CgTT [kWh/ano]			Tomáx [°C]			Tomín [°C]		
		MODELO REF	MODELO SHADE	MODELO ZT	MODELO REF	MODELO SHADE	MODELO ZT	MODELO REF	MODELO SHADE	MODELO ZT	MODELO REF	MODELO SHADE	MODELO ZT
TÉRREO	NORTE	88,3	88,1	88,3	603,85	506,12	583,85	30,31	28,70	30,13	10,51	11,36	10,55
COBERTURA	NORTE	78,9	79,7	78,9	1533,02	1271,34	1481,85	34,63	32,04	34,52	7,77	8,67	7,89
TÉRREO	OESTE	83,8	85,6	84,5	1133,60	840,46	1026,28	33,75	31,35	31,91	10,44	11,34	11,49
COBERTURA	OESTE	76,3	77,6	76,7	2122,90	1763,33	2005,19	37,76	34,37	34,98	7,77	8,70	8,92
SÃO LUÍS													
UH	Orientação	PHFT [%]			CgTT [kWh/ano]			Tomáx [°C]			Tomín [°C]		
		MODELO REF	MODELO SHADE	MODELO ZT	MODELO REF	MODELO SHADE	MODELO ZT	MODELO REF	MODELO SHADE	MODELO ZT	MODELO REF	MODELO SHADE	MODELO ZT
TÉRREO	NORTE	65,1	72,4	64,4	4876,21	3654,90	4929,14	34,77	33,56	34,64	24,47	25,41	24,56
COBERTURA	NORTE	59,5	65,7	59,0	6017,36	4810,44	5974,56	36,52	34,07	36,27	23,83	24,79	23,95
TÉRREO	OESTE	46,4	55,0	45,3	7666,07	6190,06	7627,63	35,99	33,86	34,57	24,80	25,70	25,90
COBERTURA	OESTE	45,1	52,2	44,3	8529,69	7087,91	8398,17	37,44	34,31	35,08	23,95	24,86	25,08

Fonte: a autora.

Tabela 8 - Comparação entre indicadores de desempenho em relação ao modelo de referência

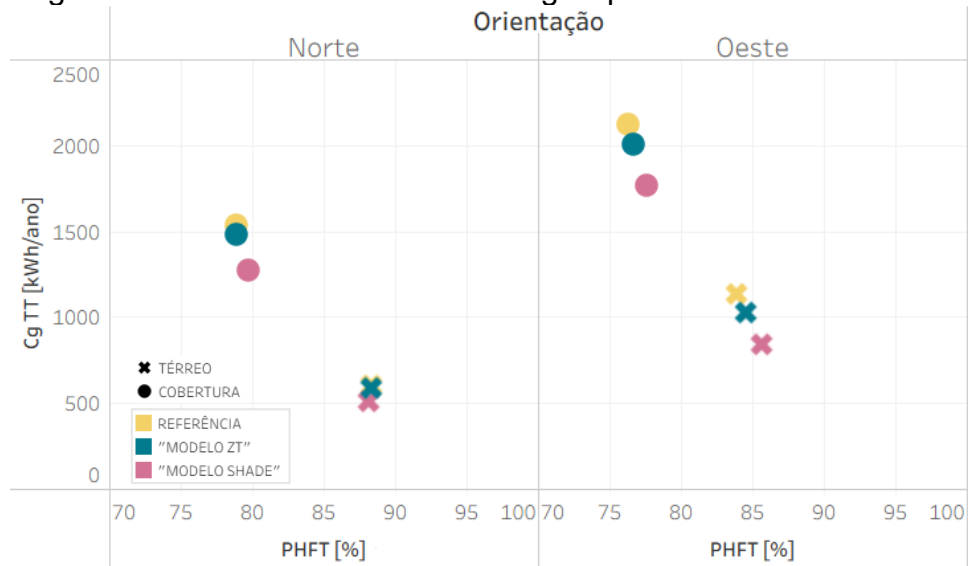
CURITIBA									
UH	Orientação	AUMENTO PHFT [%]		REDUÇÃO CgTT [%]		REDUÇÃO Tomax [°C]		AUMENTO Tomín [°C]	
		MODELO SHADE	MODELO ZT	MODELO SHADE	MODELO ZT	MODELO SHADE	MODELO ZT	MODELO SHADE	MODELO ZT
TÉRREO	NORTE	-0,3	0,0	16,2	3,3	1,61	0,18	0,85	0,04
COBERTURA	NORTE	1,1	0,0	17,1	3,3	2,59	0,11	0,90	0,12
TÉRREO	OESTE	2,1	0,8	25,9	9,5	2,40	1,84	0,90	1,04
COBERTURA	OESTE	1,6	0,5	16,9	5,5	3,39	2,78	0,93	1,15
SÃO LUÍS									
UH	Orientação	AUMENTO PHFT [%]		REDUÇÃO CgTT [%]		REDUÇÃO Tomax [°C]		AUMENTO Tomín [°C]	
		MODELO SHADE	MODELO ZT	MODELO SHADE	MODELO ZT	MODELO SHADE	MODELO ZT	MODELO SHADE	MODELO ZT
TÉRREO	NORTE	11,1	-1,1	25,0	-1,1	1,21	0,13	0,94	0,08
COBERTURA	NORTE	10,5	-0,9	20,1	0,7	2,46	0,25	0,95	0,12
TÉRREO	OESTE	18,5	-2,3	19,3	0,5	2,12	1,42	0,90	1,10
COBERTURA	OESTE	15,7	-1,8	16,9	1,5	3,13	2,36	0,91	1,12

Fonte: a autora.

Os resultados das simulações evidenciam que a inclusão da varanda provoca uma melhora nos indicadores de desempenho térmico das unidades habitacionais analisadas, com poucas exceções. Graficamente, os resultados são exibidos na Figura 22 e Figura 23 para a cidade de Curitiba e na Figura 24 e Figura 25 para a cidade de São Luís. Os gráficos relacionam dois indicadores de desempenho térmico cada e, em todas as figuras, deseja-se que os casos estejam localizados mais próximos ao canto inferior direito, onde são observadas cargas térmicas reduzidas e

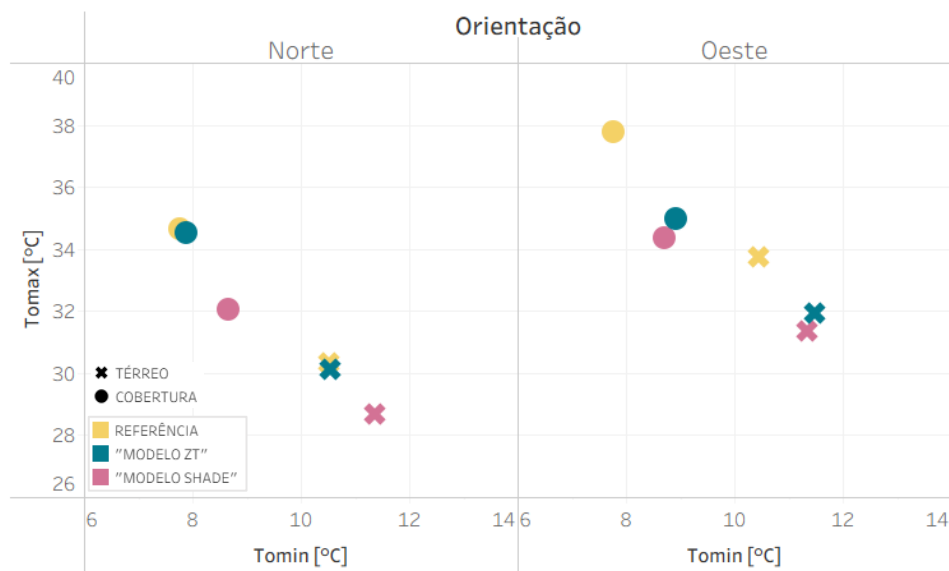
PHFT elevado (Figura 22 e Figura 24) e Tomáx reduzida e Tomín elevada (Figura 23 e Figura 25).

Figura 22 - Resultados de PHFT e CgTT para a cidade de Curitiba



Fonte: a autora.

Figura 23 - Resultados de Tomáx e Tomín para a cidade de Curitiba



Fonte: a autora.

Para a cidade de Curitiba, há uma redução expressiva na carga térmica quando adicionada a varanda com o “modelo shade”, em comparação ao modelo de referência. Para essa cidade, a UH térrea orientada a oeste apresenta uma redução de cerca de 26% da carga térmica total em relação ao modelo de referência. Para o

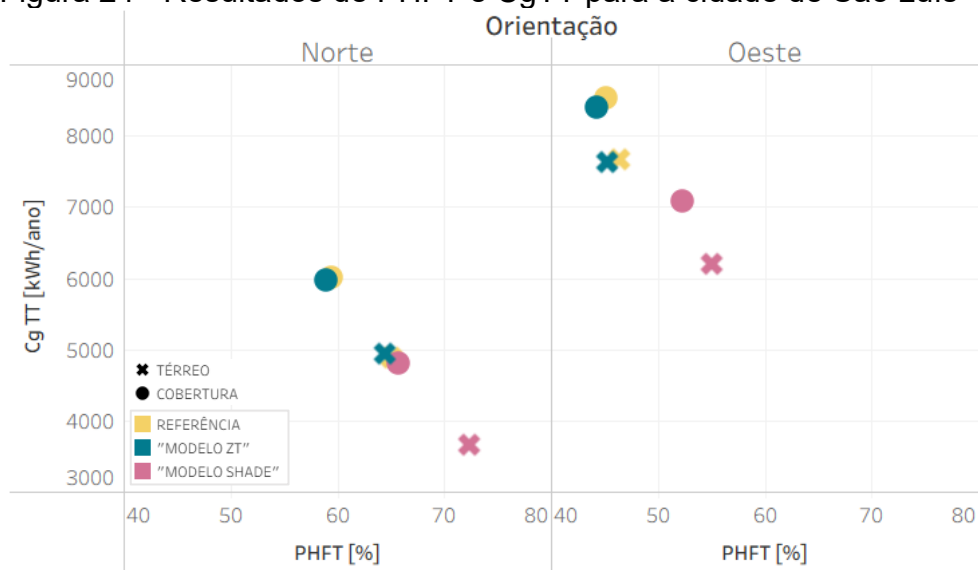
mesmo caso (UH térrea orientada a oeste em Curitiba), o “modelo ZT” apresenta redução da CgTT de apenas 9,5% em relação ao modelo de referência.

Para Curitiba, o “modelo ZT” apresenta resultados bastante próximos do modelo de referência, exceto para a temperatura operativa máxima e mínima quando a UH é orientada a oeste, quando os resultados se distanciam e os dois modelos com varanda se aproximam. O indicador PHFT não apresenta melhorias em Curitiba, com aumentos inferiores a 1% em quase todos os casos. No entanto, para o indicador de temperatura operativa mínima, o “modelo ZT” mostra-se mais favorável à melhora do desempenho térmico que o “modelo shade”, com aumento significativo da Tomín para a UH orientada a oeste.

Com relação à temperatura operativa máxima em Curitiba, o “modelo shade” reduz mais de 3 °C da Tomáx para a UH da cobertura quando comparado ao modelo de referência, uma diminuição bastante expressiva. O “modelo ZT” também apresenta redução da Tomáx em relação ao modelo de referência em todos os casos para Curitiba, porém com resultados menos significativos.

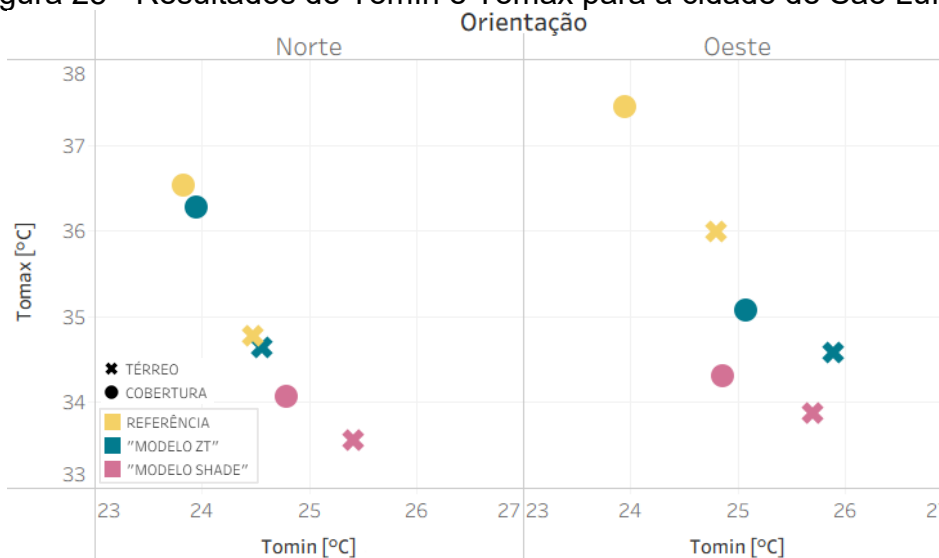
Observa-se que os indicadores Tomín e Tomáx apresentam maiores diferenças em relação ao modelo de referência para a UH da cobertura, em comparação com a UH térrea. Para todos os indicadores, a orientação oeste gera maiores diferenças entre os indicadores de desempenho em comparação com o modelo térreo. Isso ocorre para o “modelo ZT” e “modelo shade”, o que revela um impacto maior da varanda quando a edificação é orientada a oeste.

Figura 24 - Resultados de PHFT e CgTT para a cidade de São Luís



Fonte: a autora.

Figura 25 - Resultados de Tomín e Tomáx para a cidade de São Luís



Fonte: a autora.

Em São Luís, o “modelo ZT” mostra-se bastante ineficaz, com resultados dos indicadores de desempenho bastante próximos do modelo de referência. Espera-se, na prática, que a inserção da varanda favoreça o desempenho térmico de uma edificação, em especial em climas quentes, como é o caso de São Luís. No entanto, em todos os casos considerados com o “modelo ZT”, é observada uma redução de 0,9% a 2,3% no PHFT, o que indica a piora do desempenho térmico quando analisado apenas este indicador. Mesmo que a diminuição percentual seja pequena, menor que 3% em todos os casos, é importante observar que o PHFT do modelo de referência é de cerca de 64%, o que significa que em pouco mais da metade das horas em que a edificação é ocupada existe conforto térmico, e qualquer redução prejudica o conforto do usuário, em especial em climas bastante quentes, como é o caso de São Luís.

Para as duas cidades analisadas, nota-se uma piora nos indicadores de desempenho térmico quando a fachada com varanda está voltada para o oeste, em comparação com a orientação norte, o que resulta em um aumento de CgTT e Tomáx, e na redução de PHFT e Tomín (no caso de Curitiba). Esse comportamento ocorre porque a sala é utilizada durante a tarde, de acordo com o pedrão de uso da NBR 15575:2021, período em que a radiação solar incide diretamente nessa fachada. No entanto, é justamente nos casos orientados a oeste que é observada uma maior redução na carga térmica e na temperatura operativa máxima quando a varanda é inserida, reforçando sua importância.

Entre as duas formas de modelagem da varanda, o “modelo shade” demonstrou melhor desempenho térmico em todos os casos quando comparado ao “modelo ZT”. Embora os indicadores dos dois modelos tenham resultados semelhantes em alguns casos, o “modelo ZT” se aproxima mais dos resultados do modelo de referência do que do “modelo shade”.

Com base nas análises realizadas considerando duas formas de modelagem da varanda, optou-se por utilizar o “modelo shade” para configuração dos demais modelos. Essa escolha se deu, inicialmente, devido à quantidade de incertezas relacionadas à configuração do “modelo ZT”, uma vez que sua configuração exige uma série de artifícios para superar algumas limitações do programa de simulação, como o fechamento da zona com vidro, que deveria ser um espaço aberto e a utilização de um material irreal para o vidro. Além disso, os resultados apresentados trazem algumas dúvidas, como o aumento da temperatura interna da sala quando inserida a varanda modelada como zona térmica. Também observa-se uma alta radiação difusa atravessando a porta-janela da varanda, mesmo que o programa de simulação não permita que essa porta-janela esteja sujeita a intempéries por ser considerada, pelo programa, como uma janela interna.

Ainda, a norma brasileira de desempenho de edificações NBR 15575:2021, na qual este trabalho se respalda, trata sacadas (que aqui entendemos como varandas) como elementos de sombreamento, da mesma forma que considera brises e venezianas, desconsiderando sua presença no modelo de referência: “não são considerados os elementos de sombreamento externos fixos na fachada, como brises e venezianas, assim como não é considerada a presença de sacadas” (ABNT, 2021a, p. 33). Assim, a partir daqui, em todos os casos em que há a presença de varandas na edificação, a mesma será modelada como elemento de sombreamento.

4.2 MODELOS PARAMÉTRICOS

Nesta seção, serão apresentados os resultados dos modelos paramétricos, as configurações de cada modelo estão descritas na Tabela 9.

Tabela 9 - Configuração dos modelos paramétricos

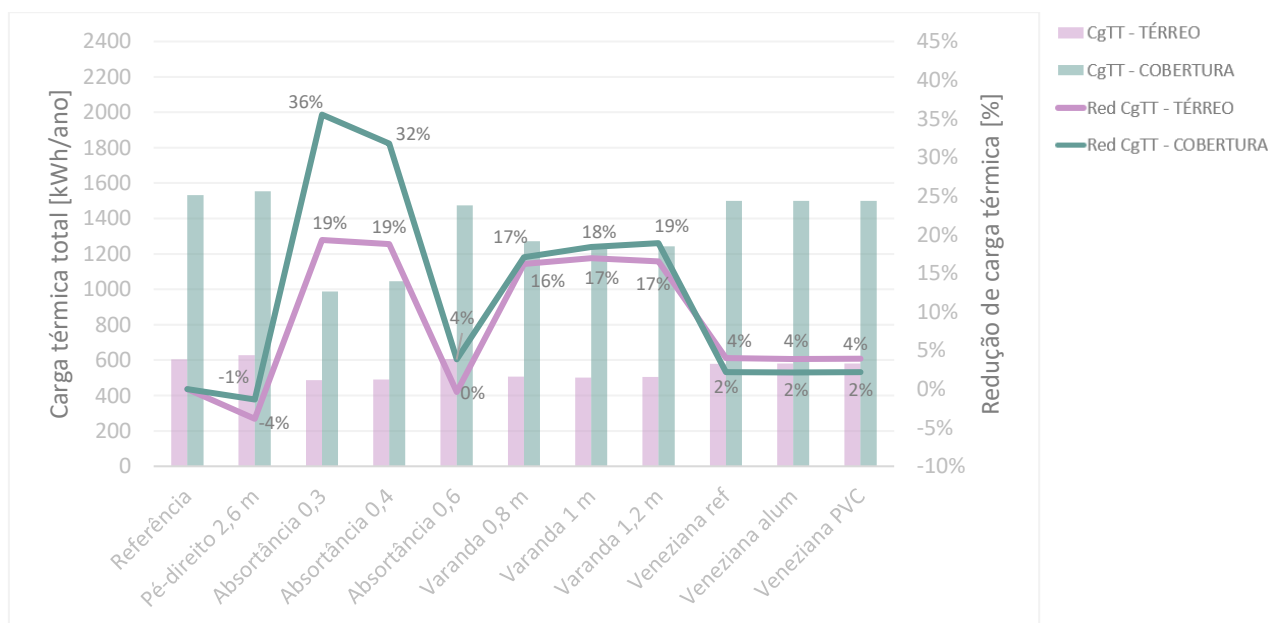
Caso	Pé-direito	Absortância das paredes e cobertura	Profundidade da Varanda	Condutância da Veneziana
Referência*	2,5 m	0,58	sem varanda	sem veneziana
Pé-direito 2,6	2,6 m	0,58	sem varanda	sem veneziana
Absortância 0,3	2,5 m	0,3	sem varanda	sem veneziana
Absortância 0,4	2,5 m	0,4	sem varanda	sem veneziana
Absortância 0,6	2,5 m	0,6	sem varanda	sem veneziana
Varanda 0,8 m	2,5 m	0,58	0,8 m	sem veneziana
Varanda 1,0 m	2,5 m	0,58	1,0 m	sem veneziana
Varanda 1,2 m	2,5 m	0,58	1,2 m	sem veneziana
Veneziana referência	2,5 m	0,58	sem varanda	56 W/m ² K
Veneziana alumínio	2,5 m	0,58	sem varanda	44200 W/m ² K
Veneziana PVC	2,5 m	0,58	sem varanda	40 W/m ² K

(*) O modelo de referência, para a cidade de São Luís, apresenta isolante na cobertura, como descrito no item 2.2.1 do presente trabalho.

Fonte: a autora.

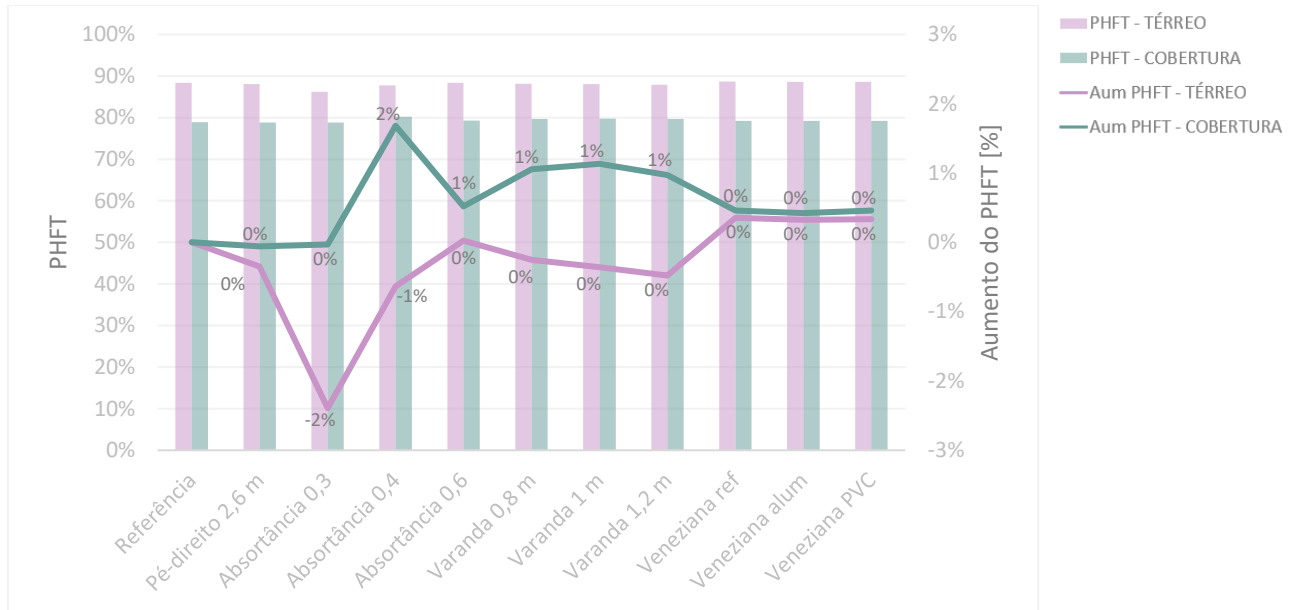
A Figura 26 e Figura 28 trazem os resultados de carga térmica e a Figura 27 e Figura 29 apresentam os resultados de PHFT, para a cidade de Curitiba, de acordo com a orientação solar adotada. A redução da carga térmica e o aumento do PHFT, expressos em porcentagem, são relativos à comparação da carga térmica ou do PHFT de cada modelo paramétrico com o modelo de referência.

Figura 26 - Resultados de CgTT para a cidade de Curitiba – orientação Norte



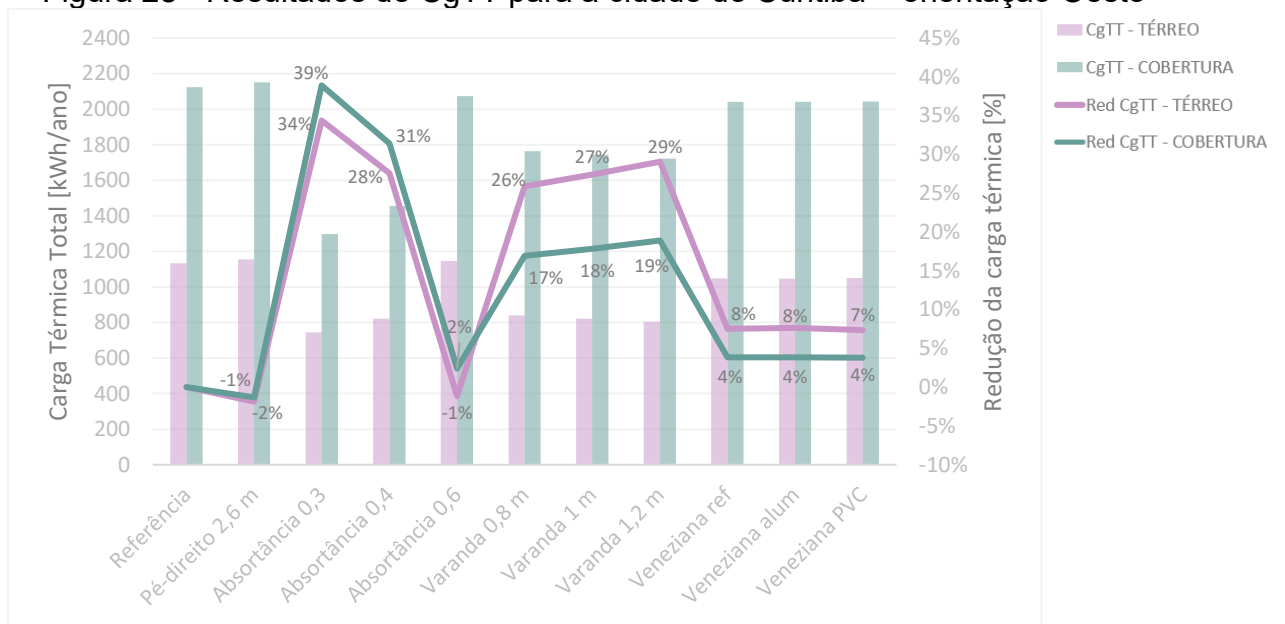
Fonte: a autora.

Figura 27 - Resultados de PHFT para a cidade de Curitiba – orientação Norte



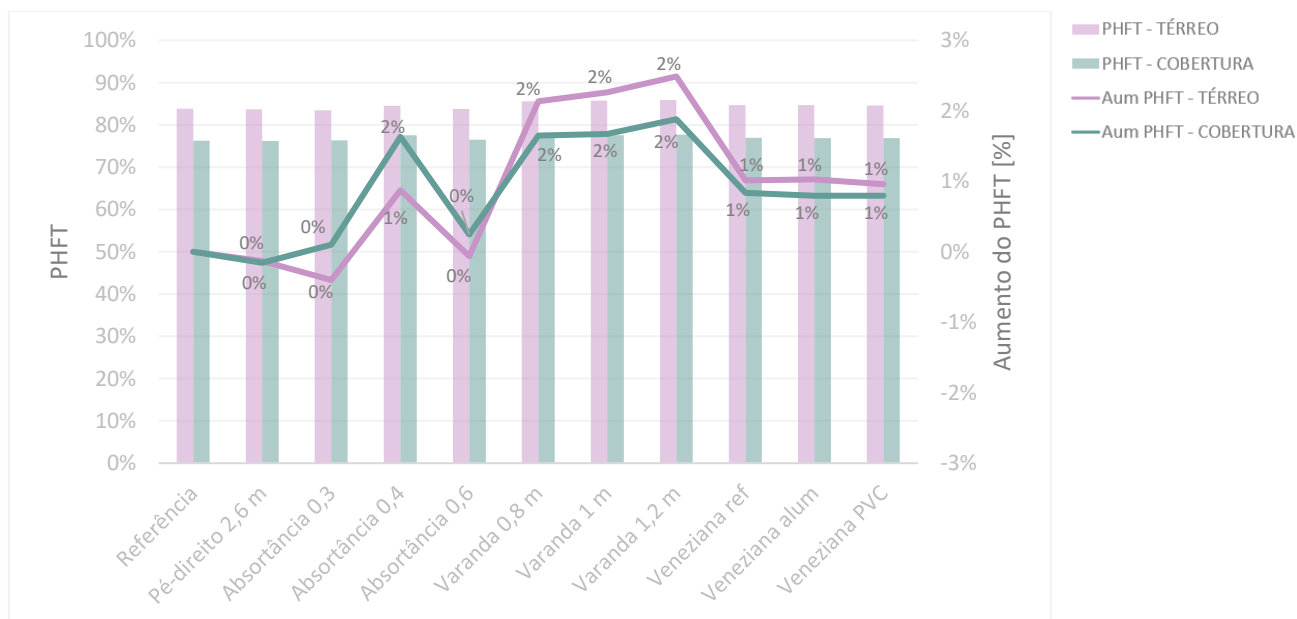
Fonte: a autora.

Figura 28 - Resultados de CgTT para a cidade de Curitiba – orientação Oeste



Fonte: a autora.

Figura 29 - Resultados de PHFT para a cidade de Curitiba – orientação Oeste



Fonte: a autora.

Analisando os gráficos, com dados exibidos em mesma escala, observa-se a grande influência da orientação solar nos resultados de carga térmica. Quando a edificação é orientada a oeste, as UHs analisadas recebem radiação solar durante todo o período do dia, com destaque para o ambiente da sala/cozinha que, por ter fachadas orientadas a norte, leste e oeste, recebe calor por radiação desde as primeiras horas do dia, até o pôr do sol. Quando orientada a norte, as UHs analisadas apresentam fachadas expostas a norte, leste e sul, o que reduz a incidência de radiação solar no período da tarde, quando as temperaturas são mais elevadas, impactando diretamente na demanda por carga térmica, em especial de resfriamento, que para a orientação norte é reduzida, comparativamente.

No entanto, é interessante observar que, comparando as duas orientações para a UH da cobertura, a redução da carga térmica para todos os casos é bastante similar, independentemente da orientação adotada, com diferença máxima de 3 pontos percentuais, no modelo da absorção 0,3. Já para a UH térrea a diferença é considerável, com cerca de 15 pontos percentuais para o mesmo modelo (Absorção 0,3).

Já o indicador de desempenho térmico PHFT apresenta uma constância entre todos os casos, orientações e UHs consideradas. Para Curitiba, todos os modelos considerados têm PHFT elevado e semelhante, entre 76% e 89%, o que mostra que todos os casos considerados apresentam comportamento térmico satisfatório quando

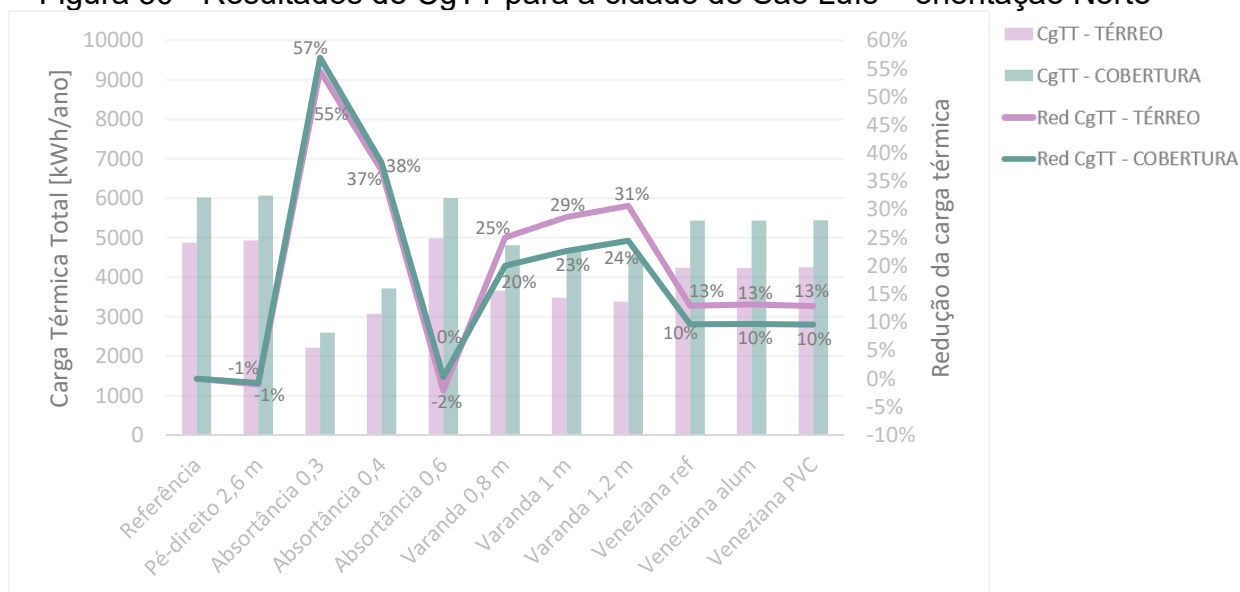
a edificação é operada com ventilação natural, mantendo-se dentro da faixa de temperatura operativa em mais de 75% do total de horas de ocupação da UH. Também, é interessante observar que, para a orientação norte, os modelos com varanda para a UH térrea apresentam redução no PHFT, enquanto para a orientação oeste os mesmos casos apresentam os maiores aumentos de PHFT, comparativamente entre os demais modelos paramétricos.

Comparando os modelos entre si, observa-se que os modelos Pé direito 2,6 m e Absortância 0,6 apresentam resultados de carga térmica e PHFT bastante similares àqueles observados para o modelo de referência, com diferenças próximas a zero. A inserção da veneziana provoca redução na carga térmica menor que 8% no melhor dos casos analisados e aumento do PHFT que não chega a 1%, sem diferenças significativas entre os materiais considerados.

A absortância apresenta-se como um parâmetro de bastante impacto no desempenho térmico para o clima de Curitiba, em especial para a UH localizada na cobertura, com uma diferença de mais de 800 kWh/ano para o modelo Absortância 0,3 quando comparado ao modelo de referência, orientado a oeste. Porém, esse caso específico (Absortância 0,3, orientação oeste e UH da cobertura) apresenta um aumento de apenas 0,1% no PHFT.

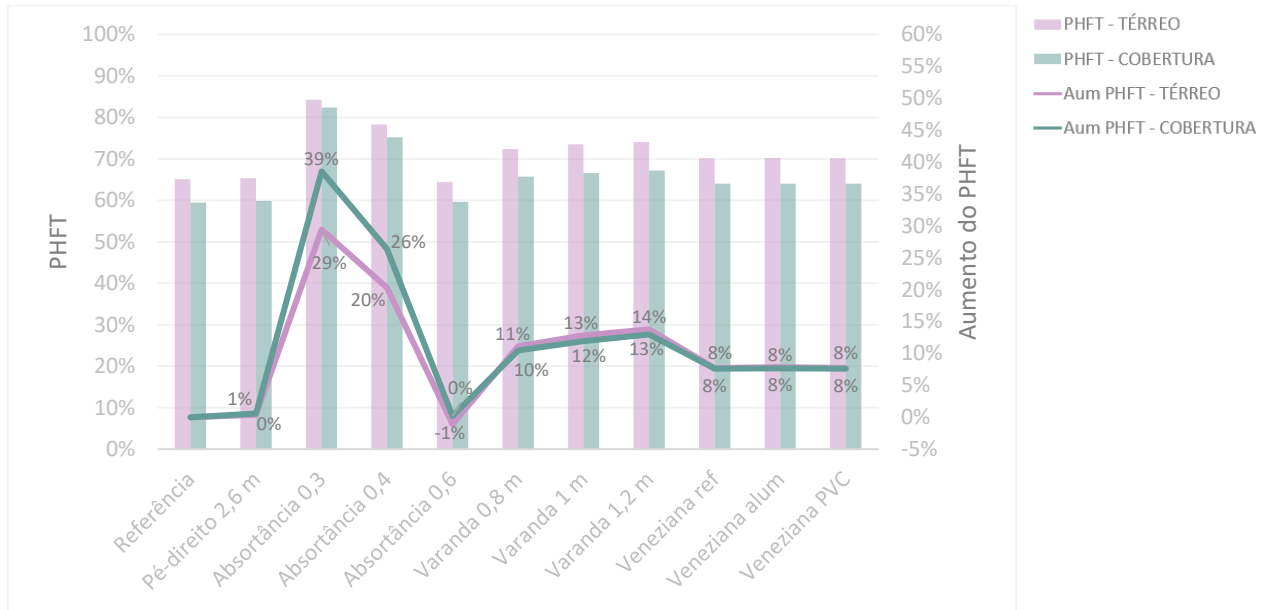
Da mesma forma que foi apresentado acima, a Figura 30, Figura 31, Figura 32 e Figura 33 apresentam os resultados de CgTT e PHFT para a cidade de São Luís.

Figura 30 - Resultados de CgTT para a cidade de São Luís – orientação Norte



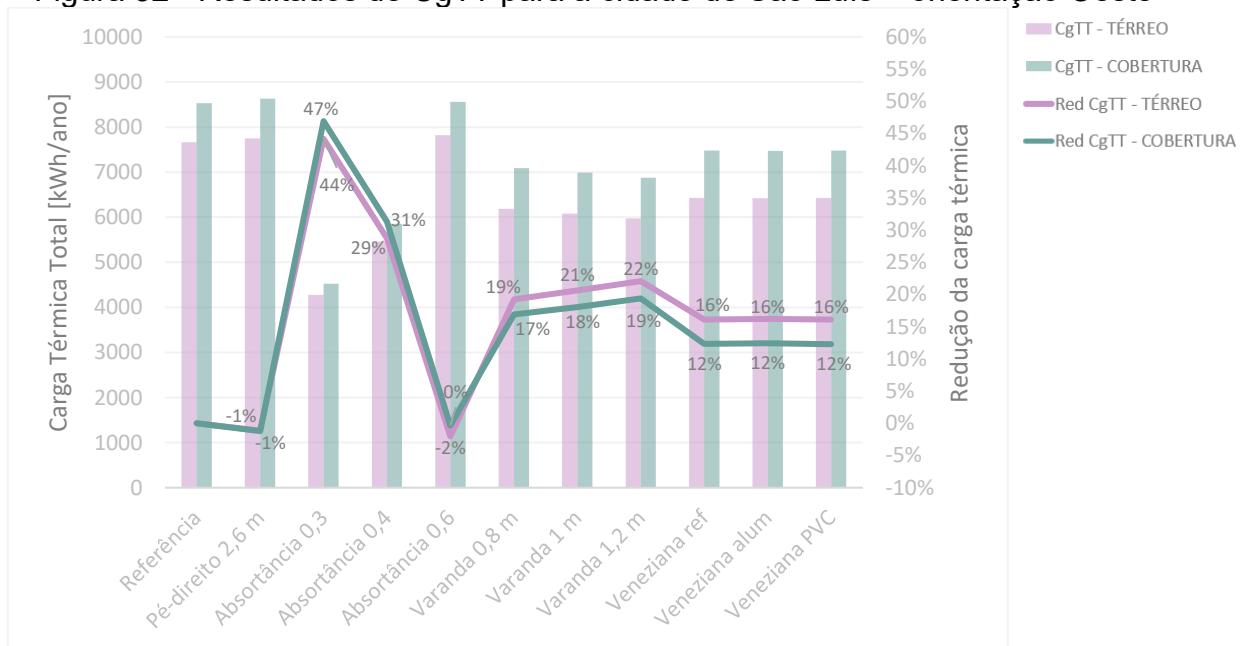
Fonte: a autora.

Figura 31 - Resultados de PHFT para a cidade de São Luís – orientação Norte



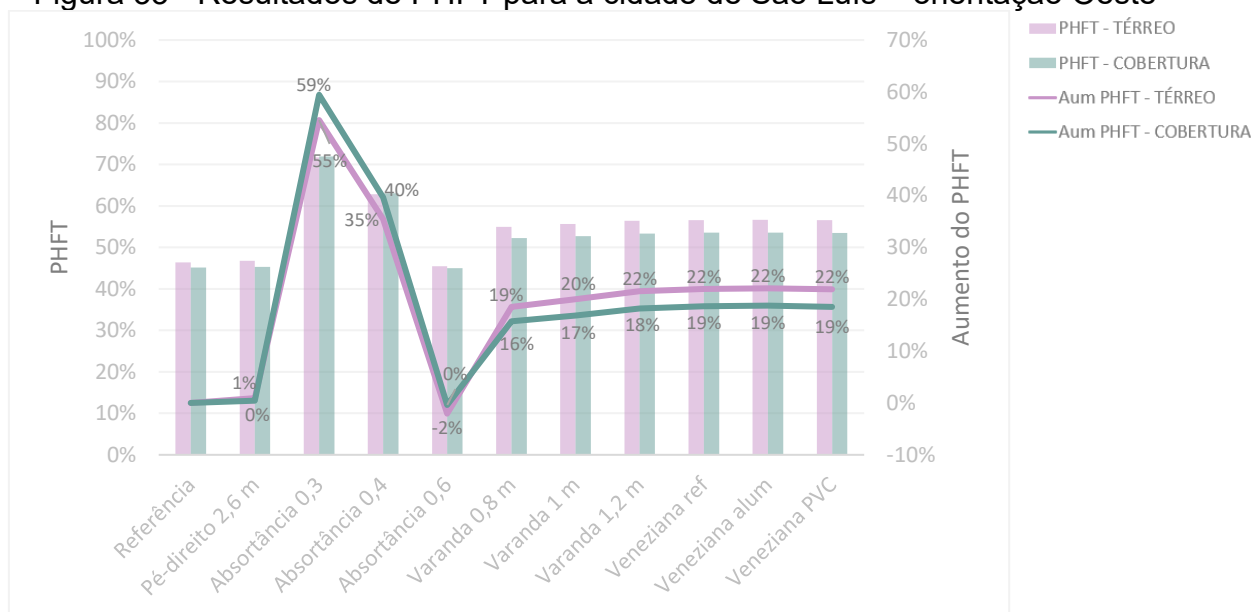
Fonte: a autora.

Figura 32 - Resultados de CgTT para a cidade de São Luís – orientação Oeste



Fonte: a autora.

Figura 33 - Resultados de PHFT para a cidade de São Luís – orientação Oeste



Fonte: a autora.

Os resultados para a cidade de São Luís seguem o mesmo padrão de Curitiba: a demanda por carga térmica é maior na UH da cobertura e quando a edificação é orientada a oeste, no entanto, proporcionalmente, a diferença de carga térmica entre orientação norte *versus* oeste e UH térrea *versus* cobertura é reduzida. Ou seja, mesmo que as diferenças existam, a orientação ou exposição da UH não impactam tanto nos indicadores de desempenho térmico como ocorre em Curitiba.

É interessante observar que, para São Luís, a forma das curvas nos gráficos de CgTT e PHFT é oposta, ou seja, quando a carga térmica é elevada, o PHFT é reduzido, o que mostra que as UHs analisadas se comportam de maneira semelhante quando operadas com e sem o uso da ventilação natural. Ainda, as curvas de redução de carga térmica e aumento do PHFT também se assemelham, corroborando este comportamento similar entre as formas de uso das UHs.

Para São Luís, a redução da absortância gera os maiores ganhos em redução de carga térmica e aumento do PHFT, com um aumento de quase 60% do PHFT e redução de 47% da carga térmica no modelo Absortância 0,3, em comparação ao modelo de referência para a UH da cobertura orientada a oeste. O impacto da absortância também pode ser observado nos casos do modelo Absortância 0,6, onde um aumento de 0,02 na absortância das fachadas (a absortância das fachadas do modelo de referência é igual a 0,58) eleva a carga térmica e reduz o PHFT, mesmo

que também ocorra uma diminuição de 0,05 na absorptância da cobertura (de 0,65 para 0,6)

O impacto da absorptância vem seguido do impacto da inserção da varanda, que aumenta gradativamente em função do aumento de sua profundidade. Uma observação interessante é que, em todos os casos e modelos com varanda, analisados para a cidade de São Luís, os maiores aumentos de PHFT e reduções de CgTT estão concentrados na UH térrea.

A inserção da veneziana nos dormitórios apresenta maior impacto nos indicadores de desempenho térmico em São Luís do que em Curitiba. No entanto, a diferença entre os materiais utilizados nas venezianas não apresenta variações significativas, pois os resultados se mantêm bastante próximos entre si e em relação ao modelo de referência.

A seguir, são apresentados gráficos que relacionam dois indicadores de desempenho por vez, separados por cidade e UH. Em cada figura, são apresentados todos os modelos paramétricos classificados de acordo com o nível de desempenho, separados por orientação. A estrela vermelha, em todos os gráficos seguintes, representa o modelo de referência. A Figura 33 e a Figura 34 trazem os resultados para a UH térrea para a cidade de Curitiba.

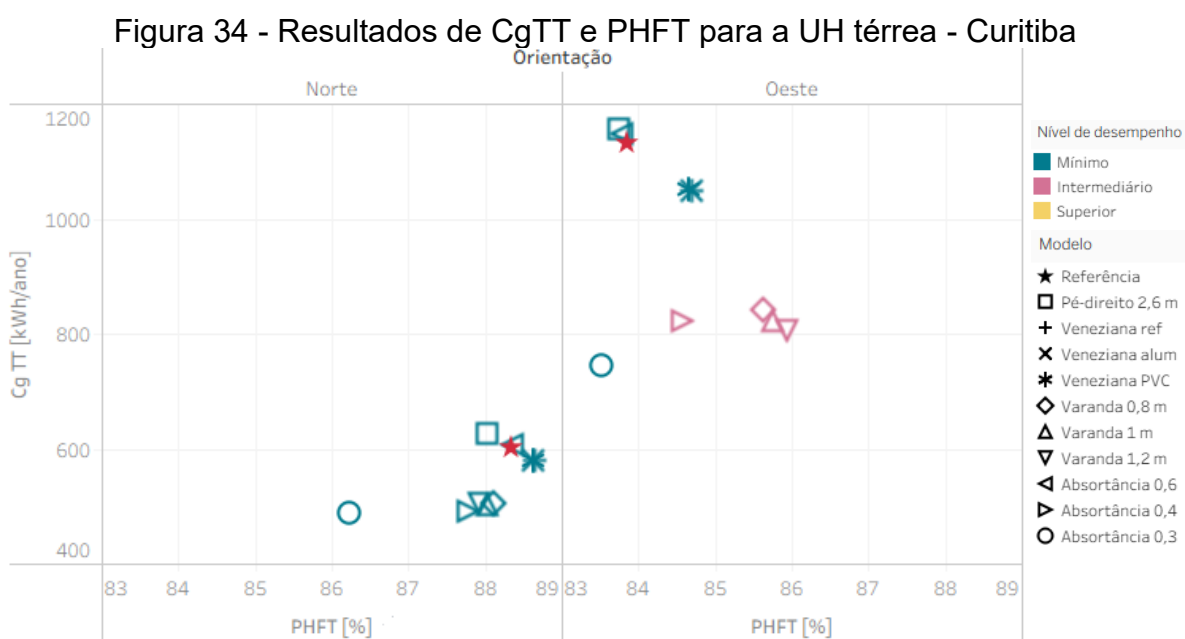
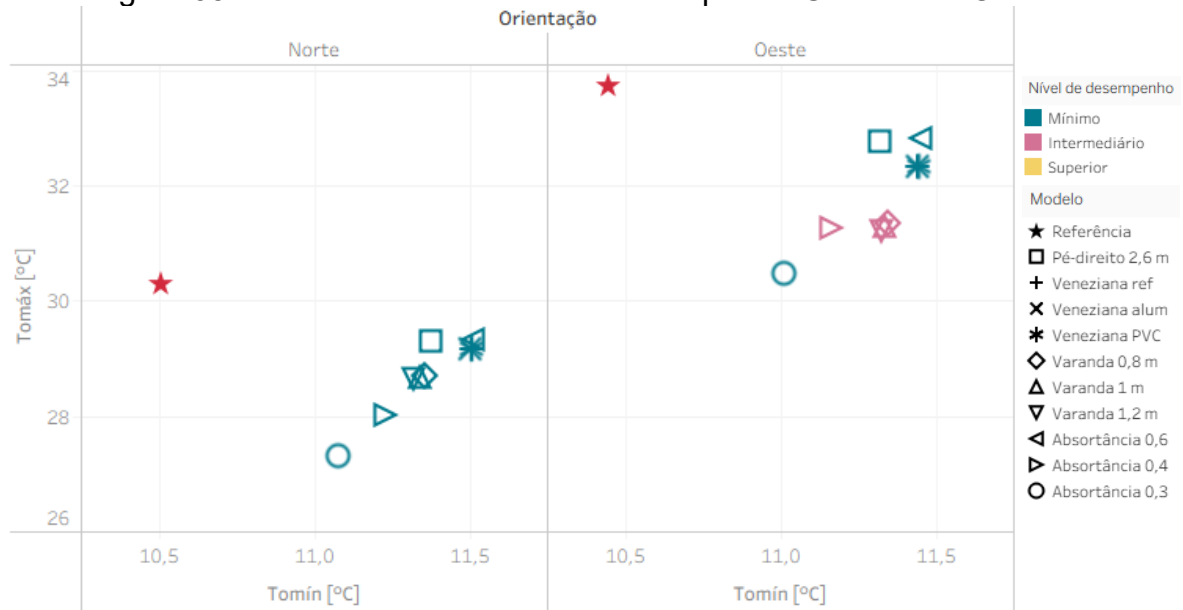


Figura 35 - Resultados de Tomáx e Tomín para a UH térrea - Curitiba



Fonte: a autora.

Conceitualmente, uma edificação com desempenho térmico satisfatório controla sua temperatura interna oferecendo ao usuário conforto térmico sem que haja uma grande demanda por energia para que isso ocorra (Lamberts; Dutra; Pereira, 2014). Em termos relacionados aos indicadores da norma de desempenho em edificações, NBR 15575, deseja-se que a UH apresente alto PHFT, baixa CgTT e, no contexto brasileiro, baixa Tomáx. Nos climas onde se considera o indicador Tomín (climas frios), é ideal que este indicador apresente valores mais elevados.

Dessa forma, para a cidade de Curitiba, que apresenta clima frio, os modelos que se aproximam do canto inferior direito dos gráficos (CgTT baixa e PHFT alto; Tomáx baixa e Tomín alta) apresentam melhor desempenho térmico, comparativamente.

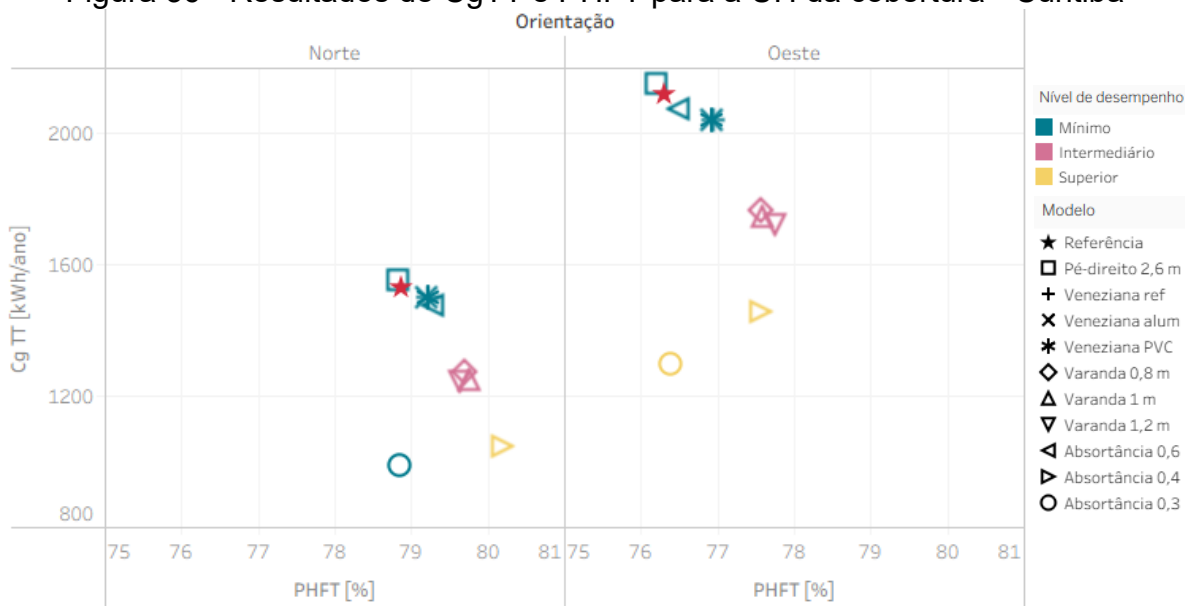
Observando a Figura 34 e a Figura 35, é possível perceber o destaque do modelo Absortância 0,3, que se distancia dos demais casos. Mesmo que se enquadre no nível mínimo de desempenho térmico, é o modelo paramétrico que apresenta menor carga térmica total e menores temperaturas operativas máximas. Contudo, também apresenta menores PHFT e Tomín, o que reforça a necessidade da análise conjunta de todos os indicadores, pois, por mais que apresente uma grande redução da carga térmica total nas UHs, isso não é o suficiente para elevar o nível de desempenho térmico.

Para a UH térrea orientada a norte, nenhuma das alterações na envoltória foi suficiente para, isoladamente, elevar o nível de desempenho de mínimo para intermediário ou superior, porém todas atenderam ao nível mínimo. Já para a orientação oeste, quatro dos dez modelos paramétricos atendem ao nível intermediário (Varanda 0,8 m, Varanda 1 m, Varanda 1,2 m e Absortância 0,4).

Os modelos Veneziana ref, Veneziana alum, Veneziana PVC, Pé-direito 2,6 m e Absortância 0,6 mostram-se com resultados mais desfavoráveis, por vezes piores que o próprio modelo de referência para alguns indicadores.

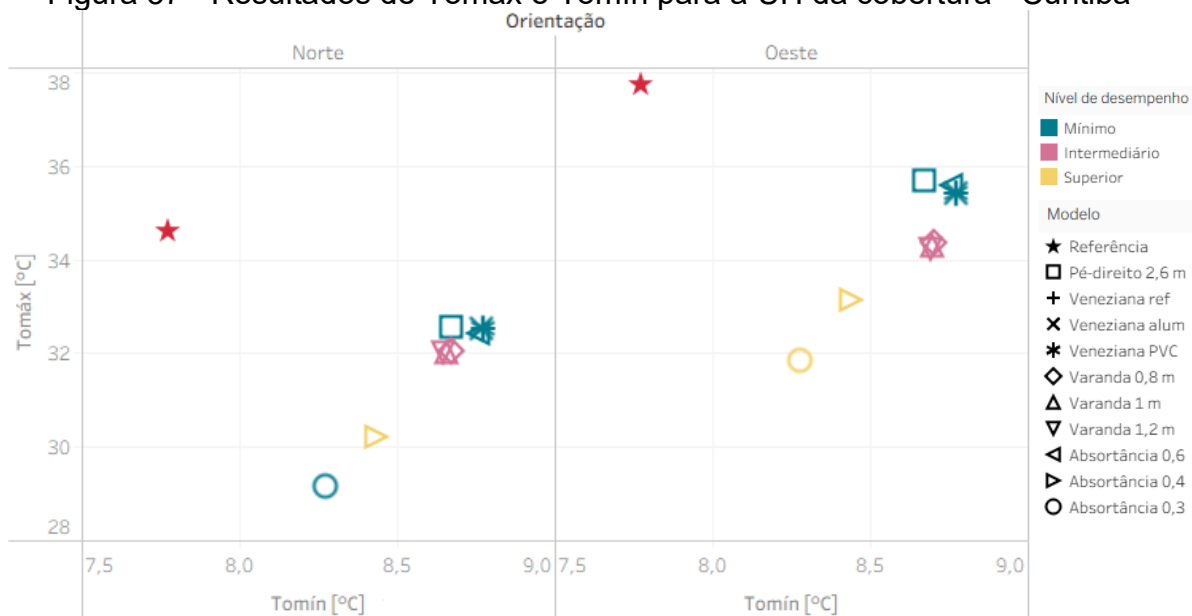
A Figura 36 e Figura 37 mostra os resultados para a UH da cobertura, também para a cidade de Curitiba.

Figura 36 - Resultados de CgTT e PHFT para a UH da cobertura - Curitiba



Fonte: a autora.

Figura 37 - Resultados de Tomáx e Tomín para a UH da cobertura - Curitiba



Para a UH da cobertura na cidade de Curitiba, ao contrário do que se observa na UH térrea, é possível encontrar modelos que atingem o nível superior de desempenho térmico. Para essa UH é possível perceber um maior distanciamento do modelo de referência, ficando mais evidente o impacto de cada alteração paramétrica.

Da mesma forma que observado para a UH térrea, os três modelos com varanda e o modelo Absortância 0,4 mostram-se com bons resultados de desempenho térmico para as duas orientações, com redução da carga térmica e da temperatura operativa máxima e aumento do PHFT e da temperatura operativa mínima, comparados com o modelo de referência. Para a UH da cobertura, o modelo Absortância 0,3 atinge o nível superior quando orientada a oeste, juntamente com o modelo Absortância 0,4 que apresenta redução de carga térmica suficiente para se enquadrar no nível superior, único requisito que não era atendido no caso da UH térrea para este modelo.

Também é interessante observar que, na UH térrea orientada a norte, todos os modelos paramétricos atingem apenas o nível mínimo de desempenho térmico, enquanto, quando se observa a UH da cobertura orientada da mesma forma, existem casos que atingem nível intermediário e até superior, como o modelo Absortância 0,4.

A Figura 38 e Figura 39 apresentam os resultados dos indicadores da UH térrea para a cidade de São Luís.

Figura 38 - Resultados de CgTT e PHFT para a UH térrea – São Luís

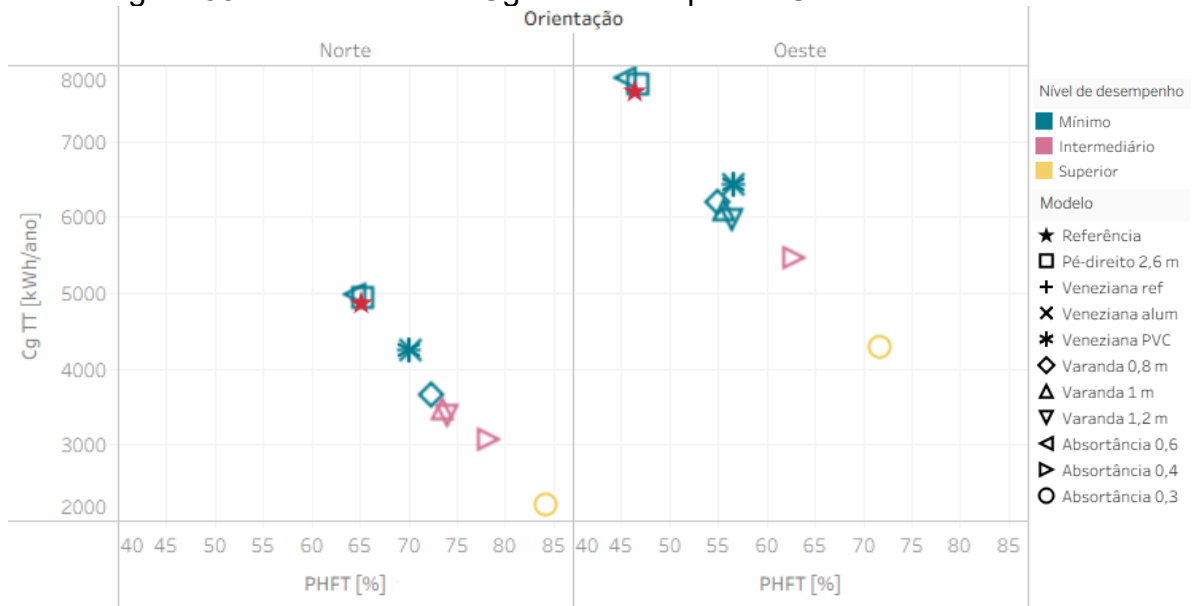
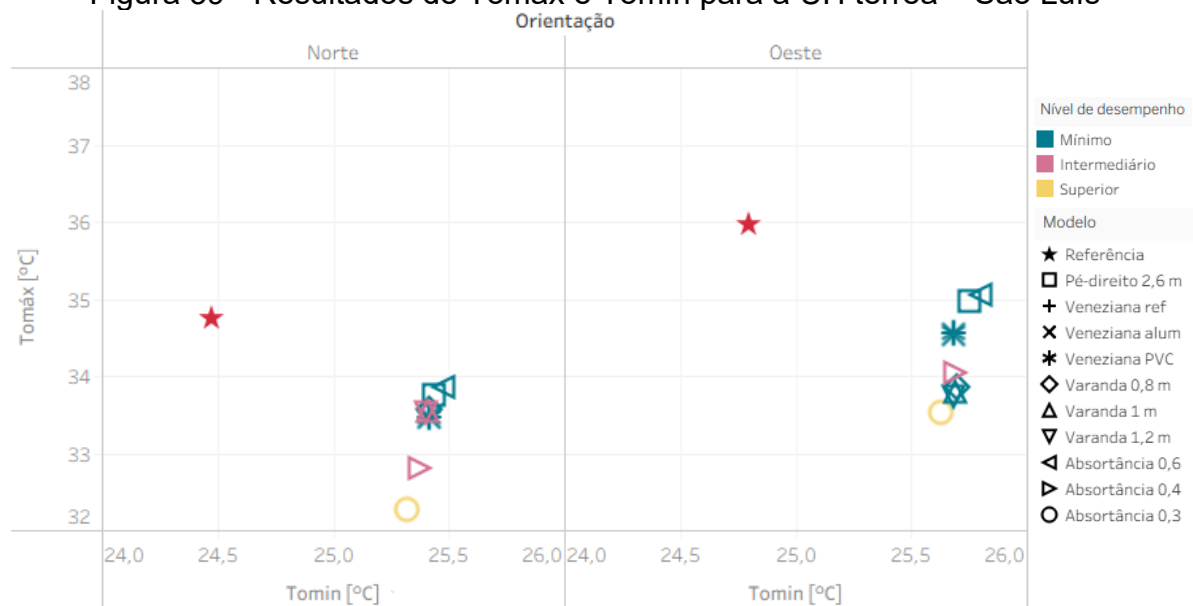


Figura 39 - Resultados de Tomáx e Tomín para a UH térrea – São Luís



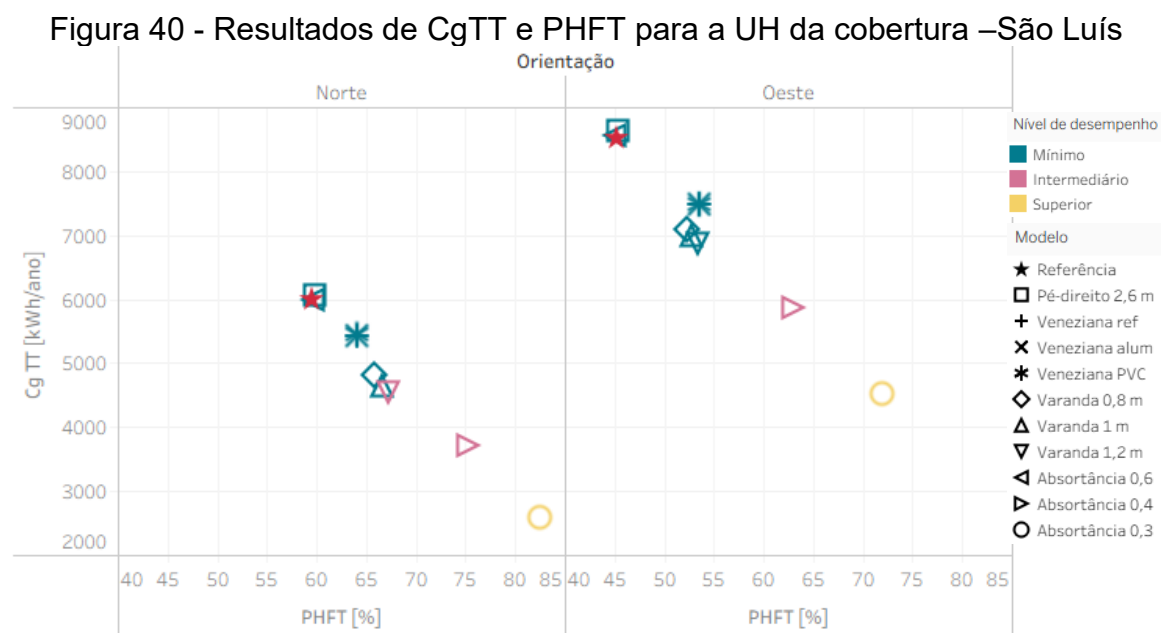
Para a cidade de São Luís, de acordo com a NBR 15575:2021, devido à zona bioclimática em que se localiza, o indicador Tomín não é utilizado para a determinação do nível de desempenho térmico, mas pode ser analisado como um indicador adicional. Por esse motivo, a Tomín continua sendo exibida graficamente, porém, deseja-se que, nesse caso, a temperatura operativa mínima seja reduzida, uma vez que a cidade de São Luís apresenta temperaturas já bastante elevadas, dificilmente abaixo dos 25 °C.

Para a UH térrea, também é observado um destaque do modelo Absortância 0,3 em relação aos demais modelos, com redução de mais de 3300 kWh de carga térmica anual e quase 2,5 °C na Tomax, quando comparado com o modelo de referência para a orientação oeste. Para a UH térrea, o modelo Absortância 0,3 é o único que atinge o nível superior de desempenho térmico para as duas orientações consideradas.

Já o nível intermediário é alcançado para o modelo Absortância 0,4 nas duas orientações consideradas e, para a orientação norte, os modelos Varanda 1 m e Varanda 1,2 m também vão além do nível mínimo, com aumento de quase 10 pontos percentuais no PHFT em relação ao modelo de referência, para os dois modelos.

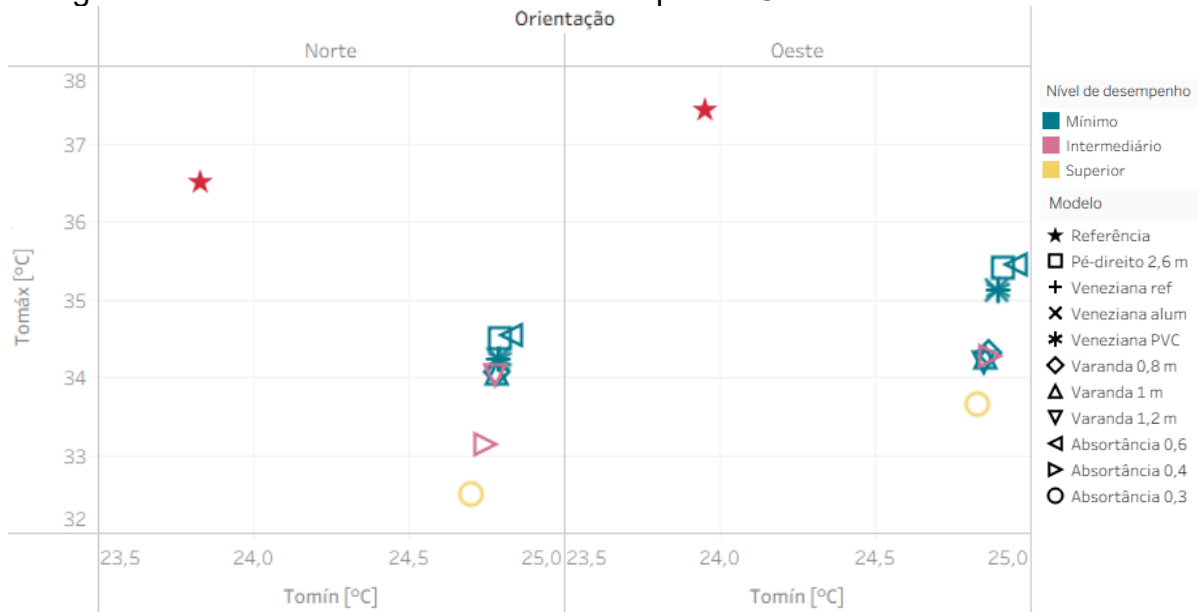
É possível observar, também, que o modelo Absortância 0,6 apresenta os resultados mais desfavoráveis ao desempenho térmico para as duas orientações, com carga térmica elevada, PHFT reduzido e temperaturas operativas máxima e mínima elevadas. Porém, apesar de apresentar os piores resultados comparados com os demais modelos paramétricos, quando comparado com o modelo de referência, é possível observar uma redução na temperatura operativa máxima.

A Figura 40 e Figura 41 apresentam os resultados dos indicadores da UH do pavimento da cobertura para a cidade de São Luís.



Fonte: a autora.

Figura 41 - Resultados de Tomáx e Tomín para a UH da cobertura –São Luís



Fonte: a autora.

Os resultados para a UH da cobertura seguem o mesmo comportamento dos observados na UH do pavimento térreo, com destaque para os modelos onde a absorvância é variada. Para as duas orientações, o modelo Absortância 0,3 ainda é o que apresenta os melhores resultados para todos os indicadores, em comparação com os demais modelos paramétricos, sendo o único modelo a atingir o nível superior de desempenho térmico.

Quando orientada a norte, o modelo Varanda 1m se enquadra no nível mínimo de desempenho térmico para a UH da cobertura, enquanto, para a UH térrea, o mesmo modelo apresenta desempenho intermediário. Isso ocorre porque, para a cobertura, o modelo não atende aos requisitos de aumento de PHFT para o nível intermediário.

Para a UH da cobertura, é interessante observar que a varanda apresenta maior impacto em São Luís quando a edificação é orientada a norte, pois proporciona sombreamento no ambiente da sala/cozinha por mais horas do dia, sobretudo à tarde.

Considerando as análises individuais realizadas para as duas cidades, constata-se que, dentre os parâmetros variados, a absorvância apresenta maior impacto nos indicadores de desempenho térmico. Depois da absorvância, a ordem de impacto dos parâmetros da envoltória nos indicadores de desempenho térmico segue com a varanda, a veneziana e, por último, o pé-direito.

Para as duas cidades, a absorvância foi o único parâmetro capaz de, isoladamente, elevar o nível de desempenho da edificação de mínimo para superior. Os modelos com varanda, também para as duas cidades, alteraram o nível de desempenho térmico para intermediário, enquanto os três modelos com veneziana e o modelo Pé-direito 2,6 m não apresentaram indicadores com valores suficientemente satisfatórios para elevar o nível de desempenho térmico, apesar de serem observadas reduções na carga térmica e diminuição da $T_{\text{máx}}$ em alguns casos.

Apesar de que, nas duas cidades analisadas, o modelo Pé-direito 2,6 m mostra-se com desempenho térmico bastante similar ao modelo de referência, com alterações bastante discretas nos indicadores, ainda é possível observar que esse parâmetro apresenta resultados mais favoráveis quando as unidades habitacionais estão ventiladas naturalmente, havendo uma melhora discreta no PHFT, $T_{\text{máx}}$ e $T_{\text{mín}}$ na maioria dos casos. Esse comportamento pode justificar a exigência da portaria MCID nº 725/2023 em alterar o pé-direito das edificações para um mínimo de 2,6 m, já que, na prática, as habitações de interesse social no Brasil são, em geral, operadas utilizando ventilação natural.

4.3 MODELO OBRIGATÓRIO E MODELO OTIMIZADO

Por meio das análises individuais dos modelos paramétricos foi possível determinar os melhores parâmetros para compor o modelo otimizado. Para isso, cada modelo paramétrico foi avaliado em relação ao aumento de PHFT, redução de C_{gTT} e melhora na temperatura operativa, de acordo com a cidade considerada, de acordo com o que foi apresentado na seção anterior. Nesta seção, o modelo otimizado de cada cidade será comparado com o modelo de referência e com o modelo obrigatório, a fim de avaliar os incrementos nos indicadores e no nível de desempenho térmico de cada modelo. É importante destacar que a comparação do modelo otimizado com o modelo obrigatório é importante pois o modelo obrigatório segue as configurações exigidas pela portaria MCID nº 725/2023.

A portaria MCID nº 725/2023 não faz menção à inserção de isolamento na cobertura para edificações localizadas em climas quentes. Em contrapartida, a NBR 15575:2021 especifica que, para a avaliação de uma edificação localizada na zona bioclimática 8 (de acordo com a NBR 15220:2005), deve-se considerar sobre a laje o uso de isolamento com resistência térmica igual a $0,67 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$, para o modelo de

referência. Dessa forma, o isolamento na cobertura, considerado no modelo de referência, não foi inserido nos modelos obrigatório e otimizado, para a cidade de São Luís.

A Tabela 10 traz os parâmetros utilizados nos modelos analisados nesta seção.

Tabela 10 - Parâmetros utilizados nos modelos

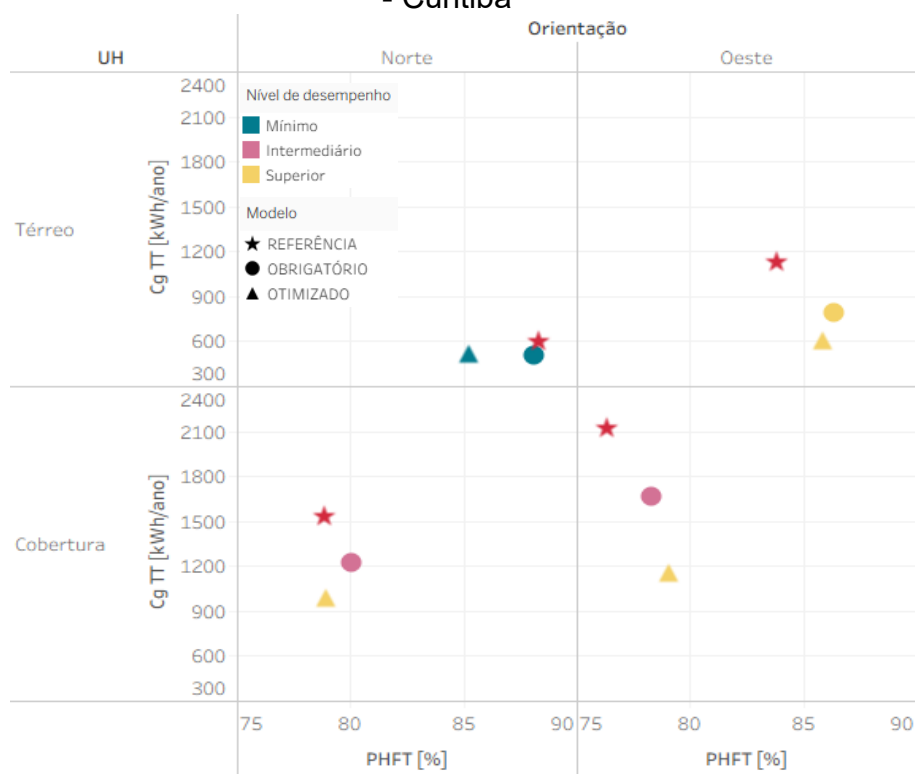
Caso	Pé-direito	Absortância das paredes e cobertura	Profundidade da Varanda	Condutância da Veneziana
Referência*	2,5 m	0,58	sem varanda	sem veneziana
Obrigatório São Luís	2,6 m	0,4	0,8 m	56 W/m ² K
Obrigatório Curitiba	2,6 m	0,6	0,8 m	56 W/m ² K
Otimizado São Luís	2,5 m	0,3	1,2 m	44200 W/m ² K
Otimizado Curitiba	2,5 m	0,4	1,2 m	56 W/m ² K

(*) O modelo de referência, para a cidade de São Luís, apresenta isolante na cobertura, como descrito no item 2.2.1 do presente trabalho.

Fonte: a autora.

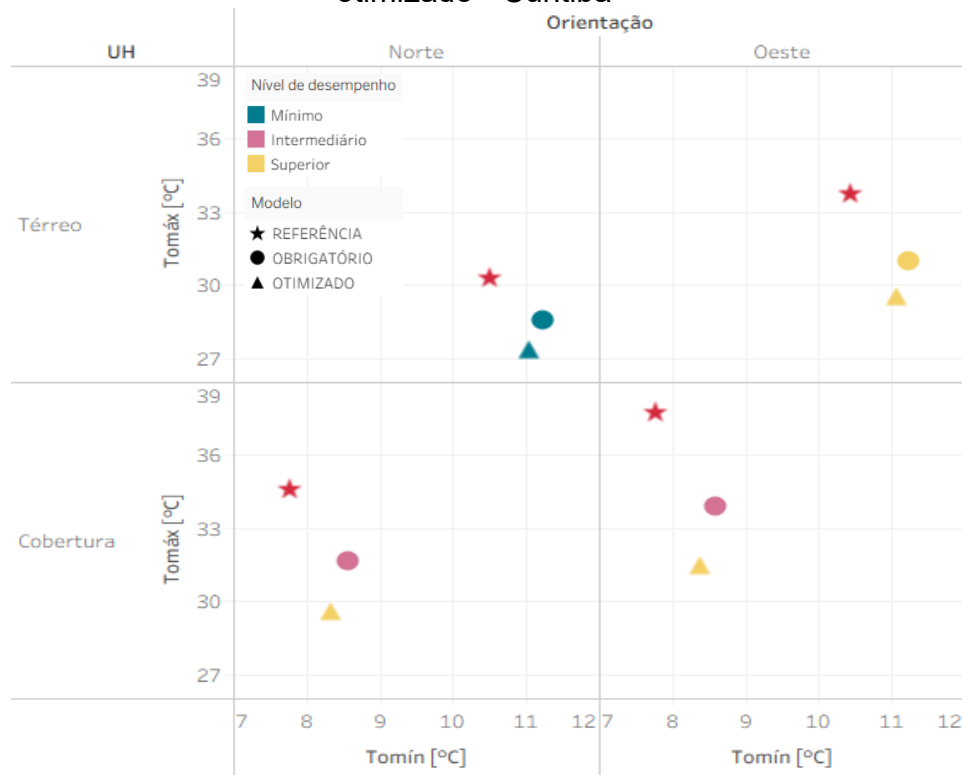
Os resultados dos indicadores de desempenho térmico para a cidade de Curitiba são apresentados nos gráficos da Figura 42 e da Figura 43 abaixo, combinando dois indicadores por vez. A estrela vermelha representa o modelo de referência.

Figura 42 - Resultados de CgTT e PHFT para os modelos obrigatório e otimizado - Curitiba



Fonte: a autora.

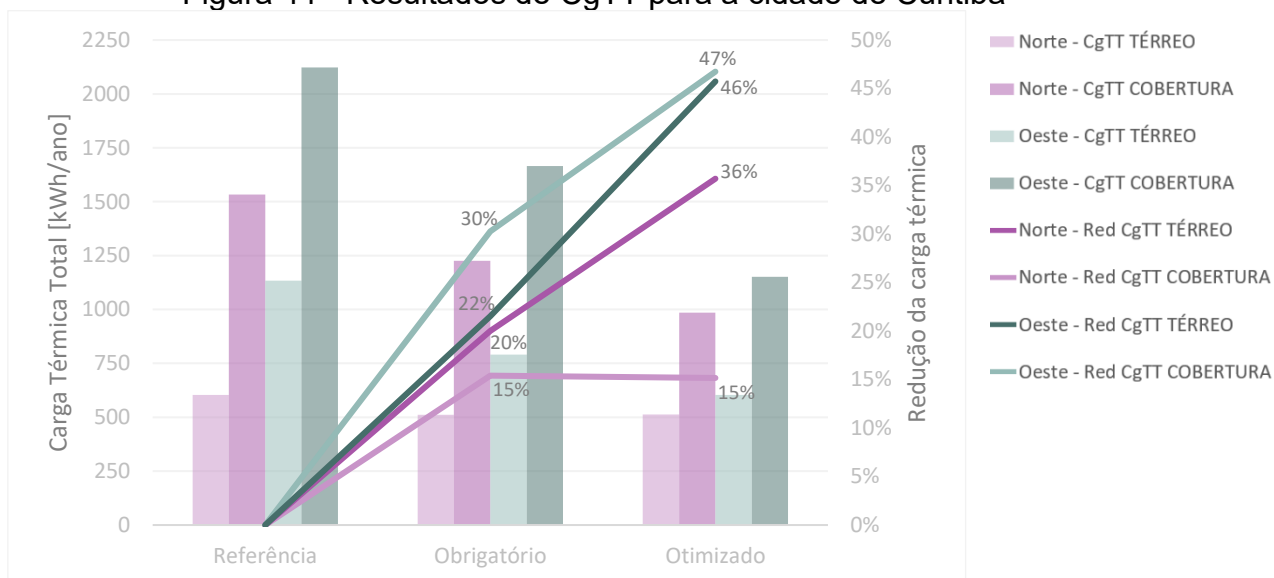
Figura 43 - Resultados de Tomáx e Tomín para os modelos obrigatório e otimizado - Curitiba



Fonte: a autora.

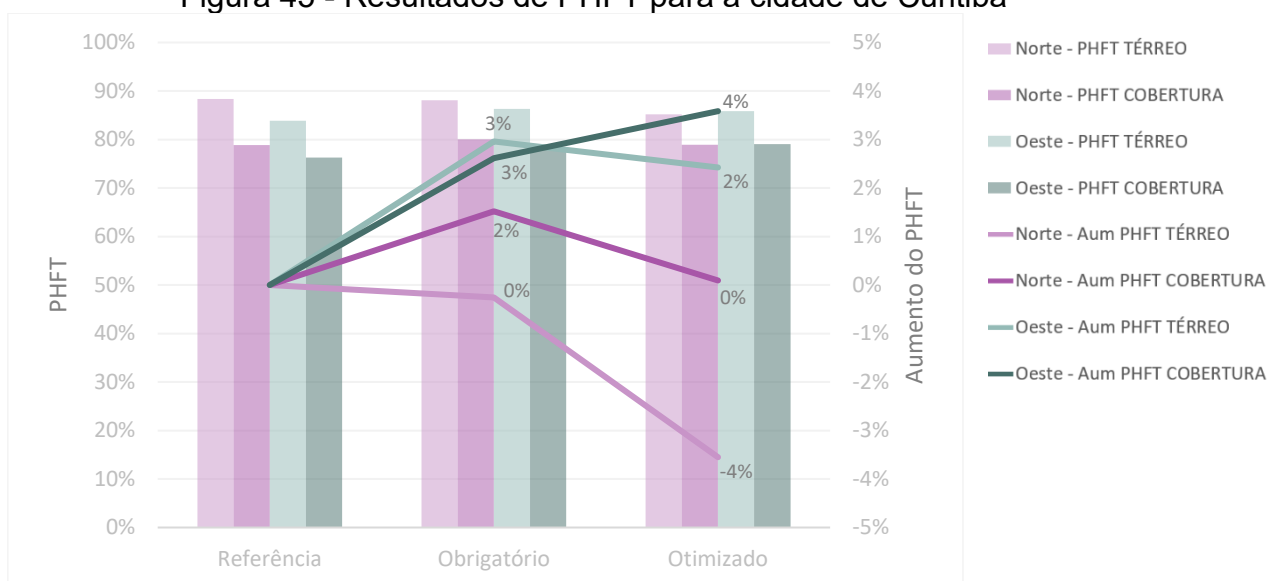
A Figura 44 e a Figura 45 trazem, respectivamente, os resultados de carga térmica total e PHFT para a cidade de Curitiba. A taxa de redução da carga térmica, expressa em porcentagem no eixo y secundário, é respectiva à diminuição da carga térmica em relação ao modelo de referência. A mesma apresentação gráfica é observada para o aumento do PHFT.

Figura 44 - Resultados de CgTT para a cidade de Curitiba



Fonte: a autora.

Figura 45 - Resultados de PHFT para a cidade de Curitiba



Fonte: a autora.

Os gráficos de Curitiba deixam claro que, quando a edificação é orientada a oeste (cores em tom verde nos gráficos), as alterações na envoltória surtem mais efeito nos indicadores de desempenho térmico em comparação com os casos em que a edificação é orientada a norte (cores em tom rosa nos gráficos). Em geral, a redução da carga térmica total do modelo otimizado em relação ao modelo obrigatório supera os 15% em todos os casos para Curitiba, com exceção da UH térrea orientada a norte, que não apresenta nenhum ganho expressivo em relação ao modelo obrigatório, mantendo 15% de redução de carga térmica em comparação ao modelo de referência.

No entanto, o modelo otimizado, quando orientado a oeste e analisada a UH da cobertura, apresenta uma redução de carga térmica de 46% e aumento de 4% no PHFT em relação ao modelo de referência e, quando comparado ao modelo obrigatório, reduz a carga térmica em mais de 500 kWh/ano, uma redução de cerca de 30%.

A análise dos gráficos de PHFT mostram que, por mais que a redução da CgTT seja bastante expressiva em quase todos os casos, o PHFT não acompanha a melhora desse indicador, onde, para o modelo otimizado em relação ao obrigatório, há um aumento de apenas 1% do PHFT no caso da UH da cobertura orientada a oeste, caso que apresentou a maior redução da carga térmica total.

Com exceção do caso orientado a oeste para a UH da cobertura, o modelo otimizado apresentou piora no PHFT quando comparado ao modelo obrigatório. Mesmo assim, três dos quatro casos do modelo otimizado atingem nível superior de desempenho térmico, para o modelo obrigatório isso só ocorre em um dos quatro casos.

A redução do PHFT nos casos do modelo otimizado em relação ao modelo obrigatório pode ser explicada pela redução da temperatura operativa mínima que, para cidades de clima mais frio, como Curitiba, não é desejada. Isso mostra que estratégias que reduzem a Tomáx podem impactar negativamente na Tomín. O ideal, nesses casos, seria que houvesse o aumento da Tomín acompanhado da redução da Tomáx, o que elevaria o PHFT. Além disso, é importante observar que os valores de PHFT do modelo de referência para Curitiba já são bastante elevados, próximos de 90% para a UH da cobertura nas duas orientações, o que torna mais difícil a melhora desse indicador.

A partir da análise gráfica, é possível perceber que as alterações na envoltória foram eficientes já no modelo obrigatório, com pouco espaço para melhora no modelo otimizado, mesmo que exista um ganho em nível de desempenho em quase todos os casos.

O modelo otimizado se destaca na UH da cobertura com orientação oeste, apresentando os melhores resultados para Curitiba, com redução superior a 30% na carga térmica total, quase 2,4 °C a menos na Tomáx e leve aumento do PHFT. Esse cenário demonstra que, mesmo em climas mais amenos, a orientação solar e a posição da UH na edificação influenciam significativamente a eficácia das estratégias adotadas na envoltória.

A Figura 46 e a Figura 47 apresentam os resultados dos indicadores de desempenho térmico para a cidade de São Luís, combinando dois indicadores por vez. A estrela vermelha representa o modelo de referência.

Figura 46 - Resultados de CgTT e PHFT para os modelos obrigatório e otimizado - São Luís

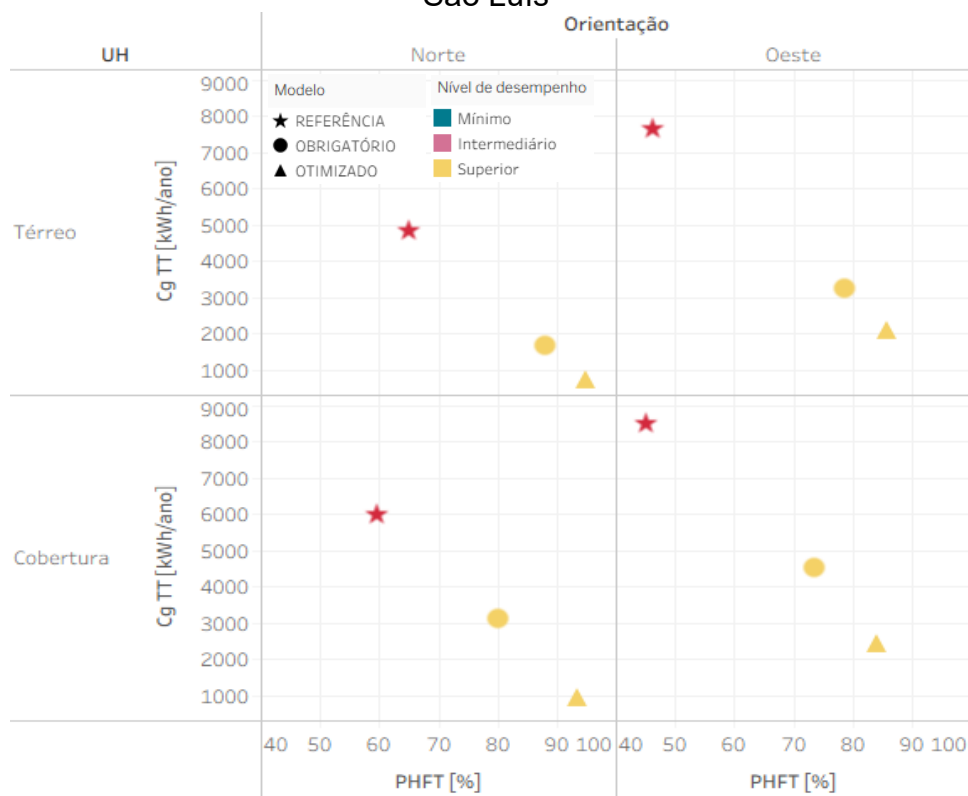
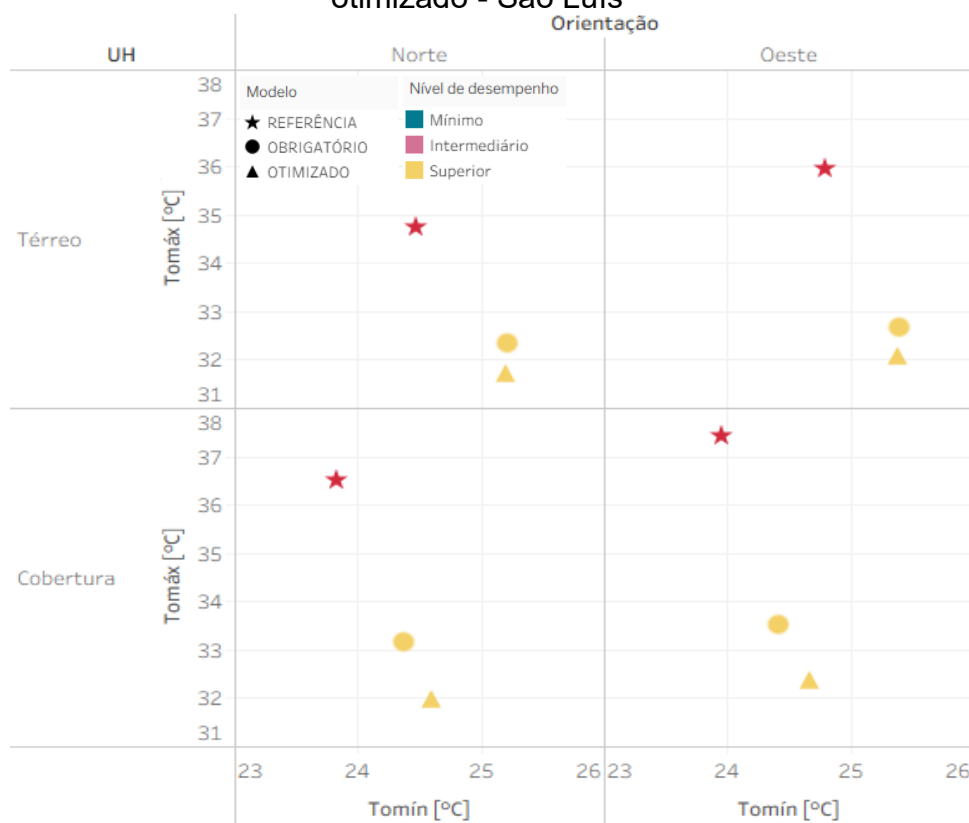


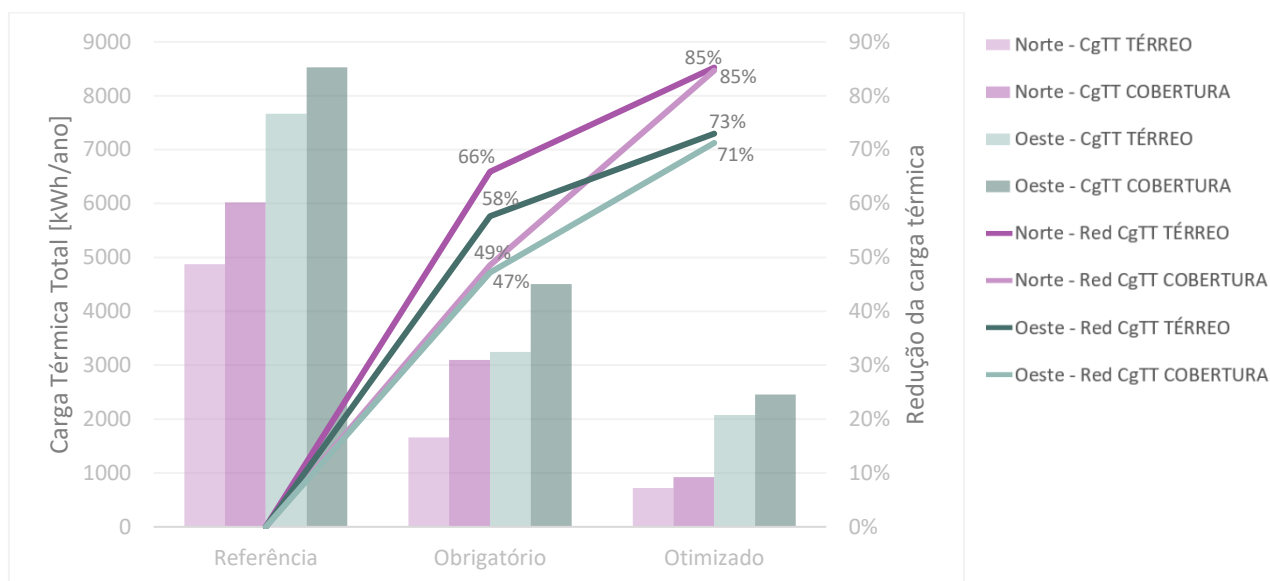
Figura 47 - Resultados de Tom_{ax} e Tom_{ín} para os modelos obrigatório e otimizado - São Luís



Fonte: a autora.

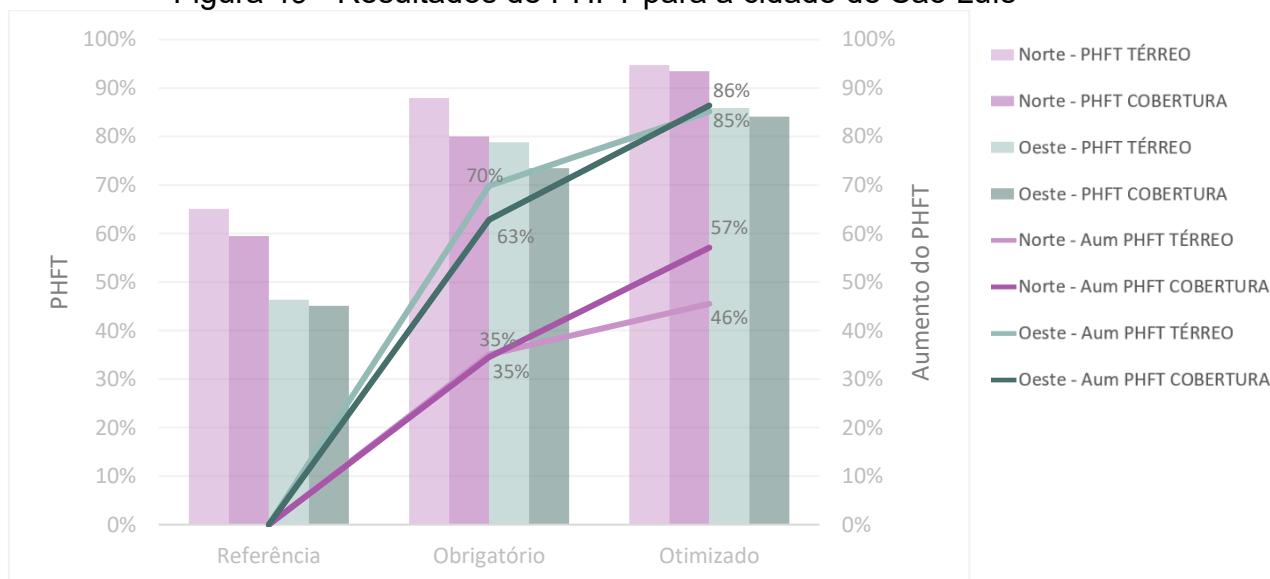
Abaixo, são apresentadas a Figura 48 e a Figura 49, com resultados das comparações entre os modelos de referência, obrigatório e otimizado para a cidade de São Luís, com reduções referentes à comparação com o modelo de referência.

Figura 48 - Resultados de CgTT para a cidade de São Luís



Fonte: a autora.

Figura 49 - Resultados de PHFT para a cidade de São Luís



Fonte: a autora.

Em São Luís, comparativamente, os resultados são ainda mais expressivos que aqueles observados em Curitiba. Aqui, tanto o modelo obrigatório quanto o modelo otimizado apresentam ganhos significativos em relação ao modelo de referência, mas o modelo otimizado merece destaque. O modelo otimizado é capaz de reduzir 85% da carga térmica para as duas UHs orientadas a norte quando comparados com o modelo de referência, e eleva em 57% o PHFT na UH da cobertura, evidenciando os benefícios das alterações da envoltória no desempenho

térmico das unidades habitacionais, que são potencializados pelo clima quente e úmido de São Luís.

Para o caso em que são observadas as menores reduções de carga térmica (UH térrea orientada a oeste), ainda há uma queda de mais de 5500 kWh/ano para o modelo otimizado e de 4400 kWh/ano para o modelo obrigatório, ambos em relação ao modelo de referência.

Todos os casos dos modelos obrigatório e otimizado atingem nível superior para a cidade de São Luís, com diminuições da temperatura operativa máxima bastante expressivas, que chegam a quase a 4 °C em alguns casos, quando comparados com o modelo de referência.

O modelo otimizado, para as duas UHs orientadas a norte, apresenta valores de PHFT que superam os 93%, o que significa que em menos de 7% das horas do ano em que a edificação está ocupada a temperatura operativa encontra-se acima dos 30 °C. Além disso, a Tomax encontrada para os dois casos é menor que 32 °C, evidenciando que a combinação dos elementos da envoltória dispensa quase que totalmente a necessidade de carga térmica de resfriamento que, para a UH térrea e da cobertura, é menor que 1000 kWh/ano.

Ainda que o modelo otimizado apresente ganhos bastante expressivos nos indicadores, é indiscutível que o modelo obrigatório cumpre bem com o objetivo de elevar o nível de desempenho térmico das unidades habitacionais. Adotando as medidas da envoltória exigidas pela portaria MCID nº 725/2023, todas as UHs avaliadas atingem nível superior de desempenho térmico para a cidade de São Luís. A carga térmica em todos os casos do modelo obrigatório é reduzida pela metade em comparação ao modelo de referência e as diminuições na Tomax nunca são menores que 2,4 °C.

5 CONCLUSÕES

O objetivo deste trabalho foi avaliar o impacto da envoltória no desempenho térmico de uma habitação de interesse social, de acordo com as exigências da portaria do Ministério das Cidades nº 725/2023. Para isso, foram realizadas variações nos parâmetros da envoltória aos quais a portaria faz referência: pé direito, absorvância, veneziana e varanda. Os parâmetros foram analisados individualmente e combinados, compondo os modelos obrigatório e otimizado, e comparados com o modelo de referência, de acordo com os indicadores de desempenho térmico (PHFT, $T_{máx}$, $T_{mín}$ e C_{gTT}), descritos na norma brasileira de desempenho de edificações residenciais NBR 15575:2021. Para as análises, realizadas por meio de simulações computacionais, foram selecionadas duas cidades brasileiras com climas distintos: Curitiba e São Luís. Utilizou-se uma HIS geminada sobreposta para a avaliação, considerando uma unidade habitacional localizada no pavimento térreo e outra no pavimento da cobertura, com orientação solar norte e oeste.

Anteriormente à configuração dos modelos paramétricos, obrigatórios e otimizados, foi realizada a análise de duas formas diferentes de modelagem da varanda, um dos parâmetros avaliados nesta pesquisa. Foram realizadas análises considerando a varanda modelada como zona térmica e como elemento de sombreamento e, comparando os dois modelos, optou-se por utilizar o “modelo shade” para as análises posteriores, uma vez que, em relação ao “modelo ZT”, apresenta uma quantidade menor de incertezas e adaptações, além de ser a forma com que a norma de desempenho NBR 15575:2021 considera as varandas/sacadas: como elementos de sombreamento que não devem ser representados no modelo de referência.

Após a escolha da forma com que a varanda foi modelada, realizou-se a modelagem e análise dos modelos paramétricos, que consistem em modelos onde, a partir do modelo de referência, apenas um parâmetro da envoltória é alterado por vez. Os resultados mostram que o parâmetro com maior impacto na carga térmica total da edificação é a absorvância, sendo o único capaz de elevar, sozinho, o nível de desempenho térmico de mínimo para superior, de acordo com os requisitos da NBR 15575. Depois da absorvância, a carga térmica é mais impactada pela varanda, seguida da veneziana, e por último, o pé-direito. Essa ordem de prioridade de impacto se aplica a todos os climas, orientações e UHs avaliadas. Isso mostra que, quando as

habitações são operadas sem o uso da ventilação natural, isto é, com condicionamento de ar, a absorção da radiação solar pelas paredes externas e cobertura é fator determinante no desempenho térmico. Para a cidade de São Luís, por exemplo, a simples diminuição da absorptância das fachadas de 0,58 para 0,3 eleva o nível de desempenho da habitação de mínimo para superior, com redução de 47% na carga térmica e aumento de quase 60% no PHFT para o caso da cobertura orientada a oeste. Em contrapartida, para o mesmo caso, o aumento da absorptância das fachadas de 0,58 para 0,6 gera um aumento na carga térmica e redução do PHFT, indicando uma piora no desempenho térmico.

A varanda, por sua vez, também apresentou impacto relevante nos modelos paramétricos, com ganho progressivo de desempenho térmico conforme o aumento de sua profundidade. Os resultados desse parâmetro foram mais expressivos em São Luís, especialmente para a UH térrea, na qual, quando orientada a norte, observa-se um ganho de quase 10 pontos percentuais em relação ao modelo de referência. Em Curitiba, os modelos paramétricos com varanda foram os únicos, além do modelo Absortância 0,4, que atingiram o nível intermediário de desempenho térmico para a UH térrea orientada a oeste.

A inserção de venezianas teve impacto reduzido, tanto em Curitiba quanto em São Luís. Em Curitiba, a redução da carga térmica não ultrapassou 8% nos melhores casos, com aumentos no PHFT inferiores a 1%, sem diferença significativa entre os materiais. Em São Luís, embora o impacto tenha sido ligeiramente mais perceptível, os resultados entre os três materiais também se mantiveram muito próximos e sem grandes desvios em relação ao modelo de referência. Já a alteração do pé-direito para 2,6 m não demonstrou contribuição significativa, apresentando resultados semelhantes ou, por vezes, inferiores ao modelo de referência.

Mesmo que a alteração de alguns dos parâmetros da envoltória isoladamente seja capaz de melhorar consideravelmente os indicadores de desempenho térmico, a portaria MCID nº 725/2023, na qual esta pesquisa se baseia, especifica que, para a implantação de novas HIS do Programa Minha Casa, Minha Vida, deve haver a combinação desses parâmetros, variando de acordo com o clima onde serão inseridas as edificações. Por isso, foram modelados e simulados os modelos obrigatório e otimizado para cada cidade, combinando os parâmetros que foram avaliados isoladamente.

A comparação entre os modelos obrigatório e otimizado com o modelo de referência revela que as alterações obrigatórias na envoltória exigidas pela portaria MCID nº 725/2023 já proporcionam ganhos significativos de desempenho térmico, especialmente para o clima de São Luís, onde todos os casos avaliados para o modelo obrigatório atingiram o nível superior de desempenho térmico. No entanto, o modelo otimizado apresenta resultados ainda mais expressivos, com reduções de até 85% na carga térmica e aumentos superiores a 57% no PHFT, como observado na UH da cobertura orientada a norte, em comparação ao modelo de referência. Nesses casos, a Tomáx caiu para menos de 32 °C e a demanda por carga térmica anual foi praticamente eliminada. Até mesmo nas situações em que se observam as menores reduções de carga térmica, esses valores são sempre maiores que 70%.

Em Curitiba, apesar de os ganhos absolutos serem mais reduzidos em comparação a São Luís, uma vez que o clima é mais ameno e os indicadores de desempenho do modelo de referência já são relativamente bons (com PHFT próximo de 90% em alguns casos), o modelo otimizado demonstrou desempenho superior em quase todos os casos, com uma redução de 46% na carga térmica total, redução de mais de 6 °C na Tomáx e aumento de 3,6% no PHFT para a UH da cobertura orientada a oeste, comparativamente com o modelo de referência. Ainda assim, em algumas situações, o modelo otimizado apresentou redução no PHFT em relação ao modelo obrigatório, o que pode ser justificado pela diminuição da Tomín, que é desfavorável em climas mais frios, mas que acontece em conjunto com a diminuição da Tomáx nesses casos.

A comparação entre os modelos obrigatório e otimizado evidencia o impacto do clima na melhora dos indicadores de desempenho térmico. São Luís, uma cidade de clima quente e baixa amplitude térmica, apresenta uma maior facilidade em elevar o desempenho térmico, apresentando maiores reduções de Tomáx e uma diminuição da carga térmica a valores inexpressivos, em alguns casos. Curitiba, com clima mais frio e alta amplitude térmica anual, já apresenta bons resultados para os indicadores de desempenho térmico no modelo de referência. Por esse motivo, torna-se mais difícil melhorar os indicadores elevando o nível de desempenho, uma vez que a redução de Tomáx e CgTT de resfriamento podem significar diminuição da Tomín e aumento da CgTT de aquecimento no inverno. Esse comportamento se traduz em uma baixa economia de energia, já que as cargas térmicas de aquecimento e resfriamento são compensadas entre si, reforçando que, em regiões de clima ameno,

estratégias de otimização devem equilibrar o resfriamento com a manutenção de temperaturas mínimas adequadas.

Por fim, conclui-se que a portaria do Ministério das Cidades nº 725/2023, nos requisitos que dizem respeito à envoltória das edificações, representa uma conquista em questões de projetos adaptados às diferentes realidades climáticas existentes no Brasil. Os modelos obrigatórios, testados para duas cidades do país, apresentaram melhoras consideráveis nos indicadores de desempenho térmico, elevando o nível em quase todos os casos avaliados. No entanto, as exigências ainda são passíveis de melhora, visto que pequenas alterações adicionais com custo bastante reduzido se transformam em economias de energia que reduzem significativamente o tempo de retorno do investimento, com modelos otimizados.

5.1 LIMITAÇÕES DA PESQUISA

Uma limitação deste estudo é a consideração de apenas duas zonas bioclimáticas brasileiras, o que restringe a generalização dos resultados. Seria relevante, em estudos futuros, avaliar o comportamento dos parâmetros simulados em outras realidades climáticas, ampliando a compreensão sobre a efetividade das estratégias adotadas para todo o país.

Dentre os modelos representativos de HIS presentes no Brasil, optou-se por avaliar apenas a tipologia geminada sobreposta, o que limita a aplicabilidade dos resultados apenas para esse caso.

As simulações assumem condições ideais de operação e ocupação, que seguem as exigências da NBR 15575, desconsiderando variações de comportamento dos usuários e interferências externas, o que pode influenciar o desempenho térmico real das edificações.

Os modelos simulados foram avaliados sob a ótica do desempenho térmico, sem considerar restrições orçamentárias, construtivas ou operacionais que podem influenciar sua implementação real.

As análises foram realizadas a nível de unidade habitacional, sem considerar a edificação por completo, ainda que, indiretamente, as trocas de calor entre toda a edificação reflitam na análise individual das UHs avaliadas.

A edificação foi considerada isolada no terreno, sem a influência do entorno construído ou da vegetação. A ausência dessa consideração pode impactar os

resultados, já que elementos do entorno podem alterar significativamente as condições de ventilação natural, sombreamento e, conseqüentemente, desempenho térmico.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para estudos futuros, recomenda-se a realização de medições climáticas em apartamentos com varanda, com o objetivo de comparar os resultados obtidos por simulação nas duas formas de modelagem da varanda e verificar qual delas se aproxima mais do comportamento real.

Sugere-se a simulação de modelos baseados não apenas nas especificações obrigatórias portaria MCID nº 725/2023, mas também nas especificações recomendáveis de projeto, comparando os resultados de acordo com os requisitos da NBR 15575.

Além disso, seria relevante testar a implantação de todos os requisitos obrigatórios estabelecidos pela portaria, não apenas os relacionados à envoltória da edificação, mas também os relacionados ao entorno, à infraestrutura urbana e à inserção paisagística, para uma avaliação mais realista.

Uma possibilidade para estudos futuros é a realização de simulações considerando apenas o uso da ventilação natural nas unidades habitacionais, sem o uso de sistemas ativos de climatização. Essa abordagem pode oferecer resultados mais condizentes com a realidade de habitações de interesse social, especialmente aquelas destinadas à faixa 1 do programa Minha Casa, Minha Vida, onde o uso de aparelhos de ar-condicionado é pouco comum.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Ranking da tarifa residencial**. Portal Relatórios Abertos – Luz na Tarifa. Disponível em: <<https://portalrelatorios.aneel.gov.br/luznatarifa/rankingtarifas>>. Acesso em: 15 jul. 2025.

AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE DEFINITION. AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS (ANSI/ASHRAE). **ASHRAE 169:2020**: Climatic Data for Building Design Standards.

AMOAKO-ATTAH, J.; B-JAHROMI, A. The Impact of Different Weather Files on London Detached Residential Building Performance—Deterministic, Uncertainty, and Sensitivity Analysis on CIBSE TM48 and CIBSE TM49 Future Weather Variables Using CIBSE TM52 as Overheating Criteria. **Sustainability**, [S.L.], v. 8, n. 11, p. 1194, 22 nov. 2016. MDPI AG. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/su8111194>. Acesso em 19 nov. 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE INCORPORADORAS IMOBILIÁRIAS (ABRAINC). Pesquisa da ABRAINC revela que 77% dos beneficiários do MCMV veem melhora na qualidade de vida após aquisição de imóvel. **ABRAINC**, São Paulo, 28 set. 2023. Disponível em: <https://www.abrainc.org.br/minha-casa-minha-vida/2023/09/28/pesquisa-da-abrainc-revela-que-77-dos-beneficiarios-do-mcmv-veem-melhora-na-qualidade-de-vida-apos-aquisicao-de-imovel->. Acesso em: 02 março 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) (2021a). **NBR 15575**: Edificações habitacionais - Desempenho. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) (2021b). **TR 15575-1-1:2021** - Edificações habitacionais - Desempenho. Parte 1-1: Base-padrão de arquivos climáticos para a avaliação do desempenho térmico por meio do procedimento de simulação computacional. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15220-3:2024**: Desempenho térmico de edificações. Parte 3: Zoneamento bioclimático por desempenho. Rio de Janeiro, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15220:2005**: Desempenho térmico de edificações. Rio de Janeiro, 2005.

ARAÚJO, A. C. H. **Absortância solar e o envelhecimento natural de telhas expostas ao tempo**. 2022. 208 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2022. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/102/102131/tde-06062022-143613/publico/DissCorrigidaAnaCarolinaHidalgoAraujo.pdf>

BARRETO, F.A.; DE FRANÇA, J. M. S.; MIRO, V. H.; SANTOS, A. **Pós pandemia, extrema pobreza caiu à metade no Brasil, e NE é 50% da redução**. Blog do IBRE – FGV IBRE. 24 de jun. de 2024. Disponível em: <https://blogdoibre.fgv.br/posts/pos->

pandemia-extrema-pobreza-cai-metade-no-brasil-e-ne-e-50-da-reducao. Acesso em 25 jan. 2024.

BAVARESCO, M. V.; CUCHIVAGUE, H. Y. O.; SCHINAZI, A.; GHISI, E. Aspectos impactantes no desempenho energético de habitações de interesse social brasileiras: revisão de literatura. **Ambiente Construído**. Porto Alegre, v. 21, n. 1, p. 263-292, jan./mar. 2021. ISSN 1678-8621 Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212021000100505>. Acesso em 25 jun. 2025.

BENDLIN, A. C. Programas habitacionais anteriores ao MCMV fizeram muito pouco para resolver o déficit habitacional. **Imobi Report**. 2020. Disponível em: <https://imobireport.com.br/programas-habitacionais-antecedentes-ao-mcmv-fizeram-muito-pouco-para-resolver-o-deficit-habitacional/>. Acesso em: 13 mai. 2024.

BHANDARI, M.; SHRESTHA, S.; NEW, J. Evaluation of weather data sets for building energy simulation. **Energy And Buildings**, [S.L.], v. 49, p. 109-118, jun. 2012. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.01.033>. Acesso em: 15 jun. 2024.

BOEHM, S.; SCHUMER, C. 10 conclusões do Relatório do IPCC sobre Mudanças Climáticas de 2023. **WRI Brasil**. Porto Alegre, 24 mar. 2023. Disponível em: <https://www.wribrasil.org.br/noticias/10-conclusoes-do-relatorio-do-ipcc-sobre-mudancas-climaticas-de-2023>. Acesso em: 05 ago. 2024.

BÖHM, T. Minha Casa Minha Vida não reduziu déficit habitacional, afirma estudo: Demanda por moradias continua a mesma de 2009, quando o programa foi lançado. Especialistas defendem investir em imóveis já existentes. **Jornal do Senado**, Brasília, 2018. Disponível em: https://www2.senado.leg.br/bdsf/bitstream/handle/id/538499/Cidadania_622.pdf?sequence=1. Acesso em 02 março 2024.

BOLAFFI, G. A casa das ilusões perdidas. Brasiliense, **Cadernos CEBRAP**, São Paulo, 1977, 64 p. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=218509>. Acesso em: 02 mar. 2024.

BRACHT, M. K; COSTA, V. A. C; MELO, A. P; LAMBERTS, R. Série histórica versus ano meteorológico típico: Desempenho térmico de modelo unifamiliar com três alternativas de envoltória em Brasília. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 19., 2022, Canela. **Anais [...]**. Porto Alegre: ANTAC, 2022. p. 1–10. DOI: 10.46421/entac.v19i1.1992. Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/entac/article/view/1992>. Acesso em: 15 jun. 2024.

BRANDÃO, H. C.L. A varanda na cidade maravilhosa: Uma questão de identidade cultural ou de regulamentação. **Revista Vitruvius: Arquitextos**, São Paulo, ano 13, n. 147.01, 13 ago. 2012. Disponível em: <https://vitruvius.com.br/revistas/read/arquitextos/13.147/4457>. Acesso em: 02 ago. 2024.

BRANDAO, H. C. L.; MARTINS, A. M. M. Varandas nas moradias brasileiras: do período de colonização a meados do século XX. **Revista tempo de conquista**, v. 1, p. 01-20, 2007. Disponível em: <https://revistatempodeconquista.com.br/documents/RTC1/HELENALACE1.pdf>. Acesso em: 05 ago. 2024.

BRASIL. Ministério das Cidades/Secretaria de Assuntos Estratégicos da Presidência da República. Pesquisa de satisfação dos beneficiários do Programa Minha Casa Minha Vida. **Ministério das Cidades**, Brasília, DF, 2014. Disponível em: <https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/3298/1/Pesquisa%20de%20satisfa%20c3%a7%c3%a3o%20dos%20benefici%20rios%20do%20Programa%20Minha%20Casa%20Minha%20Vida.pdf>. Acesso em: 01 mar. 2024.

BRASIL (2022a). Conselho Federal de Psicologia. Catálogo de Práticas em Psicologia Ambiental. **Conselho Federal de Psicologia**, Brasília, 2022, 274 p. Disponível em: https://site.cfp.org.br/wp-content/uploads/2022/11/catalogo_praticas_psi_ambiental_web-2.pdf. Acesso em: 02 ago. 2024.

BRASIL (2022b). Portaria nº 309, de 24 de junho de 2022. Aprova o texto da Instrução Normativa de Requisitos (IN-R) e da Nota Técnica 02 – Critérios para classificação de nível de eficiência energética para edificações residenciais. **Programa Brasileiro de Etiquetagem PBE Edifica**. Disponível em: https://pbeedifica.com.br/sites/default/files/Port_309_2022_INIR_NT02.pdf. Acesso em: 31 jul. 2025.

BRASIL. (2023a) Agência Gov. Governo Federal entregará 1.651 novas unidades do MCMV. **Agência Gov**, 4 out. 2023. Disponível em: <https://agenciagov.ebc.com.br/noticias/202310/governo-federal-entregara-1-651-novas-unidades-do-mcmv>. Acesso em: 25 jul. 2025.

BRASIL. (2023b) Ministério das Cidades. Serviço: Conheça o programa Minha Casa, Minha Vida. Brasília, DF. **Ministério das Cidades**, 13 set. 2023. Disponível em: <https://agenciagov.ebc.com.br/noticias/202309/conheca-o-programa-minha-casa-minha-vida>. Acesso em: 20 mai. 2024.

BRASIL. (2023c) Ministério das Cidades. **Portaria MCID nº 725 de 15 de junho de 2023**. Brasília, DF: Diário Oficial da União, 15 jun. 2023. Disponível em: https://www.gov.br/cidades/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/habitacao/arquivos-1/20240405_Portaria_MCID_725_Especificacoes_MCMV_FAREFDS_COMPILADA.pdf Acesso em: 19 fev. 2024.

BRASIL. Secretaria de Comunicação Social. MCMV fecha 2024 com 1,26 milhão de unidades contratadas. **Secretaria de Comunicação Social**, Brasília, 5 jan. 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/secom/pt-br/assuntos/noticias/2025/janeiro/mcmv-fecha-2024-com-1-26-milhao-de-unidades-contratadas>. Acesso em: 23 jul. 2025.

BRE, Facundo; GIMENEZ, Juan M.. A cloud-based platform to predict wind pressure coefficients on buildings. **Building Simulation**, [S.L.], v. 15, n. 8, p. 1507-1525, 22 jan.

2022. Springer Science and Business Media LLC. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s12273-021-0881-9>. Acesso em: 10 jan. 2025.

BUONOCORE, C., CASTRO, L., DE VECCHI, R., LAMBERTS, R.; GÜTHS, S. Natural ventilation in Brazilian homes: depicting perceptions, usage patterns and motivations in a questionnaire survey. **Building Research & Information**, v. 53(1–2), p. 40–55. 16 jun. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/09613218.2024.2363178>. Acesso em: 05 mai. 2025.

CAIXA ECONÔMICA FEDERAL; INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **SINAPI – Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil**. Disponível em: <https://www.caixa.gov.br>. Acesso em: 15 jul. 2025.

CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO (CBIC). Em 10 anos, 'Minha Casa, Vida Vida' impacta déficit e promove desenvolvimento social. Brasília, 22 mar. 2019. Disponível em: <https://cbic.org.br/em-10-anos-minha-casa-vida-vida-impacta-deficit-e-promove-desenvolvimento-social/>. Acesso em: 13 mai. 2024.

CANDIDO, C. D. **Ventilação natural e conforto térmico em climas quentes**. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, dez. 2006, 49 p. Disponível em: https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/publicacoes/relatorios_pesquisa/Topicos%20Avan%C3%83%C2%A7ados%20em%20Conforto%20T%C3%83%C2%A9rmico%20-%20Christina.pdf. Acesso em: 10 ago. 2024.

CÂNDIDO, C. D.; DORNELLES, K. A.; LUKIANTCHUKI, M. A. Impacto da absorção no conforto térmico em três zonas bioclimáticas. **PARC: Pesquisa em Arquitetura e Construção**, Campinas, SP, v. 14, n. 00, p. e023003, 2023. DOI: 10.20396/parc.v14i00.8668202. Disponível em: <https://periodicos.sbu.unicamp.br/ojs/index.php/parc/article/view/8668202>. Acesso em: 30 jun. 2025.

CASTANO, H.F. M. **Impacto de dispositivos de sombreamento externos e muro na ventilação natural e no desempenho térmico de uma habitação de interesse social térrea**. 2017. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) - Instituto de Arquitetura e Urbanismo de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/102/102131/tde-04092017-125132/publico/DissCorrigidaHectorFabian.pdf>. Acesso em: 15 jul. 2024.

CHEUNG, C.K.; FULLER, R.J.; LUTHER, M.B.. Energy-efficient envelope design for high-rise apartments. **Energy And Buildings**, [S.L.], v. 37, n. 1, p. 37-48, jan. 2005. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.05.002>. Acesso em: 26 abr. 2025

CHVATAL, K. M. S. Avaliação do procedimento simplificado da NBR 15575 para determinação do nível de desempenho térmico de habitações. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 14, n. 4, p. 119-134, out./dez. 2014. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ac/a/KtKYFm865hxXwPvpfMcBncH/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 08 dez. 2024.

COELHO, T. da C. C.; GOMES, C. E. M.; DORNELLES, K. A. Desempenho térmico e absorptância solar de telhas de fibrocimento sem amianto submetidas a diferentes processos de envelhecimento natural. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 17, n. 1, p. 147-161, jan./mar. 2017. ISSN 1678-8621 Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212017000100129>. Acesso em: 30 jun. 2025.

CRAWLEY, D. B.; LAWRIE, L. K.; PEDERSEN, C. O.; WINKELMANN, F. C.; WITTER, M. J.; STRAND, R. K.; LIESEN, R. J.; BUHL, W. F.; HUANG, Y. J.; HENNINGER R. H.; GLAZER, J.; FISHER, D. E.; SHIREY, D. B.; GRIFFITH, B. T.; ELLIS, P. G.; GU, L. EnergyPlus: an update. **Assistant Secretary for Energy Efficiency and Renewable Energy**, Office of the Building Technologies Program of the US Department of Energy. 2004. Disponível em: <https://simulationresearch.lbl.gov/dirpubs/55518.pdf>. Acesso em: 23 mai. 2024.

CRAWLEY, D. B.; LAWRIE, L. K. (s.d.) Climate.OneBuilding.Org. **Repository of free climate data for building performance simulation**. Disponível em: <https://climate.onebuilding.org/>. Acesso em: 24 maio 2022.

CP SIMULATOR. Prediction of wind pressure coefficients on buildings. Disponível em: <https://cpsimulator.cimec.org.ar/>, 2023. Acesso em: 10 jan. 2025.

DANELON, M. R. **Habitação de interesse social com materialidade em painéis monolíticos de poliestireno expandido (EPS) para a cidade de Santa Cruz do Rio Pardo – SP**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Arquitetura e Urbanismo) - Centro Universitário Sagrado Coração – UNISAGRADO, Bauru, 2023. Disponível em: <https://repositorio.unisagrado.edu.br/jspui/handle/handle/4045>. Acesso em: 01 ago. 2025.

DE MARTINS, R. M.; LIMA, C. M. Por que o Programa Minha Casa Minha Vida não resolveu o déficit habitacional?: reflexões sobre a questão da habitação no Brasil. In: XVI Encontro Nacional de Pesquisadores em Serviço Social, 2018, Vitória. **Anais [...]** ABEPSS, ENPESS 2018. Disponível em: <https://periodicos.ufes.br/abepss/article/view/23213>. Acesso em: 15 fev. 2024

DE SOUZA, L. P. **Avaliação do potencial de inserção de simulações termo-energéticas em fases iniciais de projeto: proposta de método de ensino e estudo de caso**. 2020. 161 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2020. Disponível em: https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/publicacoes/dissertacoes/DISSERTA%C3%87%C3%83O_Larissa%20Pereira%20de%20Souza.pdf. Acesso em: 29 ago. 2024.

DE SOUSA, D. L. P. **Análise do Desempenho Térmico de um Edifício Utilizando o Software EnergyPlus**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciência e Tecnologia) - Universidade Federal do Pará. Ananindeua, 2022. Disponível em: <https://bdm.ufpa.br:8443/jspui/handle/prefix/4107>. Acesso em: 12 ago. 2024.

DE SOUZA, L.; COSTA, V. A. C.; MELO, A. P.; LAMBERTS, R. O impacto do uso de isolamento na cobertura de acordo com a NBR 15575. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 19., 2022. **Anais [...]**. Porto Alegre: ANTAC, 2022. p. 1–10. DOI: 10.46421/entac.v19i1.2161. Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/entac/article/view/2161>. Acesso em: 30 jul. 2025.

DORNELLES, K. A., CARAM, R. M., & SICHIERI, E. P. Absortância solar e desempenho térmico de tintas frias para uso no envelope construtivo. **Paranoá**, 2014, 7(12). Disponível em: <https://doi.org/10.18830/issn.1679-0944.n12.2014.12212>. Acesso em 15 jun. 2025

DUARTE, C. C.; CORTIÇOS, N. D.; STEFAŃSKA, A.; STEFAŃSKA, A. Home Balconies during the COVID-19 Pandemic: future architect's preferences in Lisbon and Warsaw. **Applied Sciences**, [S.L.], v. 13, n. 1, p. 298, 26 dez. 2022. MDPI AG. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/app13010298>. Acesso em: 08 mai. 2024.

EL-DEEB, K. Energy performance assessment of venetian blinds in south-oriented residential spaces in hot arid desert climates. **Construction Innovation**, [S.L.], v. 24, n. 6, p. 1460-1482, 11 maio 2023. Emerald. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1108/ci-03-2022-0052>. Acesso em: 25 jun. 2025.

ELI, L. G. **O impacto do padrão de uso no desempenho térmico de edificações unifamiliares no Brasil**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/216396>. Acesso em: 29 ago. 2024.

ELI, L. G.; KRELLING, A. F.; MENDES, L. S.; MACHADO, R. M. e S.; MAZZAFERRO, L.; MELO, A. P.; LAMBERTS, R. Manual de simulação computacional de edifícios com o uso do objeto Ground Domain no programa EnergyPlus – versão 9.0.1. Florianópolis: Laboratório de Eficiência Energética em Edificações – LabEEE/UFSC, out. 2019. Disponível em: https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/publicacoes/relatorios_pesquisa/Manual_GroundDomain_E%2Bversao9.0.pdf. Acesso em: 08 jan. 2024.

ELI, L. G.; KRELLING, A. F.; OLINGER, M. S.; MELO, A. P.; LAMBERTS, R. Thermal performance of residential building with mixed-mode and passive cooling strategies: the Brazilian context. **Energy And Buildings**, [S.L.], v. 244, p. 111047, ago. 2021. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111047>. Acesso em: 02 abr. 2024.

ELI, L. G.; MELO, A. P.; LAMBERTS, R. How to improve the thermal performance of buildings with one simulation run? The heat exchange index applied to hot climates. **Building And Environment**, [S.L.], v. 258, p. 111606, jun. 2024. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111606>. Acesso em: 15 jul. 2025.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Clima**. Centro Nacional de Pesquisa de Florestas (CNPq), [s.d.]. Disponível em: <https://www.cnpq.embrapa.br/pesquisa/efb/clima.htm>. Acesso em: 03 ago. 2025.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional 2024: Ano base 2023**. Rio de Janeiro, 2024. 274 p. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2024>. Acesso em: 07 ago. 2024.

FERREIRA, C. C.; AMARAL, D. O.; ASSIS, E. S. Análise do impacto do coeficiente de pressão na simulação de ventilação natural em ambientes internos. **E&S Engineering and Science**, [S. l.], v. 12, n. 2, p. 1–16, 2023. DOI: 10.18607/ES20231215252. Disponível em: <https://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/eng/article/view/15252>. Acesso em: 30 jul. 2025

FERREIRA, C. C.; DE SOUZA, H. A. Análise do impacto da geometria de edificações residenciais no desempenho térmico. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 15., 2019. **Anais [...]**. [S. l.], 2019. p. 1610–1618. Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/encac/article/view/4167>. Acesso em: 19 set. 2024.

FJP - Fundação João Pinheiro. Centro de Estatística e Informações. Déficit habitacional no Brasil 2009. **Fundação João Pinheiro**, Centro de Estatística e Informações. Belo Horizonte, MG. Set. 2012. 112 p. Disponível em: <http://www.bibliotecadigital.mg.gov.br/consulta/consultaDetalheDocumento.php?iCodDocumento=76700>. Acesso em: 10 abr. 2024.

FONSECA, M. S.; TOMELERI, G. O.; NUNES, G. H.; GIGLIO, T. G. F. Implicações das fachadas de vidro no desempenho térmico de ambientes residenciais: Análise baseada nos novos critérios da ABNT NBR 15575. ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 16., 2021. **Anais [...]**. [S. l.], 2021. p. 988–997. Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/encac/article/view/4497>. Acesso em: 10 mai. 2024.

GIMENEZ, Juan M.; BRE, Facundo. An enhanced k- ω : ω SST model to predict airflows around isolated and urban buildings. **Building And Environment**, [S.L.], v. 237, p. 110321, jun. 2023. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110321>. Acesso em: 10 jan. 2025.

GUIMARÃES, R. P.; CARVALHO, M. C. R.; SANTOS, F. A. The influence of ceiling height in thermal comfort of buildings: a case study in Belo Horizonte, Brazil. **Engineering**, 2013. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/296771298_The_influence_of_ceiling_height_in_thermal_comfort_of_buildings_A_case_study_in_belo_horizonte_brazil. Acesso em 24 jul. 2025.

IBPSA-USA. **Ask a modeler: What is TMYx and how does it differ from TMY3 weather data?** IBPSA-USA, 2021. Disponível em: <https://www.ibpsa.us/ask-a>

modeler/ask-a-modeler-what-is-tmyx-and-how-does-it-differ-from-tmy3-weather-data/. Acesso em: 31 jul. 2025.

IBPSA-USA. International Building Performance Simulation Association. **Building Energy Software Tools – Best Directory**. IBPSA-USA, 2023. United States of America. Disponível em: <https://www.buildingenergysoftwaretools.com/> Acesso em: 26 abr. 2024.

IBPSA-BRASIL. **International Building Performance Simulation Association**. Brasil. IBPSA-BRASIL, 2023 Disponível em: <http://www.ibpsa.org.br/pt-br>. Acesso em: 26 abr. 2024.

INMETRO (2025a). **Manual INI-C: definições – maio/2025**. Programa Brasileiro de Etiquetagem PBE Edifica. Brasília, 2025. Disponível em: https://pbeedifica.com.br/sites/default/files/manuais/Manual%20INI-C_Defini%C3%A7%C3%B5es_maio25.pdf. Acesso em: 23 jul. 2025.

INMETRO (2025b). **Manual INI-R: definições – maio/2025**. Programa Brasileiro de Etiquetagem PBE Edifica. Brasília, 2025. Disponível em: https://pbeedifica.com.br/sites/default/files/manuais/Manual%20INI-R_Defini%C3%A7%C3%B5es_maio25.pdf. Acesso em: 23 jul. 2025.

IZADYAR, N.; MILLER, W.; RISMANCHI, B.; GARCIA-HANSEN, V. A numerical investigation of balcony geometry impact on single-sided natural ventilation and thermal comfort. **Building And Environment**, [S.L.], v. 177, p. 106847, jun. 2020. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106847>. Acesso em: 10 mai. 2025.

JEYALAXMI, J. Study of Indoor Thermal Performance Due to Varying Ceiling Heights in a Hot-Humid Climate. In: **Building Thermal Performance and Sustainability**, Lecture Notes in Civil Engineering, Springer Singapore, 2023. p. 115–127. DOI: 10.1007/978-981-19-9139-4_8. Acesso em 24 jul. 2025.

JOHRA, H. Thermophysical Properties of Building Materials: Lecture Notes. 2019. Department of Civil Engineering, Aalborg University. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/786355133/Thermophysical-Properties-of-Building-Materials>. Acesso em 24 jul. 2025.

KAMIMURA, A. M. **O impacto das modificações pós-ocupação no desempenho térmico de HIS: estudo de caso em Uberlândia-MG**. 2022. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2022. Disponível em: https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/publicacoes/dissertacoes/DISSERTACAO_Kamimura_0.pdf. Acesso em: 15 ago. 2024.

KARIMI, M.; CHIKAMOTO, T.; LEE, M. Optimizing Passive Design Elements to Improve Building Energy Efficiency in Kabul, Afghanistan. **Journal Of Building Construction And Planning Research**, [S.L.], v. 13, n. 01, p. 1-23, 2025. Scientific Research Publishing, Inc.. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.4236/jbcpr.2025.131001>. Acesso em: 10 jan. 2025.

KIM, G.; KIM, J. T. Healthy-daylighting design for the living environment in apartments in Korea. **Building And Environment**, [S.L.], v. 45, n. 2, p. 287-294, fev. 2010. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.07.018>. Acesso em: 29 abr. 2025.

KIM, D; PARK, C. Difficulties and limitations in performance simulation of a double skin façade with EnergyPlus. **Energy And Buildings**, [S.L.], v. 43, n. 12, p. 3635-3645, dez. 2011. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.09.038>. Acesso em 23 julho 2024. Acesso em: 19 mar. 2024.

KRAUSE, C.; NADALIN, V. G.; PEREIRA, R. H. M.; SIMÕES, P. R. Programa Minha Casa Minha Vida: avaliações de aderência ao déficit habitacional e de acesso a oportunidades urbanas. Rio de Janeiro: **Ipea**, junho, 2023. 62 p. (Texto para Discussão, 28XX). DOI: <http://dx.doi.org/10.38116/td2888-port>. Acesso em: 19 mai. 2024.

KRELLING, A. F.; ELI, L. G.; OLINGER, M. S.; VEIGA, R. K. S.; MELO, A. P.; LAMBERTS, R. Proposta de método de avaliação do desempenho térmico de residências: NBR 15575. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 18., 2020. **Anais [...]**. Porto Alegre: ANTAC, 2020. p. 1–8. DOI: 10.46421/entac.v18i.847. Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/entac/article/view/847>. Acesso em: 20 fev. 2024.

KRELLING, A.F.; ELI, L.G.; OLINGER, M.s.; MACHADO, R.M.e.s.; MELO, A.P.; LAMBERTS, R.. A thermal performance standard for residential buildings in warm climates: lessons learned in brazil. **Energy And Buildings**, [S.L.], v. 281, p. 112770, fev. 2023. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112770>. Acesso em 23 fev. 2024.

LabEEE. VEIGA, C.; BAGIO, J.; GERALDI, M.; TRIANA, M. A.; MELO, A. P.; LAMBERTS, R. (2024a). Reference Models for Brazilian Social Housing Pre-2023. Zenodo. Disponível em: <https://zenodo.org/records/12209191>. Acesso em: 20 jul. 2024.

LabEEE. GERALDI, M. S.; TRIANA, M. A.; VEIGA, C. Z. M.; BAGIO, J.; PIRES, J. M.; ELI, L. G.; GAPSKI, N. H. P.; BUONOCORE, C. O.; DE VECCHI, R. MELO, A. P. (2024b). HB-RT-10-01: avaliação do impacto dos requisitos obrigatórios da Portaria 725 no desempenho térmico de habitações de interesse social. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2024. Disponível em: <https://hablabeee.ufsc.br/static/resultados/relatorios/HB-RT-10-01.pdf>. Acesso em: 5 jun. 2025.

LAMBERTS, R.; MELO, A. P.; TRIANA, M. A.; MACHADO, R. M. e S.; KAMIMURA, A. M.; BRACHT, M. K. (2021a) **Análise de custo/benefício de parâmetros de eficiência energética em Habitações de Interesse Social: Produto 5**. Florianópolis: Laboratório de Eficiência Energética em Edificações – LabEEE/UFSC; Secretaria Nacional de Habitação, Ministério do Desenvolvimento Regional; Deutsche

Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ GmbH), jan. 2021. Disponível em: <https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/documents/PRODUTO5_v2.pdf>. Acesso em: 21 jul. 2025.

LAMBERTS, R.; MELO, A. P.; TRIANA, M. A.; MACHADO, R. M. e S.; KAMIMURA, A. M.; BRACHT, M. K. (2021b) **Análise de custo/benefício de parâmetros de eficiência energética em HIS". Produto 4 – Estudo de custo de implementação de melhorias**. Florianópolis: Laboratório de Eficiência Energética em Edificações – LabEEE/UFSC; Secretaria Nacional de Habitação, Ministério do Desenvolvimento Regional; Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ GmbH), jan. 2021. Disponível em: < <https://labeee.ufsc.br/node/98>>. Acesso em: 21 jul. 2025.

LAMBERTS, R.; MELO, A. P.; GERALDI, M. S.; TRIANA, M. A.; RAMOS, G.; DE VECCHI, R.; GAPSKI, N.; VAZ, I. C. M.; VIEGA, C. Z. M.; BAGIO, J.; COELHO, N. **Revisão de literatura sobre eficiência energética e conforto ambiental nas Habitações de Interesse Social no Brasil. Versão 1.1**. Relatório do Projeto hab.labeee. 2023. Disponível em: <https://hablabeee.ufsc.br/ferramentas/revisao>. Acesso em: 10 set. 2024.

LARA, V. Onda de calor: demanda por ar-condicionado dispara. **iG Economia**, 20 fev. 2025. Disponível em: <https://economia.ig.com.br/2025-02-20/demanda-por-ar-condicionado-dispara.html>. Acesso em: 29 jul. 2025.

LEITZKE, R. K.; BELTRAME, C. M.; DE FREITAS, J. R.; SEIXAS, J. N.; MACIEL, T. dos S.; DA CUNHA, E. G.; RHEINGANTZ, P. A. Optimization of the Traditional Method for Creating a Weather Simulation File: the Pelotas.epw case. **Journal Of Civil Engineering And Architecture**, [S.L.], v. 12, n. 10, p. 741-756, 28 out. 2018. David Publishing Company. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.17265/1934-7359/2018.10.006>. Acesso em: 30 jul. 2025.

LEMO, C. A. C. Transformações do espaço habitacional ocorridos na arquitetura brasileira do século XIX. **Anais do Museu Paulista Nova Série**. n. 1, 1993, p. 95-306. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/anaismp/a/6n5vm4pBXFFYS6GG5K5tnBN/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 06 ago. 2004.

LI, X.; WU, Y. A review of complex window-glazing systems for building energy saving and daylight comfort: glazing technologies and their building performance prediction. **Journal Of Building Physics**, [S.L.], v. 48, n. 4, p. 496-540, 13 set. 2024. SAGE Publications. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1177/17442591241269182>. Acesso em: 30 jun. 2025.

LI, C.; SILVA, V. E. da; MADURO, R.; MEGRÈ, M.; GONÇALVES, J. C. de S. I.; SANTOS, E. M. dos; MOUETTE, D. Thermal Comfort Analysis Using System Dynamics Modeling - A Sustainable Scenario Proposition for Low-Income Housing in Brazil. **Sustainability**, [S.L.], v. 15, n. 7, p. 5831, 28 mar. 2023. MDPI AG. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/su15075831>. Acesso em 01 ago. 2025.

LOCHE, I.; BRE, F.; GIMENEZ, J. M.; LOONEN, R.; NEVES, L. O. Balcony design to improve natural ventilation and energy performance in high-rise mixed-mode office

buildings. **Building And Environment**, [S.L.], v. 258, p. 111636, jun. 2024. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111636>. Acesso em: 05 set. 2024.

MACÁRIO, C. Movimentos políticos e sociais foram assistidos de camarote nas ruas da cidade. **NDmais**. Florianópolis, 20. Jul. 2013, Disponível em: <https://ndmais.com.br/arquitetura-e-decoracao/as-sacadas-na-arquitetura-e-na-historia-de-florianopolis/>. Acesso em: 05 ago. 2024.

MARTINS, L. H. A. **A Influência do sombreamento e da absorvência da envoltória no desempenho térmico e energético de edificações residenciais multipavimentos na cidade de João Pessoa-PB**. 2013. Dissertação de Mestrado – Mestrado em Engenharia Urbana - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2013. Disponível em: https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/tede/5515?locale=pt_BR. Acesso em: 02 jul. 2025.

MAZZAFERRO, L.; MELO, A. P.; LAMBERTS, R. **Manual de simulação computacional de edifícios com o uso do objeto Ground Domain no programa EnergyPlus**. Florianópolis: Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, UFSC, nov. 2015. Disponível em: https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/disciplinas/Manual_Ground_Domain.pdf. Acesso em: 07 out. 2023.

MELO, T. da C. **Eficiência Energética e Conforto Térmico em Edificações em Recife Utilizando o EnergyPlus**. 2018. 77 f. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Civil) - Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/30969?locale=en>. Acesso em: 14 mai. 2024.

MENDES, N.; WESTPHAL, F. S.; LAMBERTS, R.; DA CUNHA NETO, J. A. B. Uso de instrumentos computacionais para análise do desempenho térmico e energético de edificações no Brasil. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 5, n. 4, p. 47-68, 2005. Disponível em: <https://seer.ufrgs.br/index.php/ambienteconstruido/article/view/3657/2013>. Acesso em: 18 mai. 2024.

MOAKO-ATTAH, J.; B-JAHROMI, A. The Impact of Different Weather Files on London Detached Residential Building Performance—Deterministic, Uncertainty, and Sensitivity Analysis on CIBSE TM48 and CIBSE TM49 Future Weather Variables Using CIBSE TM52 as Overheating Criteria. **Sustainability**, [S.L.], v. 8, n. 11, p. 1194, 22 nov. 2016. MDPI AG. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/su8111194>. Acesso em: 18 mar. 2024.

MOREIRA, M.; CELIS, A.M.; RODRIGUES, A.K. Análise do desempenho térmico a partir das NBRs 15220 e 15575: O caso da Company Town de Monte Dourado no estado do Pará. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 19., 2022, Canela. **Anais [...]**. Porto Alegre: ANTAC, 2022. p. 1–14. DOI: 10.46421/entac.v19i1.2228. Disponível em:

<https://eventos.antac.org.br/index.php/entac/article/view/2228>. Acesso em: 20 jul. 2024.

NICO-RODRIGUES, E. A.; DE ALVAREZ, C. E.; SANTO, A. D.; PIDERIT, M. B. Quando a janela define a condição de desempenho térmico em ambientes ventilados naturalmente: caso específico das edificações multifamiliares em Vitória, ES. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 15, n. 2, p. 7-23, abr./jun. 2015. ISSN 1678-8621 Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212015000200011>. Acesso em: 16 jun. 2025

ONU – Organização das Nações Unidas. Causas e Efeitos das Mudanças Climáticas. Disponível em: <https://www.un.org/pt/climatechange/science/causes-effects-climate-change#:~:text=Temperaturas%20mais%20altas,quente%20do%20que%20a%20ant%20erior>. Acesso em: 14 jul. 2024.

PESSOA, J. L. N.; GHISI, E.; LAMBERTS, R. Estado da arte em eficiência energética: iluminação e envoltória. Relatório Interno 07/2013, **Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações** (CB3E/UFSC), Florianópolis, jul. 2013. Disponível em: https://cb3e.ufsc.br/sites/default/files/EstadoArtelluminacaoEnvoltoria_31072013%282%29.pdf. Acesso em: 10 abr. 2024.

PIEROZAN, E.; SCOLARO, T. P.; WATZKO, E. S.; GHISI, E. Influência do padrão de uso e ocupação de habitações multifamiliares no consumo energético da edificação. **Ambiente Construído**, [S.L.], v. 23, n. 4, p. 43-61, dez. 2023. Fap UNIFESP (SciELO). Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212023000400690>. Acesso em: 28 mai. 2024.

PRATES, Karina. **Apartamento tem sacada no quarto?** Imóvel Guide, fórum Imóvel Guide, discussão “Apartamento tem sacada no quarto?”, resposta principal de Beth & Fernando Associados, publicado há 3 anos, disponível em: <https://www.imovelguide.com.br/forum/discussao/varanda/48358>. Acesso em: 29 jul. 2025

RIBEIRO, C.; RAMOS, N. M. M.; FLORES-COLEN, I. A Review of Balcony Impacts on the Indoor Environmental Quality of Dwellings. **Sustainability**, [S.L.], v. 12, n. 16, p. 6453, 11 ago. 2020. MDPI AG. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/su12166453>. Acesso em: 14 mai. 2024.

RORIZ, V. F.; CARAM, R. M.; RORIZ, M. Absortâncias e emitâncias efetivas de superfícies: um método para estimá-las, um modelo experimental e exemplos de suas importâncias. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 12, n. 2, p. 7–22, abr./jun. 2012. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ac/a/JDrkfk8JfT59X4jCTQqJkG/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 30 set. 2025

RUBIN, G. R.; BOLFE, S. A. O DESENVOLVIMENTO DA HABITAÇÃO SOCIAL NO BRASIL. **Ciência e Natura**, [S.L.], v. 36, n. 2, p. 201-213, 14 mai. 2014. Universidade Federal de Santa Maria. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5902/2179460x11637>. Acesso em 20 mai. 2024.

SCHAEGLER, L. **Simulação Computacional de uma Residência Visando a Análise do Consumo Energético**. 2014, 49 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Faculdade Horizontina, Horizontina, 2014. Disponível em: http://www.fahor.edu.br/images/Documentos/Biblioteca/TFCs/Eng_Mecanica/2014/Luciano_Schaepler.pdf. Acesso em: 19 abr. 2024.

SCHAEFER, A.; SILVA, A. S.; ALMEIDA, L. S. S.; BALVEDI, B.; GHISI, E. Influência da absorção solar no desempenho térmico de habitações populares. **Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**, [S.L.], v. 1, p. 578-587, 11 nov. 2014. Marketing Aumentado. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.17012/entac2014.359>. Acesso em: 10 mai. 2025.

SHELLER, C.; MELO, A. P.; SORGATO, M.; LAMBERTS, R. Análise de arquivos climáticos para a simulação do desempenho energético de edificações. **Laboratório de Eficiência Energética**: UFSC. Florianópolis, 2015. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Camila-Scheller/publication/305902679_ANALISE_DE_ARQUIVOS_CLIMATICOS_PARA_A_SIMULACAO_DO_DESEMPENHO_ENERGETICO_DE_EDIFICACOES/links/57a4a48508aefe6167aee22d/ANALISE-DE-ARQUIVOS-CLIMATICOS-PARA-A-SIMULACAO-DO-DESEMPENHO-ENERGETICO-DE-EDIFICACOES.pdf. Acesso em: 20 jun. 2024.

SILVA, A. S.; SORGATO, M. J.; MAZZAFERRO, L.; MELO, A. P.; GHISI, E. Incerteza do método de simulação da NBR 15575- 1 para a avaliação do desempenho térmico de habitações. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 14, n. 4, p. 103-117, out./dez. 2014. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ac/a/kPYFWbBRkLfz9CKGZDHySQF/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 12 set. 2024.

SILVEIRA, R.; MARINOSKI, D.L.; LAMBERTS, R. Avaliação da absorção à radiação solar e temperatura superficial de telhas de fibrocimento utilizadas nas coberturas de edificações do campus da UFSC. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO (ENTAC), 14., 2012, Juiz de Fora. **Anais [...]** Juiz de Fora: ENTAC, 2012.

SORGATO, M. J. **Desempenho Térmico de Edificações Residenciais Unifamiliares Ventiladas Naturalmente**. 2009. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Civil) - Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009. Disponível em: https://labeeee.ufsc.br/sites/default/files/publicacoes/dissertacoes/DISSERTACAO_Marcio_Sorgato.pdf. Acesso em: 19 fev. 2024.

SORGATO, M.J.; MELO, A.P.; LAMBERTS, R. The effect of window opening ventilation control on residential building energy consumption. **Energy And Buildings**, [S.L.], v. 133, p. 1-13, dez. 2016. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.09.059>. Acesso em: 22 ago. 2024.

TAN, Y.; PENG, J.; CURCIJA, D. C.; LI, N.; WANG, T.; HART, R.; JONSSON, J. Parametric Study of the Impact of Venetian Blinds on Air-Conditioning Energy-Saving

Potential for Residential Buildings. **Environmental Science And Engineering**, [S.L.], p. 9-17, 2020. Springer Singapore. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1007/978-981-13-9528-4_2. Acesso em: 13 jun. 2025

TOROXEL, J. L.; SILVA, S. M.; FERNANDES, J. Contribution of Glazed Balconies as a Passive Heating System in Contemporary Buildings in Northern Portugal. **Sustainability**, [S.L.], v. 16, n. 13, p. 5658, 2 jul. 2024. MDPI AG. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/su16135658>. Acesso em: 20 ago. 2024.

TRIANA, M. A. **Abordagem integrada no ciclo de vida de habitação de interesse social considerando mudanças climáticas**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016. Colaboração: CB3E/UFSC. Disponível em: <https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/publicacoes/teses/TESE%20MARIA%20AND%20TRIANA.pdf>. Acesso em: 04 ago. 2023.

TRIANA, M. A.; LAMBERTS, R.; SASSI, P. Characterisation of representative Building typologies for social housing projects in Brazil and its energy performance. **Energy Policy**, [S.L.], v. 87, p. 524-541, dez. 2015. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2015.08.041>. Acesso em: 12 abr. 2024.

TRIANA, M. A.; LAMBERTS, R.; MELO, A. P.; MARCHIORI, F. Custo e benefícios no ciclo de vida de habitações multifamiliares de interesse social energeticamente eficientes. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 19., 2022, Canela. **Anais[...]** Porto Alegre: ANTAC, 2022. p. 1-14. Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/entac/article/view/1981/1791>. Acesso em 15 jul. 2025.

TRINDADE, S. C.; PEDRINI, A.; DUARTE, R. N. C. Métodos de aplicação da simulação computacional em edifícios naturalmente ventilados no clima quente e úmido. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 10, n. 4, p. 37-58, 2010. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ac/a/JKX7vpVB8HBjXL5CFPDxfvx/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 18 mai. 2024.

U. S. Department of Energy. National Renewable Energy Laboratory (NREL). EnergyPlus. Input-Output Reference. Versão 22.1.0. [S.l.: s.n.], 29 mar. 2022. (EnergyPlus™ Version 22.1.0 Documentation). Disponível em: https://energyplus.net/assets/nrel_custom/pdfs/pdfs_v22.1.0/InputOutputReference.pdf. Acesso em: 10 jul. 2025.

VEIGA, C. Z. M.; DE SOUZA, L. P.; LAMBERTS, R. Análise da influência da orientação solar em habitações de interesse social para diferentes climas do Brasil. In: Congresso Latino Americano de Simulação de Edifícios – IBPSA LATAM, 8., 2023. **Anais [...]** Florianópolis: IBPSA LATAM. P. 189-194. Disponível em: https://ibpsa.org.br/misc/documentos/proceedingsIBPSALatamFlorianopolis2023/IBPSA_LATAM_2023_anais.pdf. Acesso em: 14 dez. 2023.

VEIGA, R. K.; OLINGER, M. S.; MELO, A. P.; LAMBERTS, R. Modelagem da ventilação natural com aplicação do objeto Energy Management System do Programa EnergyPlus. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE

CONSTRUÍDO, 15.; ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 11., João Pessoa, 2019. **Anais [...]**. Porto Alegre: ANTAC, 2019. Disponível em: <https://drive.google.com/file/d/1NZgXgUmzTVBpJrXqKM76eFkpQ4nmzdkB/view>. Acesso em: 05 maio 2024. Acesso em: 25 mai. 2024.

VEIGA, C. Z. M. **Análise do desempenho térmico de uma residência unifamiliar por meio de simulação computacional**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2023. Disponível em: <https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/publicacoes/tccs/TCC%20-%20Clara%20Zibetti%20Matuella%20Veiga..pdf>. Acesso em: 28 jan. 2024.

VIANA, M. R.; BARBOSA, M. M.; GHISI, E. Influência da operação de janelas e de venezianas no desempenho térmico de residências. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 17., 2023. **Anais[...]** São Paulo: ANTAC, 2023. p. 1–10. DOI: 10.46421/encac.v17i1.3862. Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/encac/article/view/3862>. Acesso em: 16 abr. 2025.

VILLAÇA, F. J. M. **O que todo cidadão precisa saber sobre habitação**. São Paulo: Editora Global, 1986.

WESTPHAL, F. S. Simulação da ventilação natural com o Energyplus: incertezas nos dados climáticos. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 18., 2020. **Anais [...]**. Porto Alegre: ANTAC, 2020. p. 1–8. DOI: 10.46421/entac.v18i.821. Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/entac/article/view/821>. Acesso em: 3 jul. 2025.

YUAN, X; RYU, Y; SEKARTAJI, D. Effect of balcony forms difference on indoor thermal environment and energy saving performance of multiple dwelling house. **Frontiers in Energy Research** 10:891946, aug. 2022. doi: 10.3389/fenrg.2022.891946. Acesso em: 16 jun. 2024.

ZAPELINI, M.B.; LIMA, J. G.; GUEDES, M. C. Evolução da Política Habitacional no Brasil (1967-2014): Uma Análise de Equilíbrio Pontuado. **Revista Interdisciplinar de Gestão Social**, v. 6, n. 3, p. 153-174, set./dez. 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.21714/2317-2428/2017v6n3p153-174>. Acesso em: 05 ago. 2024.

ZHAI, Z.; CHEN, Q.; KLEMS, J. H.; HAVES, P. Strategies for coupling energy simulation and computational fluid dynamics programs. Berkeley, CA: **Lawrence Berkeley National Laboratory**, 2001. Disponível em: <https://escholarship.org/uc/item/1vd6q3s2>. Acesso em: 05 abr. 2025.