



Governo do Estado de Santa Catarina
Sistema de Gestão de Processos Eletrônicos - SGP-e
TERMO DE AUTUAÇÃO

Processo UDESC 00036789/2024

Dados da Autuação

Autuado em: 26/08/2024 às 16:50

Setor origem: UDESC/CCT/SECEPG - Secretaria de Ensino de Pós-graduação

Setor de competência: UDESC/CCT/PPGEC - Coordenadoria do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Interessado: Lilian Marina Milani

Classe: Dissertação de Mestrado

Assunto: Trabalho Acadêmico Final dos Cursos de Pós-Graduação

Detalhamento: Envio da Dissertação de Mestrado_aluna Lilian Marina Milani do PPGEC

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS – CCT
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL – PPGEC**

LILIAN MARINA MILANI

**EDIFICAÇÕES EM *WOOD FRAME* PARA HABITAÇÃO DE INTERESSE SOCIAL:
ANÁLISE TERMOENERGÉTICA DA ENVOLTÓRIA**

**JOINVILLE
2024**

LILIAN MARINA MILANI

**EDIFICAÇÕES EM *WOOD FRAME* PARA HABITAÇÃO DE INTERESSE SOCIAL:
ANÁLISE TERMOENERGÉTICA DA ENVOLTÓRIA**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Engenharia Civil pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro de Ciências Tecnológicas – CCT, da Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Fernanda Perazzolo Disconzi.

JOINVILLE

2024

**Ficha catalográfica elaborada pelo programa de geração automática da
Biblioteca Universitária Udesc,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

Milani, Lilian Marina
Edificações em Wood Frame para Habitação de Interesse Social: Análise Termoenergética da Envoltória / Lilian Marina Milani. -- 2024.
195 p.

Orientadora: Fernanda Perazzolo Disconzi
Dissertação (mestrado) -- Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Joinville, 2024.

1. Painéis de Wood Frame. 2. Eficiência Energética. 3. Simulação Computacional. 4. Estrutura Leve de Madeira. I. Disconzi, Fernanda Perazzolo. II. Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

LILIAN MARINA MILANI

**EDIFICAÇÕES EM *WOOD FRAME* PARA HABITAÇÃO DE INTERESSE SOCIAL:
ANÁLISE TERMOENERGÉTICA DA ENVOLTÓRIA**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Engenharia Civil pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro de Ciências Tecnológicas – CCT, da Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Fernanda Perazzolo Disconzi.

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Dr^a. Fernanda Perazzolo Disconzi
CCT/UDESC (Orientadora e Presidente)

Membros:

Prof^a. Dr^a. Ana Carolina de Oliveira Veloso
LABCON/UFMG

Prof^a. Dr^a. Carmeane Effting
CCT/UDESC

Joinville, 27 de junho de 2024.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, pelo apoio e incentivo durante a minha vida acadêmica.

Ao meu companheiro pela compreensão e auxílio nesta jornada.

À minha orientadora Fernanda Perazzolo Disconzi por toda a sua dedicação, assessoria e contribuição no desenvolvimento desta pesquisa.

Às professoras da banca avaliadora, Carmeane Effting e Ana Carolina de Oliveira Veloso, por aceitarem o convite de participar da avaliação deste trabalho e contribuir com este estudo e com a minha formação.

À UDESC e aos demais professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do CCT por todo apoio e ensinamentos fornecidos ao longo do curso.

RESUMO

Nas habitações de interesse social (HIS) requisitos como menor custo, prazo de execução e eficiência energética são variáveis de grande relevância na adoção dos sistemas construtivos empregados. Neste sentido, o *wood frame*, com estrutura proveniente de recursos naturais e produção industrializada, apresenta vantagens ambientais e econômicas. No Brasil, este sistema construtivo ainda é considerado inovador, carecendo de estudos quanto ao seu desempenho termoenergético quando aplicado nas envoltórias de edificações implantadas no país. Desta forma, este trabalho teve como objetivo analisar a eficiência energética de diferentes painéis de *wood frame* por meio de simulações computacionais para uma tipologia de habitação residencial unifamiliar, localizada nas 8 zonas bioclimáticas (ZB) brasileiras. Para isso, utilizou-se o software *EnergyPlus*, além das recomendações da norma de desempenho de edificações habitacionais, a ABNT NBR 15.575-1:2024 e, a metodologia apresentada na Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética em Edificações Residenciais - INI-R. Inicialmente, simularam-se dois casos base, um em estrutura leve de madeira e outro de alvenaria convencional, os quais foram comparados a um modelo de referência, sendo em seguida analisados outros sete painéis de *wood frame*. Os casos com os arranjos associados a isolantes térmicos apresentaram os melhores resultados para Curitiba, Pelotas e São Paulo. A partir da ZB 4, verificou-se uma eficiência energética superior dos modelos em estrutura leve de madeira com menor transmitância e atraso térmico em suas composições, com maiores variações sendo observadas nas cidades de Teresina, Rio de Janeiro, Fortaleza e Manaus. Os resultados gerais revelaram um grande potencial em termos energéticos do sistema construtivo em estrutura leve de madeira, com seus arranjos recebendo etiqueta classe A ou, com pelo menos dois casos dos modelos avaliados sendo classificados com etiqueta energética superior à da alvenaria, exceto na cidade de Manaus, onde todos os arranjos avaliados obtiveram nível C de eficiência energética.

Palavras-chave: Painéis de *wood frame*; Eficiência energética; Simulação computacional; Estrutura leve de madeira.

ABSTRACT

In social housing (HIS), requirements such as lower cost, execution time and energy efficiency are highly relevant variables in the adoption of the construction systems used. In this sense, wood frame, with a structure derived from natural resources and industrialized production, presents environmental and economic advantages. In Brazil, this construction system is still considered innovative, lacking studies on its thermoenergetic performance when applied to the envelopes of buildings implemented in the country. Thus, this work aimed to analyze the energy efficiency of different wood frame panels through computer simulations for a single-family residential housing typology, located in the 8 Brazilian bioclimatic zones (ZB). For this, the EnergyPlus *software* was used, in addition to the recommendations of the residential building performance standard, ABNT NBR 15.575-1:2024, and the methodology presented in the Inmetro Normative Instruction for the Classification of Energy Efficiency in Residential Buildings - INI-R. Initially, two base cases were simulated, one in a lightweight wood structure and the other in conventional masonry, which were compared to a reference model, and then seven other wood frame panels were analyzed. The cases with arrangements associated with thermal insulation presented the best results for Curitiba, Pelotas and São Paulo. From ZB 4 onwards, a superior energy efficiency of the models in lightweight wood structure was observed, with lower transmittance and thermal delay in their compositions, with greater variations being observed in the cities of Teresina, Rio de Janeiro, Fortaleza and Manaus. The general results revealed a great potential in terms of energy of the construction system in lightweight wood structure, with its arrangements receiving a class A label or, with at least two cases of the evaluated models being classified with a higher energy label than the masonry, except in the city of Manaus, where all the evaluated arrangements obtained level C of energy efficiency.

Keywords: Wood frame panels; Energy efficiency; Computer simulation; Lightweight wooden structure.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Consumo de energia elétrica por setor em 2022.....	20
Figura 2 – Materiais construtivos mais empregados nas residências.....	25
Figura 3 – Classificação das casas em madeira.....	28
Figura 4 – Casa enxaimel em área urbana de Joinville.....	29
Figura 5 – Vista do Residencial Haragano.....	31
Figura 6 – Composição dos painéis em <i>wood frame</i> mais empregados no Brasil.....	35
Figura 7 – Composição dos quadros estruturais.....	36
Figura 8 – Detalhes das interseções entre paredes.....	38
Figura 9 – Composição e orientação das camadas do painel OSB.....	40
Figura 10 – Sentido de aplicação dos painéis OSB.....	41
Figura 11 – Revestimento externo em <i>sidings</i>	44
Figura 12 – Estrutura de uma parede <i>rainscreen</i>	45
Figura 13 – Isolamento de manta de lã de vidro em quadro estrutural de madeira.....	47
Figura 14 – Estimativa do consumo de eletricidade por uso final no setor residencial –PNE 2050.....	49
Figura 15 – Resumo da abordagem metodológica da INI-R em relação a NBR 15575-1:2024.....	55
Figura 16 – Indicadores de desempenho térmico da NBR 15575-1:2024.....	56
Figura 17 – Relação das classificações entre a NBR 15575 e a INI-R.....	57
Figura 18 – Componentes das tecnologias de adaptação propostas.....	67
Figura 19 – Representação dos painéis <i>wood frame</i> (EIFS), alvenaria convencional com bloco cerâmico, cobertura e piso	70
Figura 20 – Diagrama dos processos da pesquisa.....	76
Figura 21 – Planta baixa e perspectiva da HIS.....	78
Figura 22 – Variação anual de TBS e UR das cidades selecionadas.....	81
Figura 23 – Geometria do modelo de referência.....	85
Figura 24 – Geometria do modelo de real.....	87
Figura 25 – Fluxo de calor atravessando elementos do quadro estrutural em paralelo.....	89
Figura 26 – Classificação das tipologias de paredes para o modelo em <i>wood frame</i>	90
Figura 27 – Configuração das paredes originais e equivalentes e dos demais elementos construtivos do modelo em <i>wood frame</i>	90
Figura 28 – Classificação das tipologias de paredes para o modelo em <i>wood frame</i>	95
Figura 29 – Configuração das paredes originais e equivalentes e dos demais elementos construtivos do modelo em alvenaria.....	96
Figura 30 – Critério de classificação de eficiência energética da envoltória quanto ao PHFTUH.....	105
Figura 31 – Critério de classificação de eficiência energética da envoltória quanto à CgTTUH.....	106
Figura 32 – Arranjos das paredes originais e equivalentes em <i>wood frame</i> para análise termoenergética.....	108
Figura 33 – Temperaturas operativas anuais para as UH inseridas em Curitiba.....	114
Figura 34 – PHFT para as UH inseridas em Curitiba.....	115
Figura 35 – Cargas térmicas anuais para as UH inseridas em Curitiba.....	116
Figura 36 – Temperaturas operativas anuais para as UH inseridas em Pelotas.....	118

Figura 37 – PHFT para as UH inseridas em Pelotas.....	119
Figura 38 – Cargas térmicas anuais para as UH inseridas em Pelotas.	120
Figura 39 – Temperaturas operativas anuais para as UH inseridas na cidade de São Paulo.	122
Figura 40 – PHFT para as UH inseridas na cidade de São Paulo.....	123
Figura 41 – Cargas térmicas anuais para as UH inseridas na cidade de São Paulo.	124
Figura 42 – Temperaturas operativas anuais para as UH inseridas em Brasília....	126
Figura 43 – PHFT para as UH inseridas em Brasília.....	127
Figura 44 – Cargas térmicas anuais para as UH inseridas na cidade de Brasília...128	128
Figura 45 – Temperaturas operativas anuais para as UH inseridas em Joinville....130	130
Figura 46 – PHFT para as UH inseridas em Joinville.....	131
Figura 47 – Cargas térmicas anuais para as UH inseridas na cidade de Joinville. .132	132
Figura 48 – Temperaturas operativas anuais para as UH inseridas em Campo Grande.....	134
Figura 49 – PHFT para as UH inseridas em Campo Grande.	135
Figura 50 – Cargas térmicas anuais para as UH inseridas na cidade de Campo Grande.....	136
Figura 51 – Temperaturas operativas anuais para as UH inseridas em Teresina...138	138
Figura 52 – PHFT para as UH inseridas em Teresina.....	139
Figura 53 – Cargas térmicas anuais para as UH inseridas na cidade de Teresina. 140	140
Figura 54 – Temperaturas operativas anuais para as UH inseridas no Rio de Janeiro.	142
Figura 55 – PHFT para as UH inseridas no Rio de Janeiro.	143
Figura 56 – Cargas térmicas anuais para as UH inseridas no Rio de Janeiro.	144
Figura 57 – Temperaturas operativas anuais para as UH inseridas em Fortaleza..146	146
Figura 58 – PHFT para as UH inseridas em Fortaleza.....	147
Figura 59 – Cargas térmicas anuais para as UH inseridas em Fortaleza.	148
Figura 60 – Temperaturas operativas anuais para as UH inseridas em Manaus....150	150
Figura 61 – PHFT para as UH inseridas em Manaus.....	151
Figura 62 – Cargas térmicas anuais para as UH inseridas em Manaus.....	152
Figura 63 – Desempenho energético dos modelos construtivos analisados para o clima de Curitiba.....	155
Figura 64 – Desempenho energético dos modelos construtivos analisados para o clima de Pelotas.	158
Figura 65 – Desempenho energético dos modelos construtivos analisados para o clima de São Paulo.	161
Figura 66 – Desempenho energético dos modelos construtivos analisados para o clima de Brasília.	163
Figura 67 – Desempenho energético dos modelos construtivos analisados para o clima de Joinville.....	165
Figura 68 – Desempenho energético dos modelos construtivos analisados para o clima de Campo Grande.	167
Figura 69 – Desempenho energético dos modelos construtivos analisados para o clima de Teresina.	169
Figura 70 – Desempenho energético dos modelos construtivos analisados para o clima do Rio de Janeiro.	171
Figura 71 – Desempenho energético dos modelos construtivos analisados para o clima de Fortaleza.	173

Figura 72 – Desempenho energético dos modelos construtivos analisados para o clima de Manaus..... 175

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Especificação dos materiais empregados.....	71
Quadro 2 – Especificação dos casos analisados.....	72
Quadro 3 – Parâmetros termofísicos dos materiais para o modelo <i>wood frame</i>	92
Quadro 4 – Parâmetros termofísicos dos materiais para o modelo de alvenaria.....	97
Quadro 5 – Parâmetros termofísicos dos casos <i>wood frame</i>	111
Quadro 6 – Critérios de avaliação da Tomáx e Tomín para as UH inseridas em Curitiba.....	114
Quadro 7 – Critérios de avaliação do PHFT e Δ PHFT das UH inseridas em Curitiba.....	115
Quadro 8 – Critérios de avaliação quanto a RedCgTT das UH inseridas em Curitiba.....	116
Quadro 9 – Classificação da etiqueta de eficiência energética das envoltórias das UH inseridas em Curitiba.....	117
Quadro 10 – Critérios de avaliação da Tomáx e Tomín para as UH inseridas em Pelotas.....	118
Quadro 11 – Critérios de avaliação do PHFT e Δ PHFT das UH inseridas em Pelotas.....	119
Quadro 12 – Critérios de avaliação quanto a RedCgTT das UH inseridas em Pelotas.....	120
Quadro 13 – Classificação da etiqueta de eficiência energética das envoltórias das UH inseridas em Pelotas.....	121
Quadro 14 – Critérios de avaliação da Tomáx e Tomín para as UH inseridas na cidade de São Paulo.....	122
Quadro 15 – Critérios de avaliação do PHFT e Δ PHFT das UH inseridas na cidade de São Paulo.....	123
Quadro 16 – Critérios de avaliação quanto a RedCgTT das UH inseridas na cidade de São Paulo.....	124
Quadro 17 – Classificação da etiqueta de eficiência energética das envoltórias das UH inseridas na cidade de São Paulo.....	125
Quadro 18 – Critérios de avaliação da Tomáx e Tomín para as UH inseridas em Brasília.....	127
Quadro 19 – Critérios de avaliação do PHFT e Δ PHFT das UH inseridas em Brasília.....	127
Quadro 20 – Critérios de avaliação quanto a RedCgTT das UH inseridas na cidade de Brasília.....	128
Quadro 21 – Classificação da etiqueta de eficiência energética das envoltórias das UH inseridas em Brasília.....	129
Quadro 22 – Critérios de avaliação da Tomáx para as UH inseridas em Joinville..	130
Quadro 23 – Critérios de avaliação do PHFT e Δ PHFT das UH inseridas em Joinville.....	131
Quadro 24 – Critérios de avaliação quanto a RedCgTT das UH inseridas na cidade de Joinville.....	132
Quadro 25 – Classificação da etiqueta de eficiência energética das envoltórias das UH inseridas em Joinville.....	133
Quadro 26 – Critérios de avaliação da Tomáx para as UH inseridas em Campo Grande.....	134

Quadro 27 – Critérios de avaliação do PHFT e Δ PHFT das UH inseridas em Campo Grande.....	135
Quadro 28 – Critérios de avaliação quanto a RedCgTT das UH inseridas na cidade de Campo Grande.....	136
Quadro 29 – Classificação da etiqueta de eficiência energética das envoltórias das UH inseridas em Campo Grande.....	137
Quadro 30 – Critérios de avaliação da Tomáx para as UH inseridas em Teresina.	138
Quadro 31 – Critérios de avaliação do PHFT e Δ PHFT das UH inseridas em Teresina.....	139
Quadro 32 – Critérios de avaliação quanto a RedCgTT das UH inseridas na cidade de Teresina.....	140
Quadro 33 – Classificação da etiqueta de eficiência energética das envoltórias das UH inseridas em Teresina.....	141
Quadro 34 – Critérios de avaliação da Tomáx e Tomín para as UH inseridas no Rio de Janeiro.....	142
Quadro 35 – Critérios de avaliação do PHFT e Δ PHFT das UH inseridas no Rio de Janeiro.....	143
Quadro 36 – Critérios de avaliação quanto a RedCgTT das UH inseridas no Rio de Janeiro.....	144
Quadro 37 – Classificação da etiqueta de eficiência energética das envoltórias das UH inseridas no Rio de Janeiro.....	145
Quadro 38 – Critérios de avaliação da Tomáx para as UH inseridas em Fortaleza.....	146
Quadro 39 – Critérios de avaliação do PHFT e Δ PHFT das UH inseridas em Fortaleza.....	147
Quadro 40 – Critérios de avaliação quanto a RedCgTT das UH inseridas em Fortaleza.....	148
Quadro 41 – Classificação da etiqueta de eficiência energética das envoltórias das UH inseridas em Fortaleza.....	149
Quadro 42 – Critérios de avaliação da Tomáx para as UH inseridas em Manaus.	150
Quadro 43 – Critérios de avaliação do PHFT e Δ PHFT das UH inseridas em Manaus.....	151
Quadro 44 – Critérios de avaliação quanto a RedCgTT das UH inseridas em Manaus.....	152
Quadro 45 – Classificação da etiqueta de eficiência energética das envoltórias das UH inseridas em Manaus.....	153
Quadro 46 – Resultados do desempenho energético dos diferentes painéis de <i>wood frame</i> para a cidade de Curitiba.....	154
Quadro 47 – Resultados do desempenho energético dos diferentes painéis de <i>wood frame</i> para a cidade de Pelotas.....	157
Quadro 48 – Resultados do desempenho energético dos diferentes painéis de <i>wood frame</i> para a cidade de São Paulo.	160
Quadro 49 – Resultados do desempenho energético dos diferentes painéis de <i>wood frame</i> para a cidade de Brasília.	162
Quadro 50 – Resultados do desempenho energético dos diferentes painéis de <i>wood frame</i> para a cidade de Joinville.	164
Quadro 51 – Resultados do desempenho energético dos diferentes painéis de <i>wood frame</i> para a cidade de Campo Grande.	166
Quadro 52 – Resultados do desempenho energético dos diferentes painéis de <i>wood frame</i> para a cidade de Teresina.	168

Quadro 53 – Resultados do desempenho energético dos diferentes painéis de <i>wood frame</i> para a cidade do Rio de Janeiro.....	170
Quadro 54 – Resultados do desempenho energético dos diferentes painéis de <i>wood frame</i> para a cidade de Fortaleza.....	172
Quadro 55 – Resultados do desempenho energético dos diferentes painéis de <i>wood frame</i> para a cidade de Manaus.....	174

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Intervalos de temperaturas externas de bulbo seco (TBSm).	56
Tabela 2 – Área útil dos ambientes da edificação.	78
Tabela 3 – Características das cidades selecionadas.	80
Tabela 4 – Variáveis características das cidades selecionadas.	80
Tabela 5 – Parâmetros termofísicos dos elementos opacos do modelo de referência.	85
Tabela 6 – Características térmicas dos elementos transparentes do modelo de referência.	86
Tabela 7 – Características térmicas dos elementos construtivos do caso base em <i>wood frame</i> .	93
Tabela 8 – Propriedades térmicas dos elementos construtivos do caso base em alvenaria.	98
Tabela 9 – Período de uso e potência adotados para os equipamentos.	100
Tabela 10 – Densidade de potência adotada para a iluminação.	100
Tabela 11 – Calor produzido decorrente das atividades realizadas nos ambientes.	100
Tabela 12 – Faixas de temperaturas operativas para a determinação do PHFTAPP.	103
Tabela 13 – Valores de temperatura operativa para o cálculo da CgT_{RAPP} e da CgT_{AAPP} .	104
Tabela 14 – Características térmicas dos casos <i>wood frame</i> .	112

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
APA	<i>American Psychological Association</i>
APP	Ambiente de Permanência Prolongada
AWC	<i>American Wood Concil</i>
C	Capacidade Térmica
CBIC	Câmara Brasileira da Indústria da Construção
CB3E	Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações
CEN	Comitê Europeu de Normalização
CgTA	Carga Térmica de Aquecimento
CgTR	Carga Térmica de Refrigeração
CgTT	Carga Térmica Total
CO ₂	Dióxido de Carbono
CTE	Centro de Tecnologia de Edificações
CWFHC	<i>Canadian Wood Frame House Construction</i>
DATec	Documento de Avaliação Técnica
EIFS	<i>Exterior Insulation and Finish Systems</i>
EPS	Poliestireno Expandido
EUA	Estados Unidos da América
HIS	Habitação de Interesse Social
IBÁ	Indústria Brasileira de Árvores
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IEA	<i>Internacional Energy Agency</i>
IFBQ	Instituto Falcão Bauer
INI-R	Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Residenciais
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
ITA	Instituição Técnica Avaliadora
kWh	Kilowatt Hora

LABEEE	Laboratório de Eficiência Energética em Edificações
NBR	Normas Técnicas Brasileiras
MPa	Megapascal
OSB	<i>Oriented Strand Board</i>
PBQP-H	Programa Brasileiro da Qualidade e Produtividade do Habitat
PHFT	Percentual de horas de ocupação dentro de uma faixa de temperatura operativa
Δ PHFT	Incremento no Percentual de Horas de ocupação dentro de uma Faixa de Temperatura operativa
PHRC	<i>Pennsylvania Housing Research Center</i>
PMCMV	Programa Minha Casa Minha Vida
PNE	Plano Nacional de Energia
PUR	Poliuretano
PVC	Policloreto de Polivinila
q'	fluxo de calor
RedCgTT	Redução da Carga Térmica Total
RTQ-R	Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais
Tomáx	Temperatura Operativa máxima
Δ Tomáx	Valor de tolerância da temperatura operativa mínima
Tomín	Temperatura Operativa mínima
Δ Tomín	Valor de tolerância da temperatura operativa mínima
U	Transmitância térmica
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
UH	Unidade Habitacional
UH,real	Unidade Habitacional do modelo de real
UH,ref	Unidade Habitacional do modelo de referência
UR	Umidade Relativa
VN	Ventilação Natural
AC	Ar Condicionado
WFCM	<i>Wood Frame Construction Manual</i>
ZB	Zona Bioclimática

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	18
1.1	OBJETIVOS	21
1.1.1	Objetivo geral.....	21
1.1.2	Objetivos específicos.....	21
1.2	ESTRUTURA DO TRABALHO	21
2.	REFERENCIAL TEÓRICO.....	23
2.1	PROCESSOS CONSTRUTIVOS	23
2.1.1	Alvenarias	23
2.1.2	Madeiras	27
2.2	CONSUMO ENERGÉTICO DAS EDIFICAÇÕES.....	48
2.3	NORMATIVAS PARA AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO ENERGÉTICO DAS HABITAÇÕES NO BRASIL	51
2.4	DESEMPENHO TÉRMICO E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM HABITAÇÕES RESIDENCIAIS	57
2.5	CONSIDERAÇÕES SOBRE O REFERENCIAL TEÓRICO	73
3.	MÉTODO.....	76
3.1	DEFINIÇÃO DA TIPOLOGIA DA EDIFICAÇÃO	77
3.2	CIDADES E CLIMAS ANALISADOS	79
3.3	CONFIGURAÇÃO DAS ENVOLTÓRIAS E PARÂMETROS TERMOFÍSICOS DOS MATERIAIS	83
3.3.1	Modelo de referência.....	84
3.3.2	Modelos reais.....	86
3.4	MÉTODO DE AVALIAÇÃO	99
3.4.1	Simulação computacional	99
3.5	CLASSIFICAÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DA ENVOLTÓRIA..	101
3.5.1	Diretrizes para obtenção dos indicadores de desempenho da envoltória – NBR 15575: Parte 1.....	102
3.5.2	Metodologia da INI-R para a classificação energética da envoltória	104
3.6	DETERMINAÇÃO DE DIFERENTES ARRANJOS DE PAREDES EM <i>WOOD FRAME</i> PARA ANÁLISE TERMOENERGÉTICA	106
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	113
4.1	CASOS BASE	113
4.1.1	Zona Bioclimática 1	113
4.1.2	Zona Bioclimática 2	117
4.1.3	Zona Bioclimática 3	121
4.1.4	Zona Bioclimática 4	126
4.1.5	Zona Bioclimática 5	129
4.1.6	Zona Bioclimática 6	133
4.1.7	Zona Bioclimática 7	137
4.1.8	Zona Bioclimática 8	141
4.2	MODELOS DE PAINÉIS EM <i>WOOD FRAME</i> CONFIGURADOS PARA ANÁLISE TERMOENERGÉTICA	153
4.2.1	Zona Bioclimática 1	154
4.2.2	Zona Bioclimática 2	156
4.2.3	Zona Bioclimática 3	159
4.2.4	Zona Bioclimática 4	161
4.2.5	Zona Bioclimática 5	164

4.2.6	Zona Bioclimática 6.....	165
4.2.7	Zona Bioclimática 7.....	167
4.2.8	Zona Bioclimática 8.....	169
4.3	CONSIDERAÇÕES SOBRE A METODOLOGIA APLICADA.....	176
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	177
5.1	LIMITAÇÕES DO TRABALHO	180
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	181
6.	REFERÊNCIAS.....	182

1. INTRODUÇÃO

A crescente preocupação com os impactos ambientais tem impulsionado a indústria da construção civil na busca por tecnologias alternativas que façam uso de recursos renováveis, gerem menor quantidade de resíduos e, possibilitem a redução na demanda de energia para a construção das edificações, mitigando o impacto ao ambiente. Ao mesmo tempo, também se torna necessária a construção de edificações que apresentem um consumo energético eficiente durante sua utilização, de forma a garantir um ambiente construído pautado na sustentabilidade.

Por se tratar de um recurso natural renovável e que carece de menor consumo de energia para sua produção, a madeira possui grande potencial como material construtivo (MONTEIRO, 2011). No Brasil, sua capacidade de uso se intensifica considerando a liderança mundial do país na produtividade florestal, a qual correspondeu a 66,1 m³ de madeira por hectare no ano de 2018 (IBÁ, 2019), sendo este volume proveniente das florestas plantadas que ocupam apenas 2,0% da área florestal do país (SFB, 2019).

Entretanto, na construção civil nacional a madeira ainda tem sido majoritariamente empregada em caráter temporário, sendo utilizada em andaimes e fôrmas de escoramento para concreto, além de esquadrias e produtos de acabamento como pisos e forros. Ela tem sido aplicada de forma ínfima na composição da estrutura principal ou na vedação das edificações (SHIGUE, 2018).

Segundo Espíndola (2017), esta circunstância pode ser explicada pelo desconhecimento da tecnologia da madeira, sendo muitas vezes as espécies tradicionais substituídas por outras inadequadas ao uso pretendido (NAHUZ, 2013). Isso culminou em construções executadas com técnicas precárias, sendo a madeira associada a um material de baixa durabilidade e destinada a uma classe desprivilegiada. Consequentemente, originou-se um preconceito quanto à confiabilidade desta enquanto material principal para as edificações (SHIGUE, 2018). De acordo com Espíndola (2018), as experiências malsucedidas ao longo do tempo revelam um histórico de baixo nível tecnológico deste setor no Brasil.

Em contraste, países da América do Norte e Europa vem utilizando a madeira como matéria-prima predominante em suas residências (ARAUJO, 2017). Nestes locais, destaca-se o método construtivo *wood frame*, o qual é empregado em 95% das casas construídas nos EUA. Também vem sendo aplicado com sucesso na constru-

ção de casas populares em países da América do Sul, como Chile e Venezuela (MOLINA; JUNIOR, 2010). O *wood frame* consiste em uma técnica construtiva industrializada, estruturada em perfis de madeira reflorestada tratada, leve, durável, que apresenta rápida execução, redução de desperdícios, além do alto controle no processo de produção e qualidade, podendo se apresentar como uma alternativa viável para conter o déficit habitacional no Brasil, o qual conforme a Fundação João Pinheiro (2024) correspondeu a 6,215 milhões de domicílios em 2022.

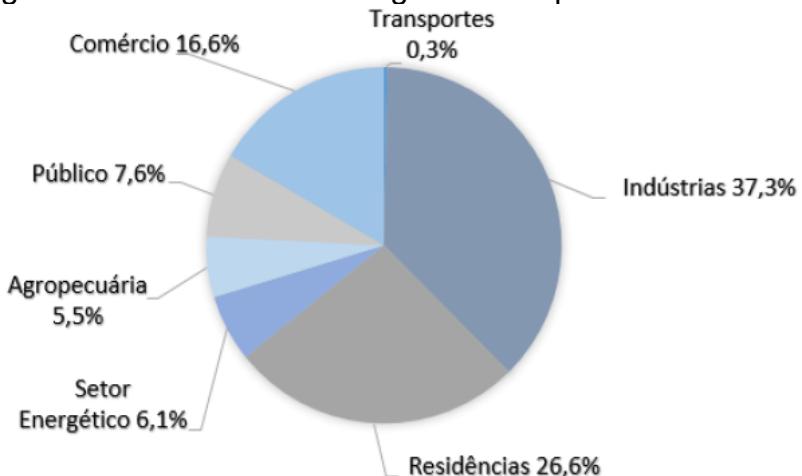
Diante disso, iniciativas para incentivar a adoção do *wood frame* como solução construtiva em habitações brasileiras foram estabelecidas. Em 2013, foi aprovado o Documento de Avaliação Técnica nº 020 (DATec nº 020), que permitiu o financiamento de residências construídas em *wood frame* em território nacional. Apesar deste significativo avanço, as possibilidades de crédito imobiliário foram condicionadas às características construtivas detalhadas no documento, com a produção das moradias em *wood frame* limitada à empresa desenvolvedora do respectivo DATec. Este panorama pode ser superado recentemente com a publicação da NBR 16936 (ABNT, 2023), que possibilitou o uso de novos materiais nos envelopes em *wood frame* e permitiu a sua produção por demais construtores, podendo impulsionar a consolidação deste sistema construtivo no país.

Quando comparado com sistemas construtivos tradicionais, o *wood frame* se mostra competitivo em face de sua produção industrializada, a qual permite o maior controle de qualidade em sua fabricação e a redução da geração de resíduos (MOLINA E CALIL JÚNIOR, 2010). Segundo estudos realizados por Viana (2020) e Prazeres, Alberti e Arakawa (2022), o sistema construtivo em madeira se apresenta economicamente mais vantajoso quando equiparado, por exemplo, com a alvenaria, sendo evidenciado os custos indiretos da obra como os responsáveis por este cenário. Isso pode ser justificado pela agilidade no tempo de execução da técnica em *wood frame*, que pode ter sua conclusão alcançada com uma velocidade até 3 vezes superior em relação a alvenaria convencional (CTE, 2020).

Com relação ao seu desempenho térmico, embora Bolsoni (2020) destaque o *wood frame* como adaptável a qualquer tipo de clima, é notória a carência de estudos voltados a sua performance energética quando adotado em habitações implantadas em climas brasileiros. Esta circunstância se apresenta em dissimetria com os dados divulgados através do Relatório do Balanço Energético Nacional elaborado pela Empresa de Pesquisa Energética em 2023, no qual é apontado um alto consumo de ener-

gia elétrica por parte das edificações, correspondendo a mais de 80% da energia elétrica distribuída no território nacional, sendo somente as residências responsáveis por 26,6% do consumo total em 2022, como pode ser observado na Figura 1.

Figura 1 – Consumo de energia elétrica por setor em 2022.



Fonte: Elaborado pela autora (2024), conforme dados do EPE (2023).

Em geral, a escassez de estudos que exploram a performance energética do sistema construtivo *wood frame* se estende aos climas quentes, sendo que, a importância dessas investigações se amplifica no Brasil perante a recente implementação da normativa NBR 16936, a qual expande as possibilidades de uso do *wood frame* em território nacional e promove uma perspectiva promissora para a sua adoção em larga escala. Este cenário evidencia a relevância em conhecer o comportamento termoenergético e a capacidade de adaptação da tecnologia em estrutura leve de madeira quando exposta as condições climáticas do país.

Assim, esta pesquisa tem como objetivo avaliar o desempenho termoenergético do sistema construtivo em *wood frame*, voltado para habitações de interesse social, quando inserido nos diferentes climas brasileiros. A análise foi realizada por meio de simulações computacionais empregando uma tipologia de edificação residencial unifamiliar, com os resultados obtidos sendo comparados ao de uma edificação de referência e a um modelo de alvenaria convencional. Posteriormente, os sistemas construtivos avaliados tiveram a sua performance termoenergética classificada de acordo com os critérios estabelecidos na Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética em Edificações Residenciais - INI-R.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Analizar o desempenho termoenergético de sistemas construtivos em *wood frame* para habitações de interesse social através de simulações computacionais para diferentes regiões do Brasil.

1.1.2 Objetivos específicos

Para atingir o objetivo geral foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- a) Simular e comparar o desempenho termoenergético de uma HIS com dois sistemas construtivos diferentes: *wood frame* e alvenaria convencional;
- b) Discutir sobre os resultados de diferentes envelopes de *wood frame* no desempenho termoenergético da envoltória da HIS;
- c) Classificar o nível de eficiência energética da envoltória da HIS em *wood frame* e em alvenaria convencional de acordo com o método da INI-R.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está organizado em cinco capítulos. No primeiro, é realizada uma introdução ao tema da pesquisa, contemplando a contextualização e a justificativa para a realização do estudo, além de apresentar dados e argumentos que corroboram sobre a sua relevância, finalizando com os objetivos a serem alcançados através do seu desenvolvimento.

No segundo capítulo é realizado um levantamento na literatura nacional e internacional visando discutir os temas relacionados à pesquisa. Inicialmente, são apresentados os elementos principais que compõem os sistemas construtivos a serem avaliados. Em seguida, é apresentado um panorama geral sobre o consumo e demanda de energia nas edificações, especialmente para o setor residencial. Também é evidenciada a evolução cronológica dos métodos nacionais desenvolvidos para a avaliação do desempenho térmico e eficiência energética nas habitações. Para concluir, são apresentados estudos a nível mundial que tratam do desempenho térmico e eficiência energética em diferentes tipologias habitacionais e condições climáticas diversas.

O terceiro capítulo aborda sobre o método adotado para o desenvolvimento da pesquisa. Na primeira etapa é apresentada a tipologia construtiva selecionada para a modelagem, fundamentando a sua escolha e descrevendo suas características gerais. A segunda etapa consiste em apresentar as cidades brasileiras escolhidas para a inserção dos dados climáticos nas simulações, sendo evidenciada as principais particularidades de seus climas. Em seguida, são expostas as configurações iniciais dos elementos construtivos a serem aplicados na envoltória da residência, sendo indicadas as propriedades e características termofísicas de seus materiais e da envolvente. Na sequência, são apresentadas as condições de contorno e parâmetros operacionais da simulação computacional. Como quinta etapa, discorre-se sobre a metodologia apresentada na INI-R para a classificação da eficiência energética das unidades habitacionais avaliadas neste estudo. Na última etapa, apresentam-se as adaptações realizadas nas vedações verticais opacas da edificação, com diferentes painéis de *wood frame* sendo inseridos na envolvente da unidade habitacional, podendo ser verificada influência destes e os melhores resultados obtidos para o desempenho termoenergético da edificação.

No quarto capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos na pesquisa, identificando os níveis de eficiência energética alcançados para os diferentes casos simulados. Para melhor visualização e entendimento, os resultados são mostrados através de gráficos e tabelas.

O quinto capítulo expõe as conclusões da pesquisa e a confronta com as constatações evidenciadas em outras publicações mencionadas na etapa da revisão de literatura. Por fim, são indicadas as limitações do estudo e inseridas sugestões para trabalho futuros, principalmente em relação aos tópicos que não foram abordados nesta pesquisa.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Inicialmente, é abordado neste capítulo os sistemas construtivos avaliados no presente estudo, com destaque para o objeto da pesquisa: as vedações em *wood frame*. Apresenta-se também um panorama do consumo de energia nas edificações, além dos métodos utilizados para realizar as avaliações de desempenho termoenergético nas habitações, com enfoque na NBR 15.575 (ABNT, 2024) e na INI-R (INMETRO, 2022). Na sequência, apresenta-se o estado da arte sobre o desempenho térmico e a eficiência energética das habitações com diferentes envolventes inseridas em climas distintos, elencando estudos relevantes para o desenvolvimento e inovação desta pesquisa. O capítulo finaliza com a conclusão sobre o referencial teórico, sendo discutidos os principais pontos apresentados e destacada a lacuna de pesquisa que este trabalho aborda.

2.1 PROCESSOS CONSTRUTIVOS

Para Martucci (1990), o processo construtivo é o responsável pela materialização das unidades habitacionais, já que concentra um conjunto de conhecimentos técnicos e organizacionais que definem as formas e as capacidades econômicas e técnicas para viabilizar a construção. Com isso, são apresentados a seguir os processos construtivos em alvenaria e em *wood frame*, a fim de aprofundar os conhecimentos sobre estes e seus materiais constituintes.

2.1.1 Alvenarias

Os processos construtivos em alvenaria estão presentes ao longo da história da formação das cidades brasileiras, sendo empregadas tanto na construção de edifícios de usos diversos, quanto na produção de sistemas de infraestrutura urbana (SILVA, 2003).

Tauil e Nese (2010), descrevem a alvenaria como um conjunto de unidades, como por exemplo, tijolos cerâmicos ou de concreto, que são conectados entre si através de uma argamassa apropriada e resultam em um elemento vertical coeso, promovendo a segurança e proporcionando conforto térmico, além de resistir ao fogo e proteger os ambientes contra intempéries. De acordo com os autores, dentre as técnicas construtivas se destacam a alvenaria estrutural e a de vedação.

A alvenaria estrutural é um processo construtivo onde as paredes da edificação desempenham a função de estrutura, as quais suportam as cargas da edificação e exercem a tarefa de vedação, dispensando o uso de pilares e vigas de concreto armado (BUSI, 2009). De acordo com Rocha (2013), as unidades devem ser moduladas de forma a executar a amarração precisa entre elas, obtendo-se um sistema com coordenação modular que possibilita a melhor racionalização dos insumos, entretanto, também dificulta a realização de algumas intervenções futuras na edificação.

Os blocos estruturais podem ser cerâmicos ou de concreto e devem atender a requisitos como os delimitados na ABNT NBR 15961-1:2011 - Blocos cerâmicos estruturais para alvenaria - Parte 1: Métodos de ensaio, na ABNT NBR 15812:2010 - Alvenaria estrutural - Blocos de concreto – Requisitos e, na ABNT NBR 10837:2019 - Bloco vazado de concreto simples para alvenaria - Método de ensaio.

Além das peças constituídas por bloco, meio bloco e bloco e meio, bem como, as vergas e contravergas, designadas como canaletas, este sistema, basicamente, é composto ainda por argamassa, graute e armaduras. De forma geral, as armaduras têm como função reforçar juntas e melhorar a amarração entre as paredes (PARSEKIAN *et al.*, 2013), já o graute é utilizado para aumentar a resistência a compressão das paredes e proteger as armaduras empregadas nestas, envolvendo-as completamente e formando um conjunto único (PINHEIRO, 2018).

Quanto a argamassa, esta é formada através da dosagem entre cimento, um agregado miúdo, água e cal, podendo ser industrializada ou produzida em obra. Segundo Rodrigues Mariano (2014), na alvenaria estrutural as argamassas são incumbidas de unir as unidades dos blocos, garantir a vedação e propiciar a aderência com as armaduras nas juntas.

Na alvenaria de vedação, como o próprio nome sugere, o sistema construtivo tem como função vedar e separar ambientes, necessitando de vigas e pilares metálicas, em concreto armado ou, outros materiais com capacidade de resistir as cargas provenientes da edificação, podendo ser efetuadas maiores intervenções nas paredes após concluída a obra (RAMALHO; CORRÊA, 2003). Nesse processo construtivo, a parede é construída por meio do assentamento de tijolos maciços ou blocos vazados empregando o mesmo tipo de argamassa descrito acima.

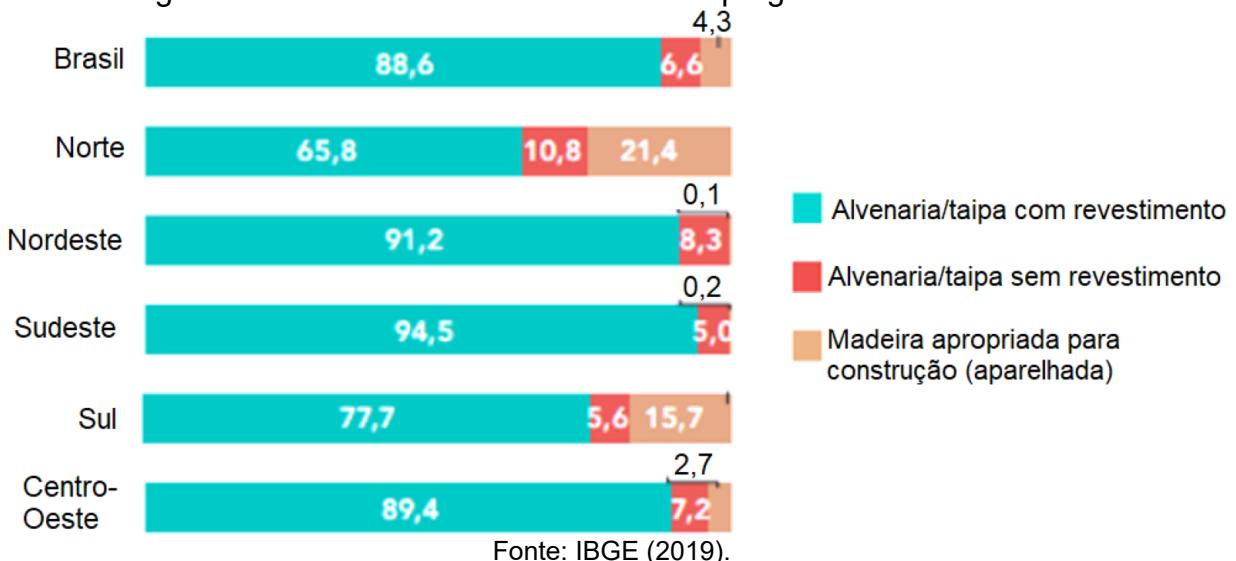
As peças que constituem a alvenaria de vedação precisam atender as exigências de normativas como: ABNT NBR 6136:2016 - Blocos vazados de concreto simples para alvenaria – Requisitos, a qual apresenta propriedades físicas e mecânicas, como resistência à compressão, absorção de água, dimensões, dentre outros para o

aceite dos blocos de concreto e, a ABNT NBR 7170:2016 - Bloco cerâmico para alvenaria – Terminologia, que define os termos técnicos referentes aos diferentes tipos de blocos cerâmicos e, estabelece suas características, dimensões, propriedades físicas e mecânicas, além de termos relacionados a métodos de ensaio e de produção dos mesmos.

Ressalta-se que ambas as técnicas (estrutural e de vedação) precisam atender também aos requisitos da norma de desempenho NBR 15575:2021, de maneira a possibilitar a aplicação destas em construções financiadas, como as de interesse social. Esta normativa determina requisitos gerais referentes ao desempenho de paredes de alvenaria, tais como a capacidade de carga, estabilidade, resistência ao fogo, isolamento acústico, estanqueidade à água, durabilidade, dentre outros aspectos. Essas exigências são importantes para garantir a qualidade, a segurança e a durabilidade das alvenarias nas edificações.

No Brasil, o processo construtivo das alvenarias é o mais utilizado no país. Dados de 2018 da Pesquisa Nacional por Amostras de Domicílio Contínua (IBGE, 2019) apresentam a respectiva como o material predominante das paredes em 95,2% dos domicílios brasileiros, revelando sua popularidade na construção civil nacional. A Figura 2 apresenta a distribuição do material construtivo mais utilizado nas residências localizadas nos grandes centros das 5 regiões brasileiras.

Figura 2 – Materiais construtivos mais empregados nas residências.



Apesar do destaque entre os materiais utilizados nas estruturas e vedações das habitações brasileiras, a alvenaria, o concreto e o aço apresentam elevados impactos ambientais, evidenciando grandes deficiências quanto a sustentabilidade.

Esta situação pode ser observada no estudo desenvolvido por Thomas e Dingy (2018), o qual avaliou o ciclo de vida de 32 projetos a serem implantados na Austrália empregando materiais de alta densidade, como o concreto e a alvenaria, sendo simulada a substituição dos respectivos pela madeira visando a posterior comparação da performance destes. Dentre os principais resultados obtidos estão o maior consumo de energia incorporada na produção de habitações em alvenaria e concreto durante o estágio de construção (cerca de 18% maior que nas de madeira), sendo que esta etapa considera a energia incorporada inicialmente na fabricação dos materiais, os resíduos gerados durante a confecção dos imóveis, além da energia usada na fábrica e na utilização de equipamentos para as atividades de construção. Também foi verificado um consumo de energia aproximadamente 56% menor nas habitações em madeira durante o estágio de fim da vida útil, que contempla o consumo de energia nas atividades de demolição das edificações e, a eliminação dos resíduos em aterros ou centros de reciclagem.

Já no trabalho elaborado por Tettey, Doddo e Gustavsson (2019), buscou-se analisar as emissões de dióxido de carbono (CO₂) durante o ciclo de vida de um edifício em concreto pré-fabricado, composto por 6 pavimentos e implantado na Suécia. Este prédio teve seu projeto arquitetônico adaptado conforme as características necessárias para a modelagem de sistemas construtivos em madeira. Com base nos resultados foi constatado que tanto na fase de produção quanto no fim de vida, a construção de concreto apresentou maiores emissões de CO₂ devido a uma maior quantidade de concreto e aço em relação as alternativas em madeira. Também foi mencionada a capacidade dos sistemas de madeira em armazenar quantidades significativas de carbono no edifício, evitando grandes emissões a atmosfera.

As conclusões pontuadas nestas pesquisas mostram-se em consonância com o publicado pela IEA (2022), a qual apresentou dados indicando que em 2021 a fabricação de aço, cimento e alumínio para construção civil correspondeu a 6% da energia global e emissões relacionadas a processos, sendo que, a fabricação do aço e cimento representaram juntos 95% deste total. De acordo com a organização supracitada, está circunstância é motivada principalmente em razão das novas construções exigirem quase 2.000 toneladas de cimento e 500 toneladas de aço, o que equivale ao dobro do requerido no ano 2000.

Mediante este cenário, torna-se essencial a seleção de materiais renováveis como a madeira, que podem propiciar construções mais limpas quando aliados a tecnologias com alto índice de industrialização, cuja racionalização dos processos reduza desperdícios e otimize o uso de recursos.

2.1.2 Madeiras

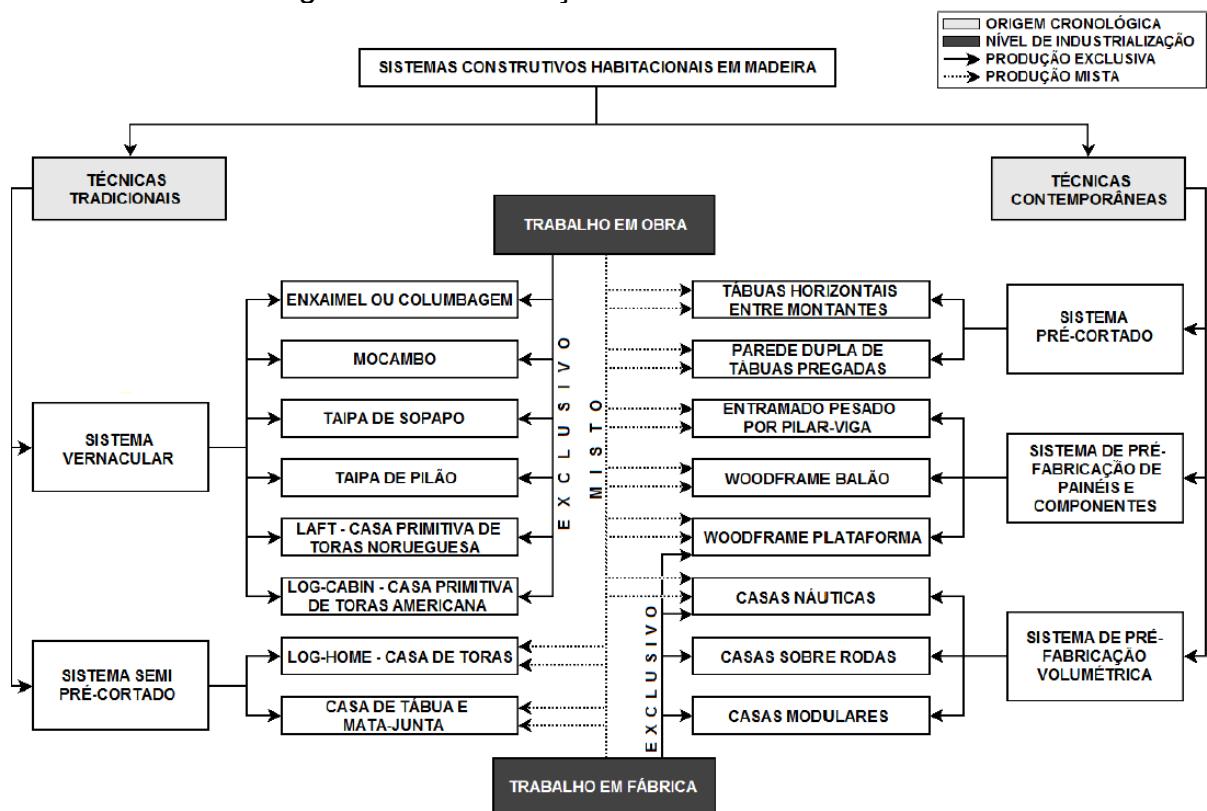
Por se tratar de um produto biodegradável, renovável e reciclável, os insumos derivados da madeira apresentam grande competitividade frente a outros materiais de construção, podendo as florestas plantadas, quando geridas de forma responsável, promover grande desenvolvimento no âmbito social, econômico e ambiental (NUNES, 2014).

Outro fator importante se refere a energia total consumida para a produção industrial da madeira, sendo que, de acordo com Allen e Thallon (2011), na construção de uma edificação em madeira a energia total consumida é aproximadamente a metade de uma edificação em aço e dois terços da consumida em uma edificação de concreto.

Além disso, como efeito de seu fácil acesso e de sua elevada disponibilidade na natureza, a arte de trabalhar com a madeira se tornou de grande valia ao ser humano, permitindo a evolução de técnicas de manejo até chegar nas tecnologias atuais, as quais puderam ser adaptadas para cada região de acordo com os tipos de árvores existentes e as necessidades locais. O clima também foi um fator fundamental para a definição de características construtivas da estrutura e design adotados nas habitações, tendo em vista que a madeira também pode ser aplicada como isolante térmico nas construções em regiões com climas mais severos (JÚNIOR; SILVA; SOARES, 2017).

Com relação as tipologias construtivas, Araujo *et al.* (2016) propôs em sua pesquisa uma classificação tendo em vista que um único sistema pode combinar mais de um gênero ou atributo, obtendo uma abordagem mais vasta dos muitos sistemas construtivos em madeira existentes e, complementando as classificações sugeridas por Piqué (1984). A Figura 3 apresenta a organização elaborada pelo pesquisador.

Figura 3 - Classificação das casas em madeira.



Fonte: Araujo et al. (2016).

Embora as técnicas tradicionais indicadas no organograma acima se amparem largamente no trabalho artesanal, com baixo ou nenhum uso tecnológico, a durabilidade das casas em madeira - quando de boa qualidade e bem trabalhada - é elevada. Conforme exposto no trabalho de Gonçalves (2016), ao utilizar a espécie de madeira apropriada e adotar as técnicas adequadas para o tipo de uso, a madeira como material de construção pode transcender os séculos, sendo relatado a existência de habitações estruturadas em madeira e ainda em uso no Japão com idade superior a 400 anos.

Neste contexto, no Brasil o sistema conhecido como *enxaimel* (Figura 4) foi difundido pela imigração germânica em várias regiões do sul do país (FUTURENG, 2012; BENSON, 1997), como por exemplo na cidade de Joinville, onde até hoje existem exemplares de edificações neste estilo que permanecem sendo habitadas. Com base no relatado, torna-se possível constatar uma capacidade de eficiência estrutural do conjunto em madeira mesmo quando implantado em climas quentes e úmidos.

Figura 4 – Casa enxaimel em área urbana de Joinville.



Fonte: Veiga (2011).

Este sistema que consiste em uma estrutura composta por caibros e barrotes de madeira encaixados entre si em posições horizontais, verticais ou inclinadas através de cavilhas, cunhas e entalhes e, preenchidos por argamassa, pedras ou tijolos (FUTURENG, 2012; BENSON, 1997), precisou ser aperfeiçoado visando a maior produção habitacional. Desta forma, a tipologia enxaimel foi precursora do sistema conhecido hoje como *wood frame*, considerado o pioneiro dentre os métodos construtivos com alto índice de industrialização e objeto desta pesquisa.

2.1.2.1 *Panorama nacional da construção em wood frame e sua inserção em Habitações de Interesse Social (HIS)*

Utilizado em construções de pequeno porte em diversos países europeus, asiáticos e norte-americanos, o sistema em *wood frame* é consolidado há mais de 150 anos nos Estados Unidos, sendo empregado em mais de 90% das casas deste país, conforme mencionado no capítulo 1 do presente estudo.

No Brasil, de modo oposto, dentre as técnicas construtivas em madeira predominou o sistema de tábuas verticais com sarrafos e, em madeira maciça empilhada até o início dos anos dois mil, sendo o desempenho global destas tipologias insatisfatório. Isso contribuiu para o aumento do preconceito do uso da madeira na construção de moradias no país, atribuindo de maneira equivocada o mau desempenho ao componente material de sua estrutural - a madeira (DIAS, 2005).

Esta situação culminou na exclusão das casas de madeira em programas sociais que incentivavam a aquisição do primeiro imóvel para famílias de baixa renda por um longo tempo, sendo observada desde 1946 com a criação da Fundação Casa Popular até o final da primeira década do século XXI com o programa Minha Casa Minha Vida (MCMV), criado em 2008 (OLIVEIRA *et al.*, 2015).

Buscando alterar esse cenário, em 2009 um grupo de empresários e engenheiros brasileiros organizou visitas em fábricas alemãs com o objetivo de compreender melhor o processo de produção industrializada do sistema *wood frame*. Esta iniciativa originou uma parceria entre o Sistema Nacional de Aprendizagem Industrial do Paraná (SENAI-PR) e o Ministério das Finanças e da Economia do estado alemão Baden-Wurttemberg (TÉCHNE, 2009), resultando na criação da Comissão Casa Inteligente, tendo dentre seus objetivos definir diretrizes de desempenho para a implantação do sistema construtivo em *wood frame* no Brasil.

De acordo com Amancio *et al.* (2015), a iniciativa também foi apoiada pela instituição do Sistema Nacional de Avaliação Técnica (SINAT), o qual foi criado em 2007 pelo Ministério das Cidades e, vinculado ao Programa Brasileiro de Qualidade e Produtividade do Habitat (PBQP-H). O SINAT, com o propósito de estimular e garantir a implementação de produtos inovadores no setor da construção civil, possibilita que os mesmos sejam financiados por agentes como a Caixa Econômica Federal e participem dos programas habitacionais vigentes, como o MCMV (ESPÍNDOLA; INO, 2014).

Em meados de 2010, devido ao sistema construtivo ainda não possuir uma norma técnica no país, este precisou ser submetido a um processo de avaliação técnica para tornar possível a sua concessão de viabilidade prévia e de financiamento. Esta avaliação considerou os critérios da norma de desempenho vigente na época, contemplando requisitos relacionados ao seu desempenho estrutural, à segurança contra incêndio, à estanqueidade à água, ao desempenho térmico e acústico, à durabilidade e à manutenibilidade (RAMOS, 2019).

Em setembro de 2011, a Diretriz SINAT nº 005 para “Sistema leves tipo *Light Wood Framing*” foi publicada pelo Ministério das Cidades (BRASIL, 2011). Este documento serviu como base para a execução de modificações no projeto da tecnologia construtiva aplicada ao primeiro empreendimento social constituído por sistema estruturado em peças leves de madeira: o residencial Haragano (Figura 5). Implantado na zona urbana da cidade de Pelotas/RS, o empreendimento entregue em junho de 2014 conta com 280 unidades habitacionais unifamiliares, sendo 270 residências de dois

pavimentos com área total de 47 m² e 10 térreas, com uma área de 42 m². Na figura a seguir é exposta uma vista do residencial.

Figura 5 – Vista do Residencial Haragano.



Fonte: Dockendorff (2014).

As principais modificações foram realizadas na estrutura e nos fechamentos internos e externos dos painéis a serem empregados nas habitações do empreendimento, bem como, em seu processo construtivo, com a pré-fabricação de seus elementos gerando menor custo e maior rapidez na obra que inicialmente foi idealizada em alvenaria estrutural (ESPÍNDOLA, 2017).

A etapa seguinte, consistiu em um proponente contratar Instituições Técnicas Avaliadoras (ITAs) para a realização dos métodos de avaliação conforme as referências normativas indicadas no SINAT nº 005. A empresa Tecverde que iniciou suas atividades na construção civil empregando o método *wood frame* desde início de 2010, realizou os procedimentos para obtenção de um Documento de Avaliação Técnica (DATec) emitido a partir dos Relatórios Técnicos de Avaliação (RTAs) desenvolvidos pelas ITAs. Com a aprovação do DATec possibilitou-se o financiamento das edificações em agências públicas e a introdução do *wood frame* na produção de habitações sociais do Programa Minha Casa Minha Vida - PMCMV (LEITE, 2017).

O processo para homologação do DATec envolveu várias avaliações técnicas realizadas pelas ITAs contratadas, sendo seguidas as determinações da Diretriz SINAT 005. A partir das informações técnicas disponibilizadas pelas instituições e de ensaios atestando o atendimento a diversas normativas, o Instituto Falcão Bauer de Qualidade (IFBQ) elaborou o Relatório técnico de Avaliação para o sistema construtivo em *wood frame* e, em sequência, foi produzido e aprovado pelos colegiados do SINAT

o DATec nº 20 - Sistema estruturado em peças leves de madeira maciça serrada, sendo homologado em outubro de 2013.

Este documento aprovado representou um grande avanço aos propósitos traçados pela Comissão Casa Inteligente, todavia, o DATec nº 20 previa somente a construção de habitações destinadas a unidades unifamiliares isoladas ou geminadas em sua primeira versão, não atendendo na íntegra a expectativa inicial em contemplar edificações de até 5 pavimentos (ESPÍNDOLA, 2017). Visando ampliar as possibilidades de uso do *wood frame* em HIS, durante os períodos de revalidação do documento foram expandidas as alternativas de construção, incluindo sobrados de dois pavimentos e a produção de edificações multifamiliares com até 04 pisos de elevação.

Segundo Espíndola (2017), o desenvolvimento do Datec nº 20 contribuiu para o crescimento gradual da produção de HIS em *wood frame* no Brasil, cuja difusão foi realizada principalmente por meio do acesso ao programa de financiamento habitacional. Desta forma, a construção de empreendimentos que empregam o *wood frame* e que são promovidos pelo PMCMV limitou-se as parcerias entre as construtoras interessadas na tecnologia em estrutura leve de madeira e a empresa detentora do Datec nº 20.

Além de restringir o financiamento de edificações em *wood frame* à empresa desenvolvedora do produto homologado no DATec, outras limitações para a difusão do *wood frame* no Brasil foram verificadas após a aprovação do respectivo documento. Neste sentido, ao realizar uma análise crítica do SINAT 05 perante a outras referências internacionais, Souza (2018) pontua em seu trabalho a reduzida quantidade de empresas que atuam com o tratamento autoclave exigido na diretriz de avaliação técnica. Adicionalmente, o autor também menciona a restrição dos acabamentos externos nas vedações verticais, sendo delimitados somente a aplicação de argamassa reforçada ou a *sidings* de PVC (Policloreto de Polivinila), representando barreiras a serem superadas para maior competitividade do sistema construtivo *wood frame* perante aos sistemas tradicionalmente empregados no Brasil.

Desta forma, em 2016 foram criadas as Comissões de Estudos e de Trabalho de Sistemas Construtivos *Wood Frame* com o objetivo de elaborar juntamente à ABNT uma normativa técnica para o respectivo sistema (LEITE, 2017). Após alguns anos de pesquisas e discussões, no início do segundo semestre de 2023 foi publicada a NBR 16936 – Edificações em *light wood frame*, representando um marco regulatório significativo para o setor de construção civil brasileira.

Esta norma oferece diretrizes e condições de projeto e execução para a construção do sistema em estrutura leve de madeira, estabelecendo padrões técnicos que garantem a segurança, a eficiência e a qualidade das construções. Entretanto, a sua aplicação se estende somente a unidades com até dois pavimentos, não podendo ser empregada em edificações com unidades autônomas sobrepostas.

Desta forma, com a normatização do *wood frame*, barreiras anteriores relacionadas à falta de regulamentação específica foram parcialmente superadas, permitindo que este método construtivo ganhe maior credibilidade e aceitação no mercado. A norma facilita a aprovação de projetos unifamiliares em órgãos de fiscalização e incentiva mais construtoras a adotar o sistema, pois permite que estas construções em *wood frame* tenham as suas características baseadas nas determinações apresentadas em uma norma específica, como usualmente ocorre para outros sistemas construtivos populares no Brasil.

Contudo, apesar dos avanços relevantes com a publicação da NBR 16936, ainda persistem desafios importantes que limitam a adoção mais ampla do *wood frame*, especialmente no contexto de edificações multifamiliares. Neste sentido, a restrição da construção destas tipologias à empresa detentora do DATec nº 20 mantém um cenário de exclusividade que pode conter a competitividade e a inovação no setor. Esta situação destaca a necessidade contínua de revisões regulatórias e a criação de novas diretrizes que ampliem as possibilidades construtivas com o sistema *wood frame*, facilitando também a sua adoção no caso de edificações verticais.

*2.1.2.2 Principais componentes da estrutura e vedação vertical do sistema construtivo *wood frame**

Composto por quadros estruturais de peças de madeira maciça serrada revestidos em chapas de compensado ou OSB (*Oriented Strand Board*) que funcionam como contraventamento da estrutura (SILVA, 2018), o método construtivo *wood frame* se disseminou em diversos países com tradição em construção utilizando a madeira, podendo ser mencionadas as regiões da Europa central e nórdica, bem como o Japão e os Estados Unidos da América (EUA).

De acordo com Hilgenberg Neto (2003), nos EUA o *wood frame* se desenvolveu de maneira intensa, sendo comumente utilizado um manual direcionado para enge-

nheiros na execução de habitações unifamiliares ou até para duas famílias, este documento é denominado *Wood Frame Construction Manual* - WFCM, e foi elaborado pelo *American Wood Council* – AWC (2015).

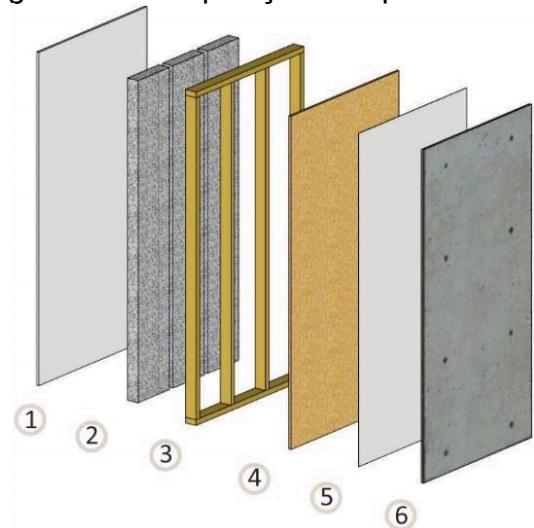
Além deste, outros manuais igualmente importantes e que podem ser citados dentre os mais tradicionais em nível mundial estão o americano *Details for Conventional Wood Frame Construction*, desenvolvido pelo *American Forest & Paper Association* (2001), o canadense *Canadian Wood Frame House Construction*, publicado pelo *Canadian Mortgage and Housing Corporation* (2013) e, o Eurocode 5: *Design of timber structures*, tendo sua última versão aprovada em 2010 pelo Comitê Europeu de Normalização (CEN).

No Brasil, conforme explanado no item anterior, já existe uma norma técnica específica com diretrizes sobre o sistema construtivo em estrutura leve de madeira, sendo proposto em seu item 7.4 uma composição básica de parede em *wood frame* com resistência ao fogo por 30 minutos. A configuração sugerida na ABNT NBR 16936 se assemelha a apresentada no DATec nº 020-E destinada a residências unifamiliares, diferindo apenas pela aplicação de chapa de OSB na face interna da vedação com tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF) de 30 minutos.

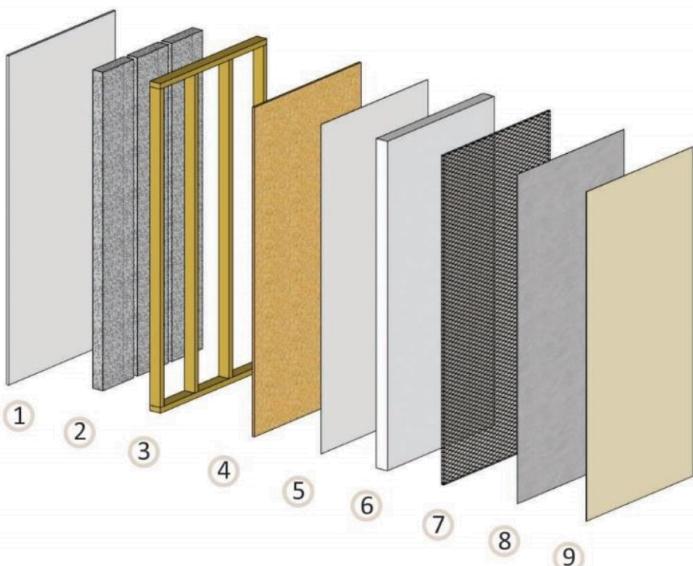
Ao sondar as configurações dos arranjos em *wood frame* mais empregados em território nacional, percebe-se que a composição indicada na normativa brasileira também é similar a um dos três casos apontados na pesquisa de Espíndola (2017) como os mais usuais no Brasil, sendo adicionados nos últimos isolantes térmicos e excluída a chapa OSB da parte interna de suas vedações. Na Figura 6 são apresentados os painéis em *wood frame* mais implantados no país de acordo com Espíndola (2017). A numeração crescente indica a ordem da parte interna para a parte externa do painel.

Como é possível visualizar na Figura 6, os arranjos apresentados diferem apenas em suas vedações externas, de forma consoante ao relatado nos trabalhos de Cardoso (2015) e Espíndola (2017), sendo preservado o conceito estrutural e as principais características do sistema construtivo tanto nas configurações mais executadas em território nacional, quanto entre as normas e manuais técnicos referências mundiais.

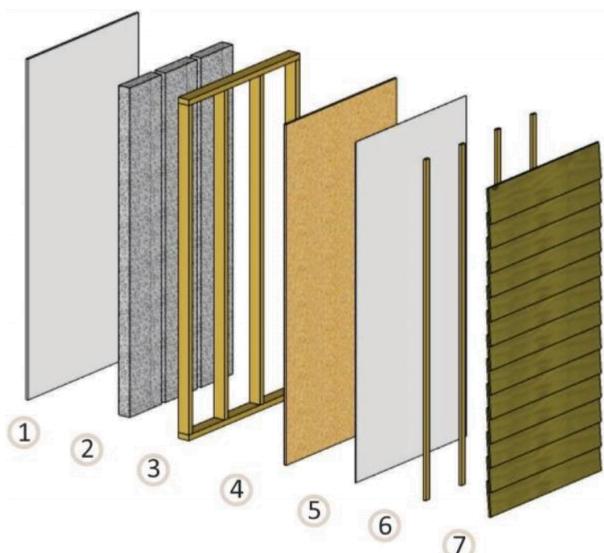
Figura 6 – Composição dos painéis em *wood frame* mais empregados no Brasil.



- 1 – Placa de Gesso Acartonado;
- 2 – Isolamento Térmico-Acústico;
- 3 – Quadro em madeira autoclavada;
- 4 – Chapa OSB;
- 5 – Membrana Hidrófuga;
- 6 – Placa cimentícia.



- 1 – Placa de gesso acartonado;
- 2 – Isolamento térmico-acústico;
- 3 – Quadro em madeira autoclavada;
- 4 – Chapa OSB;
- 5 – Membrana Hidrófuga;
- 6 – Placa de Isopor;
- 7 – Tela em fibra de nylon e poliéster;
- 8 – Estuque com massa mineral;
- 9 – Estuque com massa mineral fina;



- 1 – Placa de gesso acartonado;
- 2 – Isolamento térmico-acústico;
- 3 – Quadro em madeira autoclavada;
- 4 – Chapa OSB;
- 5 – Membrana Hidrófuga;
- 6 – Ripas para circulação de ar;
- 7 – Sidings de madeira.

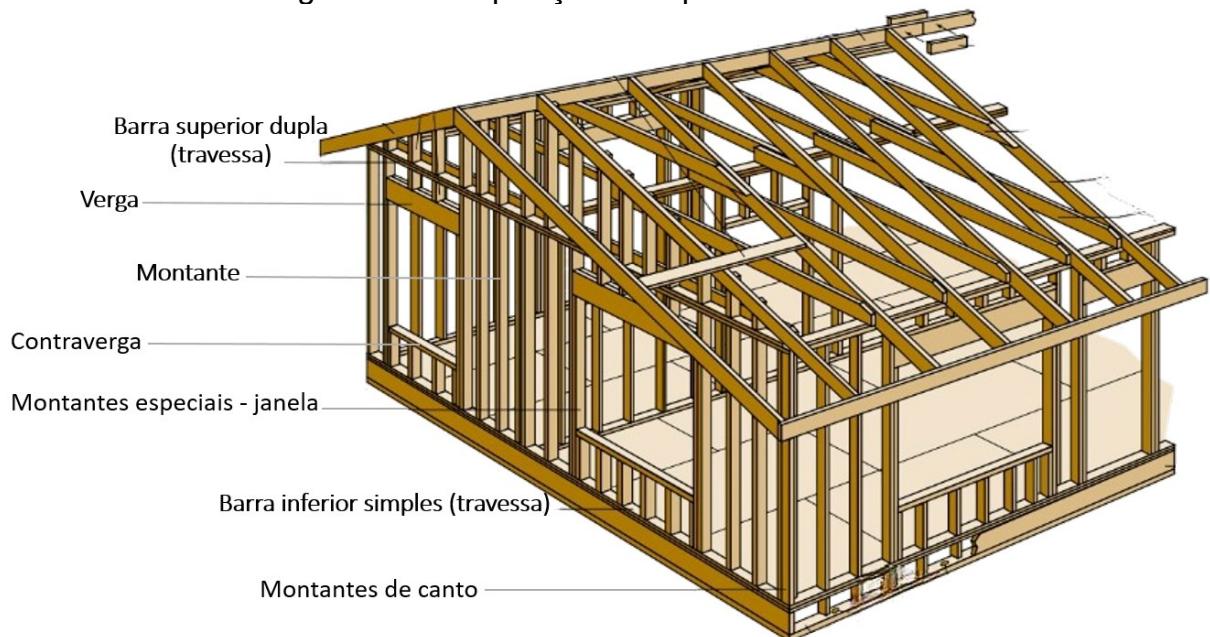
Fonte: Adaptado de Espíndola (2017).

Entretanto, podem-se notar diferenças em alguns aspectos de seus painéis, sendo adaptados conforme as condições climáticas de cada região, os materiais disponíveis e/ou a cultura regional, conforme evidenciado ao decorrer deste capítulo.

2.1.2.2.1 Peças de madeira dos quadros estruturais

Os quadros estruturais da parede em *wood frame*, também chamados de ossatura, são compostos por peças de madeira maciça e tem como principais elementos os montantes (positionados na vertical) e as travessas (ou barras) inferiores e superiores, também sendo previstas vergas e contravergas nos locais projetados para a instalação de esquadrias (SILVA, 2004; VELLOSO, 2010). A Figura 7 ilustra a composição dos quadros estruturais.

Figura 7 – Composição dos quadros estruturais.



Fonte: Adaptado de APA (1997).

O conjunto da ossatura em madeira tem o objetivo de resistir as cargas verticais, oriundas da cobertura ou de pavimentos superiores, e as cargas horizontais, atribuídas à força do vento ou a eventos de origem sísmica (VELLOSO, 2010; ZAPARTE, 2014). Com relação as dimensões, as medidas mais comuns indicadas para os montantes da ossatura de paredes externas correspondem a 2 x 4 polegadas, 2 x 6 polegadas ou 3 x 4 polegadas, nos Estados Unidos e Canadá (CMHC, 2013; AF&PA, 2001), e 38 mm x 89 mm no Brasil, com tolerância de 1,5 mm (BRASIL, 2023).

De forma geral, as dimensões dos banzos superiores e inferiores são equivalentes as adotadas para os montantes, cuja definição da seção e do espaçamento entre estes difere de acordo com as cargas previstas em projeto e do número de pavimentos da edificação (SILVA, 2004; VELLOSO, 2010). No banzo superior do painel, utilizam-se duas peças para travamento dos quadros, propiciando maior rigidez à flexão.

Diferente dos manuais elaborados nos países da América do Norte e das diretrizes normativas brasileiras, o Eurocode 5: *Design of timber structures* não estabelece medida mínima para os montantes, mas menciona que o painel com função estrutural deve possuir a largura da seção de seu montante no mínimo equivalente a 25 % de sua altura (EN, 2004).

O espaçamento e a profundidade dos montantes dos quadros estruturais influenciam diretamente no isolamento dos painéis que formam as paredes em *wood frame*. Thallon (2008) comenta que nos Estados Unidos existe uma crescente adoção de montantes de 2 x 6 polegadas originada em função da espessura final da parede, que propicia maior espaço interno para instalação de isolantes térmicos compensando o maior consumo de madeira (aproximadamente 20% a mais em relação à seção de 2 x 4 polegadas).

Segundo o APA (2014), as novas construções americanas adequam o espaçamento e a profundidade dos montantes de acordo com a zona climática, de modo a atender aos requisitos do programa *Energy Star4*, desenvolvido pela *Environment Protection Agency* (Agência de Proteção Ambiental) com o objetivo de padronizar o consumo eficiente de energia. Nas zonas climáticas 1 a 4, por exemplo, onde predomina o clima quente, os montantes possuem seção de 38 mm x 140 mm e espaçamento de 400 mm, enquanto nas zonas de 5 a 8, caracterizadas pelo clima frio, o espaçamento adotado é de 600 mm.

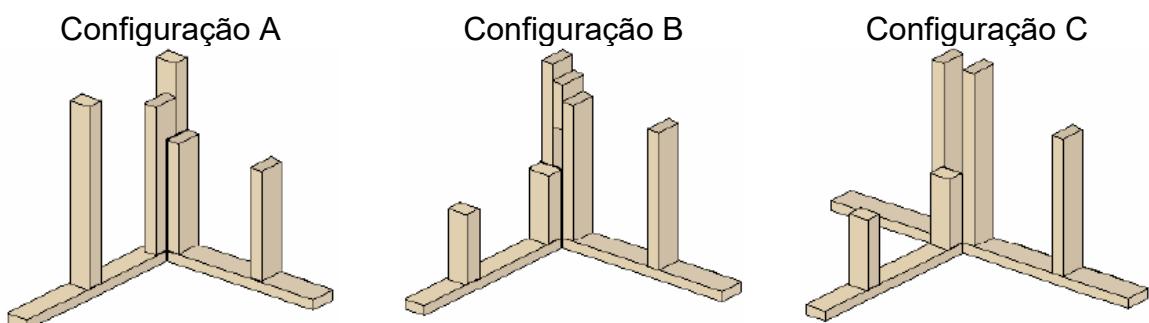
Outro aspecto construtivo dos quadros estruturais está relacionado às regiões de interseções entre as paredes, locais em que as tensões são maiores e, por consequência, os montantes devem resistir a esforços mais elevados. Nestes locais, tanto as normativas norte-americanas quanto o DATec nº 20 - E recomendam, no mínimo, a utilização de montantes duplos. A Figura 8 ilustra diferentes soluções construtivas para cantos e as interseções entre paredes.

O detalhe construtivo do arranjo A é indicado tanto pelo manual americano quanto pelo canadense citados acima, enquanto a configuração B é apresentada no Documento de Avaliação Técnica brasileiro e no manual americano, sendo ambas as

configurações executadas nos encontros de painéis de parede a 90°. Já a configuração C refere-se aos encontros em formato “T”, sendo exibidas nos dois manuais norte-americanos.

Em conformidade com o expresso na ABNT NBR 7190, o projeto de estruturas de madeira deve ser confeccionado considerando as diferentes classes de umidade, de maneira a regular as propriedades de resistência e rigidez do material tendo em vista as condições ambientais onde as estruturas serão executadas. Ademais, a normativa também delimita os métodos de tratamentos preservativos (BRASIL, 2022).

Figura 8 – Detalhes das interseções entre paredes.



Fonte: Silva (2004).

Desta forma, tanto o DATec nº 20 – E quanto a ABNT NBR 16936 utilizam como padrão de referência a classificação 1, que corresponde ao teor de umidade de equilíbrio da madeira de 12% (BRASIL, 2023). Esta referência também é empregada no Eurocode 5: *Design of timber structures* (EN, 2004), enquanto os guias canadenses e americanos recomendam que as peças possuam umidade igual ou inferior à 19% no momento de utilização (CMHC, 2013; AF&PA, 2001).

No tocante a resistência à compressão paralela as fibras, de acordo com o SINAT nº 05 (2023) e com a ABNT NBR 16936 (2023), esta deve atender a classe mínima C20, sendo a madeira obrigatoriamente proveniente do grupo das coníferas. Na Europa, a EN 338 (2009) – *Structural timber: Strength Classes* está compreendida dentre as principais normativas do continente, apresentando uma classificação quanto a resistência a flexão a ser atendida pela madeira estrutural, que deve ter um valor mínimo de 14 N/mm² (classe C14).

Neste aspecto, é importante ressaltar que as espécies empregadas em estruturas variam em conformidade com a disponibilidade de cada região. Em países localizados a leste do continente europeu, por exemplo, o Pinheiro Bravo (*Pinus Pinaster*),

pertencente à classificação C18 (resistência à flexão de 18 N/mm²) e com valor médio de resistência à compressão paralela às fibras (fc0) de 35,1 MPa, esta dentre as espécies mais utilizadas na construção civil destes países (LOUSADA *et al.*, 2008).

Além do *Pinus*, outras espécies podem ser aplicadas na execução do *wood frame*, como o *Douglas Fir* ou, *Pseudotsuga menziesii*, também conhecido no Brasil como Pinheiro-do-Oregon. Esta espécie proveniente de florestas plantadas é utilizada com frequência na construção civil dos Estados Unidos e Canadá, possuindo valor médio de resistência à compressão paralela às fibras (fc0) de 43 MPa (PIZZONI, 2017).

Apesar do rápido crescimento e fácil manejo (PICHELLI, 2020), o cerne do gênero *Pinus* possui baixa resistência ao ataque dos organismos xilófagos, como insetos, fungos e perfuradores marinhos (NBR 16143, 2013). Portanto, para seu emprego em quadros estruturais se faz necessária a impregnação de produtos preservantes.

Quando destinadas ao uso estrutural, as normativas NBR 7190 (1997) e NBR 6232 (2013) indicam a impregnação em autoclave como tratamento mínimo para as coníferas, devendo o produto ser tratado conforme a NBR 6232 – Penetração e retenção de preservativos em madeira tratada sob pressão e, a NBR 16413 – Preservação de madeira – Sistemas de categorias de uso (BRASIL, 1997; BRASIL, 2013).

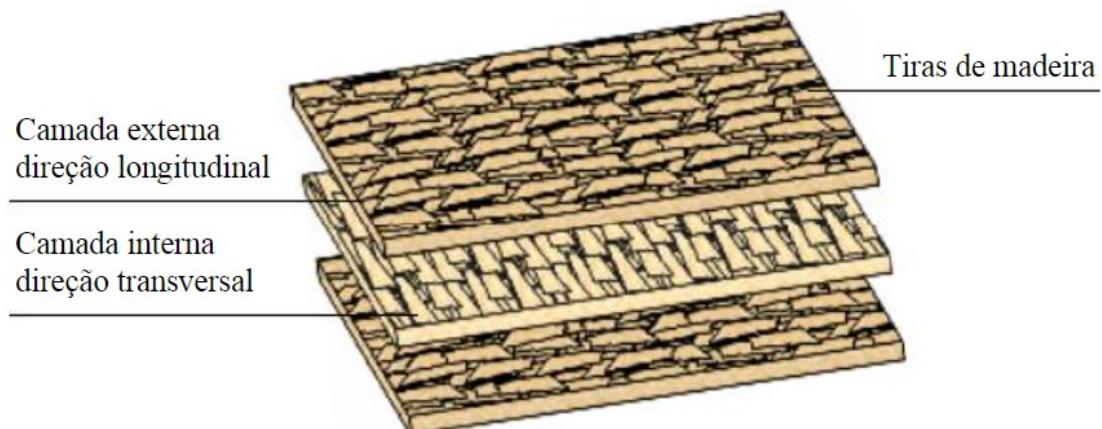
De acordo com as normas, existem 4 tipos de preservativos utilizados, sendo responsáveis por cerca de 80% da madeira tratada, como o Óleo Creosoto, CA-B (Cobre e Azóis tipo B), CCA (Cromo-Cobre-Arsênio) e CCB (Cromo-Cobre-Boro) (BRASIL, 2013). Estes produtos são especificados no DATec nº 20 - E para o tratamento sob pressão das peças estruturais que compõem as edificações em *wood frame*, devendo obter total penetração no alburno e, alterando sua concentração conforme o número de pavimentos da edificação a ser implantada (BRASIL, 2023). Já a NBR 16936 indica o tratamento com CCA para a estrutura com TRRF de 30 minutos (ABNT, 2023).

2.1.2.2.2 Painéis de OSB

Os painéis de madeira surgiram com o objetivo de minimizar as variações dimensionais da madeira maciça, bem como, reduzir seu peso e custo à medida que mantém suas propriedades isolantes e acústicas (IPT, 2007). De acordo com Iwakiri *et al.* (2003), estes painéis podem ser classificados em dois grupos principais: os compostos laminados (painéis compostos por lâminas de madeira) e os compostos partículados (painéis compostos por partículas e fibras de madeira).

Dentre os compostos particulados está o painel de OSB (*Oriented Strand Board*), comumente aplicado nos envelopes das paredes em *wood frame* exercendo função estrutural e de fechamento. Iwakiri *et al.* (2003), define a chapa OSB como um painel estrutural formado por diversas camadas de tiras de madeira orientadas entre si perpendicularmente, conferindo maior resistência mecânica e rigidez a sua estrutura (Figura 9). Os painéis minerais são fabricados a partir da mistura entre partículas de madeira com um aglutinante mineral (resina) e aditivos químicos, sendo consolidadas através da prensagem a frio.

Figura 9 – Composição e orientação das camadas do painel OSB.



Fonte: Silva (2004).

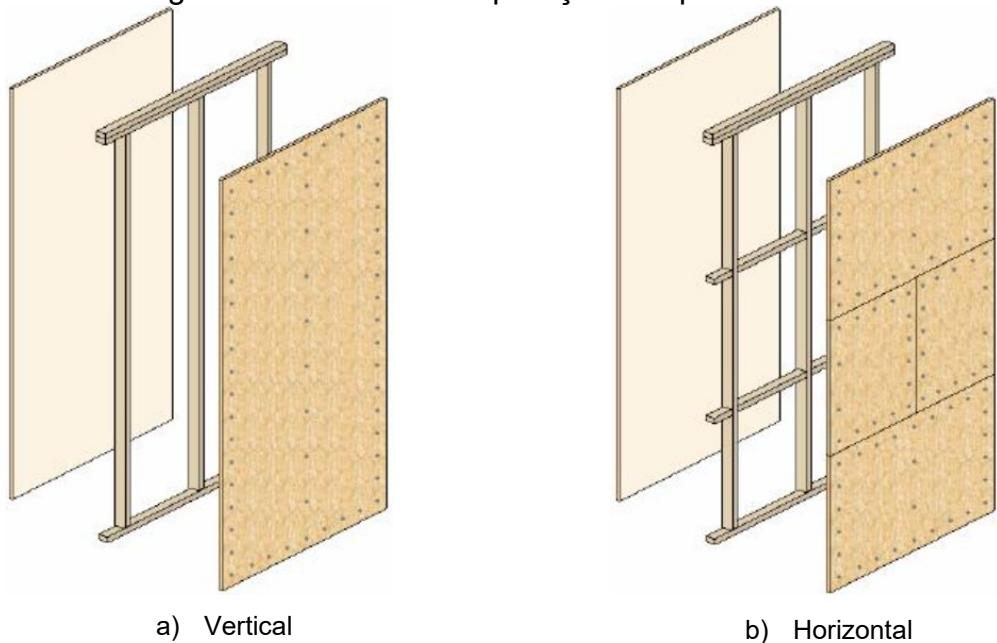
Santos e Szücs (2010), relatam que a fixação das chapas de OSB à ossatura de madeira maciça contribui para prevenir a flambagem de seus montantes, auxiliando também na estruturação do painel, que se comporta de maneira similar a uma parede diafragma. Velloso (2010) e Zaparte (2014), mencionam ainda que, juntamente com a ossatura em madeira, a vedação das chapas OSB também suportam as cargas verticais e horizontais atuantes na edificação, conferindo maior estabilidade ao entramado (quadro estrutural) quando instaladas tanto em sua superfície interna quanto a externa.

A fixação destes painéis pode ocorrer tanto no sentido vertical quanto no horizontal (Figura 10). Conforme Thallon (2008), nos casos em que o pé-direito da edificação seja equivalente à altura do painel em OSB, a fixação vertical é a mais indicada pois permite que todo o contorno da placa encontre apoio nos montantes e nas travessas da ossatura.

A instalação na horizontal é recomendada quando as paredes possuem alturas superiores aos das chapas comercializadas ou, quando o painel OSB recebe revestimento de argamassa, gerando solicitações mais acentuadas na direção perpendicular

à superfície da chapa. Neste caso, a orientação das fibras da madeira é mais favorável para vencer o vão entre montantes, melhorando a rigidez. Nesta disposição, é necessária a inserção de elementos bloqueadores que servem de base para a fixação de pregos conectando os montantes adjacentes, bem como, atuando como obstáculo à propagação do fogo em situações de incêndio (THALLON, 2008).

Figura 10 – Sentido de aplicação dos painéis OSB.



Fonte: Silva (2004).

Quanto as características do painel OSB, A Diretriz SiNAT nº 05 delimita as chapas a serem aplicadas aos requisitos da EN 300 (2006) – OSB: *definitions, classification and specifications*, sendo objeto de ensaios e análises relacionados a: classificação quanto ao uso, índices de umidade, resistência à flexão, inchamento da chapa e, resistência aos organismos xilófagos (BRASIL, 2020).

De acordo com a normativa europeia, a variação máxima permitida para as dimensões das chapas supracitadas é de $\pm 0,8\%$ em relação a espessura e, até 3,0 mm para o comprimento e largura. O inchamento na espessura deve ser menor ou igual a 25% para o tipo 1, 20% para o tipo 2, 15% para o tipo 3 e 12% para o tipo 4, enquanto o teor de umidade no momento da utilização varia entre 2% até 12% para as chapas do tipo 1 e 2 e, entre 5% e 12% para aquelas enquadradas como tipo 3 e 4 (EN, 2006).

A especificação da chapa a ser empregada também considera o local de utilização para as edificações destinadas ao uso habitacional, sendo classificadas conforme o ambiente a ser empregada, como condições secas ou úmidas. Na combinação de uso interno em ambientes secos, as chapas do tipo 2 podem ser adotadas, enquanto para o uso externo e áreas molhadas devem ser escolhidas as do tipo 3 (BRASIL, 2023).

No Canadá, conforme estabelece o *Canadian Wood Frame House Construction* (2013), juntamente ao painel OSB deve ser instalado um adesivo fenólico a prova d'água. As chapas possuem medidas de 1.200 mm x 2.400 mm e, a espessura mínima se altera conforme o espaçamento entre os montantes, sendo de 7,9 mm, quando o espaçamento for de 600 mm, e de 6,35 mm, para distância igual a 400 mm. De acordo com o CWFHC (2013), os painéis OSB geralmente são dispostos verticalmente sendo previstos espaços de 2 a 3 mm entre as chapas com o objetivo de permitir a expansão destas sem deformação.

No comércio nacional, os painéis fabricados possuem diferentes espessuras e dimensões, cuja variação considera o uso e o espaçamento dos montantes. No que tange a vedação de paredes, as chapas de 9,5 mm e 11,1 mm são encontradas nos tamanhos 1.200 x 2.400 mm e 1.200 x 3.000 mm, sendo recomendadas para o fechamento de paredes com montantes espaçados no máximo a 400 e 600 mm, respectivamente. Também são produzidos painéis com espessura de 15,1 mm, podendo ser aplicados em paredes com perfis posicionados em intervalos de no máximo 600 mm (LP, 2017).

Em conformidade com a norma brasileira ABNT NBR 16143 (2013), o painel OSB pode estar compreendido nas categorias 2, 3 ou 4 da EN 300 (2006). Para a classe 2, aplicada no interior da edificação, o inseticida Ciflutrina deve ser adicionado à cola durante o processamento da chapa. Já para o uso 3 e 4, adotado no uso externo ou em áreas molhadas, o tratamento deve ser realizado com CA-B, CCA-C ou CCB, obtendo 100% de penetração nas lâminas de madeira.

2.1.2.2.3 Componentes de fechamento e/ou acabamento externos e internos

Como pode ser observado na Figura 6, a madeira dos quadros e painéis estruturais não fica aparente, sendo envolvida por revestimentos internos e externos. O último mencionado tem como função a proteção contra as intempéries e a degradação

prematura, tornando necessária a adoção de um material com propriedades impermeabilizantes.

Dentre os acabamentos mais utilizados estão as réguas de madeira ou PVC (*sidings*) aplicadas na vertical ou horizontal, tijolos cerâmicos, estuque, dentre outros (APA, 2016). Outros revestimentos mais tradicionais como argamassa armada e placas cimentícias também são empregados.

No Brasil, conforme ilustrado na figura 9, o DATec nº 020-E prevê o revestimento externo das chapas OSB realizado através do emprego de placas cimentícias com classificação mínima igual a A3, conforme a ABNT NBR 15498 (BRASIL, 2020). Outras características definidas se referem a espessura de 8mm, a densidade de 850kg/m³ e, a variação dimensional média de aproximadamente 2mm/m.

Estas placas recebem como acabamento superficial selador, textura acrílica e tratamento para as juntas, que podem ser aparentes ou dissimuladas.

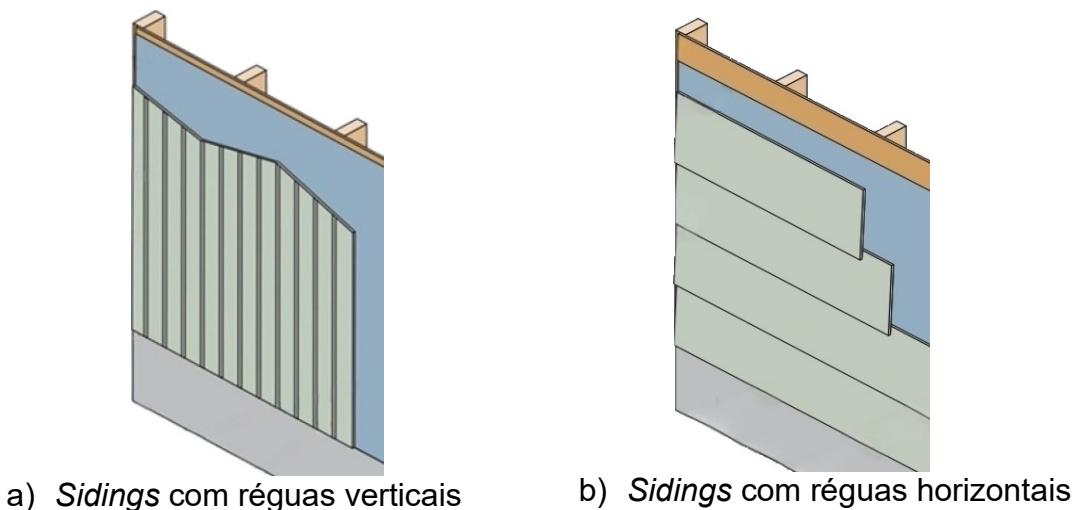
Para o tratamento de junta do tipo aparente, as bordas laterais das placas cimentícias não apresentam rebaixos, sendo essas fixadas de modo a conformar uma junta de 3mm a 5mm. O tratamento de juntas do tipo aparente consiste em aplicação de selante a base de poliuretano com tempo de cura de 24h e capacidade de deformação de 25% nas juntas entre placas cimentícias. O tratamento de juntas do tipo dissimulada consiste em aplicação de massa de base acrílica nas juntas das placas cimentícias com bordas rebaixadas, seguida da aplicação de fita telada de fibra de vidro álcali-resistente com largura de 100mm em toda a superfície da junta sobreposta por argamassa polimérica de base cimentícia (base coat). (BRASIL, 2023, p. 89, p. 9-10).

Conforme comenta Pizzoni (2017), as juntas previstas nas fachadas são fundamentais para absorver as reações físicas que ocorrem nos materiais, como dilatações originadas pelas variações de temperatura, evitando o surgimento de patologias como rachaduras, fendas ou fissuras que podem comprometer a durabilidade da estrutura.

Neste sentido, as placas cimentícias podem possuir melhor desempenho quando comparada a revestimentos externos em madeira, cuja performance é fortemente afetada por fatores como a espécie de madeira escolhida, a orientação das fibras, a compatibilidade dos sistemas de acabamentos, o tipo de tratamento preservativo empregado e, a periodicidade da manutenção (CAMPOS, 2000).

Apesar disso, em países norte-americanos os *sidings* de madeira são comumente usados como revestimento externo. De acordo com Velloso (2010), este material consiste em ripas tratadas quimicamente e dispostas na horizontal ou vertical, as quais são empilhadas e instaladas de forma sobreposta, conforme mostra a Figura 11. Esta sobreposição funciona como uma pingadeira, impedindo o acúmulo de água na base da parede.

Figura 11 – Revestimento externo em *sidings*.



Fonte: Adaptado de APA (2019).

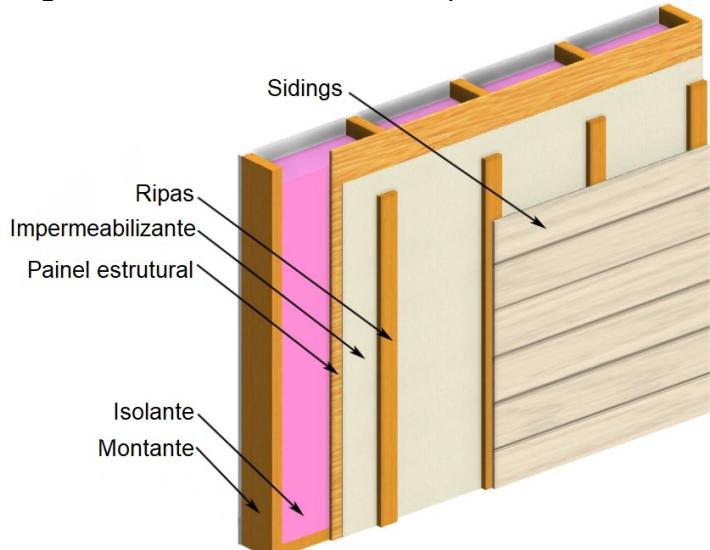
O autor também ressalta a importância em barrar à penetração da água da chuva nas paredes externas através de estratégias como: a escolha de revestimento externo com desempenho satisfatório quanto as propriedades impermeabilizantes; a vedação em torno de portas e janelas e, a utilização de membranas de impermeabilização. No caso da última citada, a membrana hidrófuga se mostra adequada pois permite a saída de vapor e umidade interna da edificação, possibilitando a redução de incidência de mofo e bolores nas paredes, ao mesmo tempo que, impede a entrada de água que pode passar pelo acabamento externo (CMHC, 2013).

A posição da instalação da membrana entre as camadas do envelope da parede deve considerar o clima local. De acordo com o CMHC (2013), em regiões mais frias, onde o aquecimento do ambiente interno se torna necessário, a membrana deve ser fixada na face interna da parede, pois impede a passagem de umidade para o interior da mesma. Já em climas quentes, a membrana deve ser fixada nas camadas externas, onde a superfície é mais aquecida.

Neste contexto, o DATec nº 020-E determina que as membranas hidrófugas sejam fixadas através de grampos nos painéis OSB do revestimento externo, enquanto a AWC (2015), estabelece que a membrana hidrófuga deve ser grampeada imediatamente na parede seca ou outro acabamento interno, de forma a garantir uma proteção adequada contra o vapor. No entanto, convém reportar que em alguns estados americanos são seguidas as orientações desenvolvidas especificamente para àquela região, como é o caso da Pensilvânia, onde a organização de pesquisa do *Pennsylvania Housing Research Center – PHRC* (2016), recomenda a instalação da barreira impermeabilizante na face externa das paredes das fachadas.

Velloso (2010) comenta ainda que uma forma de garantir a durabilidade dos *sidings* é obtendo um espaço para circulação de ar caso a água consiga penetrar pela barreira de proteção, facilitando a secagem das peças de madeira usadas no revestimento externo. Esse tipo de painel é conhecido como parede *rainscreen*, ou tela de chuva, no qual são fixadas ripas após a instalação da camada impermeabilizante, o que facilita a instalação das réguas externas e forma os espaços ventilados, conforme ilustrado na Figura 12.

Figura 12 – Estrutura de uma parede *rainscreen*.



Fonte: Adaptado de PHRC (2016).

Em relação as dimensões, o *Wood Frame Construction Manual for One and two Family Dwellings* (2015), da AWC (American Wood Concil), indica medidas para o revestimento de *sidings* de madeira correspondentes a 20 mm x 184 mm até 20 mm x 254 mm, enquanto o espaçamento entre as ripas deve ser de 300 mm ou 600 mm. Já o CWFHC (1997), recomenda a espessura mínima de 17 mm para as réguas de

madeira e, largura entre 140 a 286 mm, sendo as peças tratadas com preservantes geralmente utilizados em processos submetidos a pressão.

Conforme destaca Barata (2008), o arranjo dos painéis com lâmina de ar ventilada na face externa da parede *wood frame*, além de facilitar a secagem das peças de madeira, também pode propiciar uma melhoria do desempenho térmico da edificação.

Para o revestimento interno das chapas OSB o material mais utilizado é o gesso acartonado, também conhecido como *drywall*, o qual melhora o desempenho acústico e térmico das paredes e, desempenha a função de bloquear o acesso das chamas de um incêndio a estrutura de madeira. Além disso, o gesso acartonado permite a aplicação de diversos tipos de revestimento, desde uma simples pintura até o assentamento de revestimentos cerâmicos.

O DATec nº 020-E orienta a instalação de chapa de *drywall* com 12,5 mm de espessura e densidade de massa aparente de 750kg/m³. São especificadas duas classes para utilização: a chapa de gesso tipo *Standard* (ST) e, a chapa de gesso Resistente à Umidade (RU), devendo ser especialmente empregada em áreas molhadas (banheiro) e molháveis (cozinha, lavanderia), bem como, revestida com placas cerâmicas assentadas com argamassa colante do tipo ACII até pelo menos 1,50 m de altura em relação ao piso (BRASIL, 2020).

As chapas de gesso tipo RU especificadas DATec nº 020-E devem atender a ABNT NBR 14715: “Chapas de gesso para *drywall* – Parte 1: Requisitos”, com a adoção dos tratamentos impermeabilizantes previstos na ABNT NBR 15758: “*drywall* - Projeto e procedimentos executivos para montagem Parte 1: Requisitos para sistemas usados como paredes”. As juntas entre chapas de gesso são dissimuladas e recobertas com massa e fita celulósica para gesso acartonado (BRASIL, 2020).

2.1.2.2.4 Produtos Isolantes

As várias camadas de painéis que constituem o sistema construtivo em *wood frame* apresentam uma alta resistência acústica e térmica, possibilitando que o isolamento térmico-acústico seja dispensável, o que por consequência diminui o custo da construção (BRASIL, 2017). Entretanto, caso se demonstre necessário é possível potencializar o isolamento térmico das vedações empregando materiais isolantes que podem ser facilmente instalados nas cavidades da ossatura do painel estrutural em madeira.

De acordo com Espíndola (2017), os materiais isolantes são especificados considerando fatores como o clima, orientação solar e outras variáveis ambientais características do local em que a edificação será implantada. Segundo Franzen (2015), nas construções brasileiras o isolamento mais comum é o feito com mantas e feltros.

O DATec nº 020-E prevê o emprego de lã de rocha ou lã de vidro (Figura 13) servindo como isolantes termo-acústicos das paredes, os quais, conforme apresentado na ABNT NBR 15220-2 (2022), possuem coeficientes de condutibilidade térmica superior ao PUR (espuma rígida de poliuretano), com condutibilidade térmica igual a 0,030 W/(m.k). Esta situação pode decorrer do elevado valor monetário do PUR, que mesmo tendo melhor desempenho quanto a sua capacidade de isolamento, inviabiliza sua aplicação em habitações de interesse social.

Figura 13 – Isolamento de manta de lã de vidro em quadro estrutural de madeira.



Fonte: Espíndola (2017).

Na ABNT NBR 16936 (2023), os materiais isolantes são previstos somente nas interfaces de caixas elétricas instaladas nas paredes em áreas secas, servindo como absorventes acústicos, sem função de isolamento térmico.

Conforme Carmody e Weber 2007 *apud* Franzen (2015), os materiais isolantes são capazes de manter o ar seco e confiná-lo no interior das células mais ou menos estanques, sendo que, quando bem executado, este sistema auxilia na redução da entrada de ar, na transferência de calor e, no controle da umidade.

Maiores detalhes referentes a estrutura e as vedações externas, bem como, informações relacionadas a outros subsistemas do *wood frame*, como fundações, pisos e cobertura, podem ser consultados nas normativas, manuais e demais trabalhos técnicos mencionados no decorrer do item 2.1.2 deste trabalho.

2.2 CONSUMO ENERGÉTICO DAS EDIFICAÇÕES

O crescimento acentuado do consumo de energia nas últimas décadas trouxe a preocupação com o uso da eletricidade. Esta premissa se deve à associação de sua maior demanda com adventos como a possibilidade de esgotamento dos recursos vinculados a sua geração, os grandes impactos ao meio ambiente ocasionados em meio a sua produção, bem como, ao aumento dos gastos com tarifas de energia elétrica (TEODORO, 2017).

Nesta conjuntura, o setor de edificações tem destaque na esfera nacional por possuir grandes consumidores de energia, sendo que o conjunto de edificações residenciais, comerciais e públicas, demanda aproximadamente 1/6 do consumo de energia e mais de 50% da eletricidade distribuída no Brasil (EPE, 2020). No caso das edificações residenciais, especificamente, estas demandaram em 2022 o equivalente a 26,6% da totalidade de energia elétrica do país (conforme comentado brevemente no capítulo 1), ocupando a segunda colocação em comparação com os demais setores (EPE, 2023).

Convém mencionar que no setor industrial – único com maior consumo de energia em relação ao habitacional – a energia elétrica despendida para a produção de aço e cimento foi a com maior crescimento em 2021, somando juntos um aumento de 21,83% em relação ao registrado no ano anterior (EPE, 2022). Estes materiais majoritariamente empregados na construção civil evidenciam a necessidade de renovação quanto aos materiais aplicados nas edificações, dando preferência àqueles ambientalmente mais vantajosos.

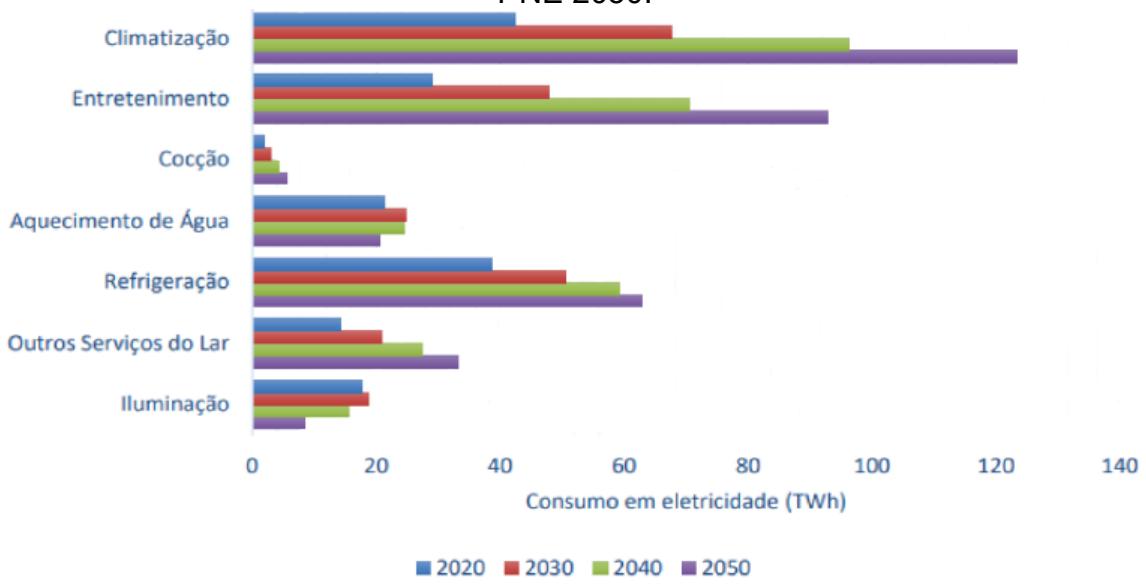
No tocante a contribuição dos domicílios, nota-se que o aumento da renda média das famílias em detrimento da maior estabilidade econômica dos anos 2000, criou condições para atender parte da demanda de energia reprimida nas habitações brasileiras. Com isso, segundo o Plano Nacional de Energia 2050 (PNE 2050) elaborado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), considerando a evolução do número de moradias, a renda per capita e a posse/uso de equipamentos eletrodomésticos, projeta-se a longo prazo um papel essencial na redução da demanda energética para este setor. Estima-se um crescimento médio de 1,5% no consumo final de eletricidade entre 2015 a 2050 (EPE, 2020).

De acordo com o PNE 2050 (EPE, 2020), o consumo de eletricidade no setor residencial é dividido em diferentes usos finais, tais como entretenimento (televisão e

computadores), cocção (preparo de alimentos e bebidas), climatização (condicionadores de ar e ventiladores), aquecimento de água, refrigeração (geladeira e freezer), iluminação e outros serviços vinculados as necessidades individuais dos moradores e a manutenção do lar (máquina de lavar roupas, aspirador de pó, dentre outros).

Conforme apresentado na Figura 14, apenas os usos relacionados à iluminação e aquecimento de água apresentarão redução até 2050, sendo esta circunstância ocasionada pela substituição de lâmpadas ineficientes e à diminuição do número de habitantes por moradia em todas as classes sociais, respectivamente (EPE, 2020).

Figura 14 - Estimativa do consumo de eletricidade por uso final no setor residencial – PNE 2050.



Fonte: PNE 2050 (EPE, 2020).

Dentre os diversos usos de eletricidade relacionados ao setor residencial, aqueles que apresentarão aumento na demanda incluem entretenimento, cocção, refrigeração, outros serviços do lar e, principalmente, climatização. Segundo a EPE, o aumento no consumo de eletricidade para entretenimento é justificado pela futura facilidade de acesso a equipamentos como smartphones, notebooks, vídeo games e televisão. Já para a cocção, é considerado o uso cada vez maior de equipamentos elétricos para aquecer alimentos.

No caso da refrigeração, apesar do aumento no número de novos refrigeradores nas residências, o consumo de eletricidade será baixo, pois é prevista a entrada de equipamentos mais eficientes no mercado. Quanto aos equipamentos de condicionamento de ar, embora haja uma melhoria na eficiência energética, o aumento na aquisição desses dispositivos fará com que, segundo as projeções da EPE, a energia

gasta com climatização ultrapasse todos os outros usos nas unidades habitacionais brasileiras a partir de 2020.

Como pode ser observado na Figura 14, o consumo de energia elétrica para climatização já lidera dentre os demais usos que requerem energia elétrica para seu funcionamento, despontando até 2030 com larga vantagem frente as outras atividades domiciliares que também carecem de eletricidade. Estes dados sugerem que a melhoria na sensação do conforto térmico pelos usuários das habitações pode ser considerada um fator primordial na contenção do consumo de energia elétrica nas próximas décadas, visto que a climatização está intimamente relacionada ao maior condicionamento ambiental das residências.

Estas projeções encontram-se alinhadas com o exposto no documento *The Future of Cooling*, publicado em 2018 pela *International Energy Agency* (IEA), o qual indica que, devido ao forte crescimento do uso de energia para a climatização, a eletricidade requerida para alimentar os domicílios mais que duplicará até 2050, passando de 6% para 14%. Neste cenário, a participação do resfriamento no uso total eletricidade em edifícios partirá de 18% para quase 30% até 2050, aumentando sua participação no uso da eletricidade global de 10% para 16% no mesmo período.

Segundo a IEA (2018), a maior demanda para suprir necessidades atreladas ao condicionamento de ar atingirá tanto as economias emergentes quentes e úmidas, como o Brasil, onde a renda *per capita* está aumentando, quanto as economias altamente industrializadas, onde as expectativas do consumidor para o conforto térmico ainda estão crescendo.

De acordo com o redigido no *The Future of Cooling*, o design e a arquitetura dos edifícios têm um grande impacto na necessidade de resfriamento mecânico e outros serviços energéticos. Conforme relatado no documento, os materiais utilizados na envolvente externa dos edifícios, como a cobertura, tetos, paredes exteriores, portas, janelas e fundações, podem afetar tanto a temperatura sentida pelo usuário quanto o ganho de calor solar nas edificações. Apesar disso, embora a energia devesse ser um dos principais fatores levados em consideração durante a tomada de decisões de projeto e construção, muitas vezes esta é ignorada devido à preocupação exclusiva com os custos (IEA, 2018).

Referente as vedações verticais externas, é comentado ainda sobre a importância da massa térmica para o resfriamento (e aquecimento) do ambiente, já que esta é capaz de manter a temperatura por mais tempo e criar uma barreira natural entre as

temperaturas interior e exterior, aumentando o conforto térmico. Em sistemas construtivos mais leves (como o *wood frame*), a baixa massa térmica pode ser compensada com o uso de isolantes, os quais devido a sua alta resistência térmica conseguem reduzir o calor que entra nas edificações, promovendo de forma concomitante o aumento do conforto e a redução no consumo de energia elétrica. Além deste, outra solução mencionada se refere a espaços contendo a vedação de ar na estratigrafia das paredes (envelopes herméticos), os quais podem impactar na quantidade de calor que entra nos edifícios (IEA, 2018).

Desta forma, é possível reconhecer que embora as edificações residenciais tenham contribuído com o aumento no consumo de energia nas últimas décadas, elas também apresentam um grande potencial para minimizar este consumo (CBIC, 2017). No entanto, para que se alcance este potencial, é necessário que concepções mais eficientes de projeto sejam visadas desde a sua etapa inicial.

Assim sendo, a envoltória tem a função primordial de controlar os ganhos térmicos de forma a gerar um balanço que reduza o tempo de uso dos sistemas de condicionamento artificial de ar. Portanto, torna-se de suma importância o estudo e escolha de tipologias com composições construtivas termicamente mais eficientes para a aplicação nas vedações verticais externas das habitações, uma vez que estas influenciam significativamente no maior ou menor consumo de energia elétrica das mesmas (CARVALHO, ROVERE, GONC, 2010; SANTOS, SOUZA, 2012; SOZER, 2010; SUN, GILES, LIAN, 2014).

Nesse sentido, segundo Pizzoni (2015), as construções em madeira podem se mostrar uma escolha vantajosa pois requerem menor consumo de energia em todas as fases do seu ciclo de vida. Além disso, os componentes pré-fabricados de madeira demandam menos energia na sua fabricação e manutenção e, emitem menos CO₂ durante sua vida útil.

2.3 NORMATIVAS PARA AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO ENERGÉTICO DAS HABITAÇÕES NO BRASIL

O crescente aumento no consumo de energia elétrica aliado a falta de investimento no setor e, à escassez de chuva, resultaram em uma forte crise energética no Brasil durante o período de 1999 a 2002, levando ao racionamento de energia a população (PEROBELLI; OLIVEIRA, 2013). Mediante este cenário, políticas públicas visando a maior eficiência energética das edificações vem sendo desenvolvidas desde

o início dos anos 2000, sendo impulsionada pela aprovação da Lei nº 10.295, também conhecida como Lei de Eficiência Energética (LEE) (BRASIL, 2001).

Esta estabeleceu a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia, na qual foi instituída a necessidade de determinar níveis máximos de consumo de energia para equipamentos fabricados ou comercializados no país, bem como, promover a eficiência energética nas edificações construídas no país (BRASIL, 2001). Tais programas incentivaram a melhoria da eficiência energética e a conscientização acerca da importância de hábitos apropriados em relação ao consumo de energia, tendo seus efeitos notados gradualmente (BRASIL, 2020).

Em sequência, no ano de 2003, foi criado o Programa Nacional de Eficiência Energética em Edificações, denominado PROCEL Edifica, com a finalidade de incentivar o uso racional de energia elétrica em edificações residenciais e comerciais, reduzindo desperdícios e impactos sobre o meio ambiente (PROCEL, 2006).

No que tange as edificações residenciais, uma das iniciativas do Inmetro em parceria com o Procel Edifica foi a aprovação do Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais – RTQ - R, que buscou atender ao que dispõem a Lei de Eficiência Energética. O RTQ-R foi aprovado pela Portaria Inmetro nº 449 em 2010, sendo regido atualmente pela Portaria Inmetro nº 18 de 2012 (BRASIL, 2010, 2012). Esse regulamento definiu métodos e requisitos técnicos para a classificação da eficiência energética em edificações residenciais unifamiliares e multifamiliares, unidades habitacionais autônomas e áreas de uso comum em edifícios multifamiliares. A eficiência energética pode ser classificada através de dois métodos: o prescritivo ou de simulação, sendo que ambos consideram em sua análise o desempenho térmico da envoltória e o sistema de aquecimento de água, bem como o sistema de iluminação artificial, elevadores e equipamentos das áreas de uso comum, quando for aplicável. A classificação varia de A "mais eficiente" a E "menos eficiente" (BRASIL, 2012).

Apesar destes progressos, limitações referentes aos métodos de avaliação da eficiência energética do regulamento foram detectadas, podendo apresentar resultados distintos em suas análises de acordo com vários pesquisadores. Dentre as principais falhas identificadas estão as condições de uso avaliadas, as quais restringem o uso de condicionamento artificial somente em períodos noturnos ou expõe a edificação apenas a ventilação natural ao longo de todo o ano. Estas circunstâncias na maioria das vezes não correspondem à realidade, uma vez que tais situações dependerão

do tipo de usuário e de sua permanência na edificação, sendo acionado o condicionamento artificial nos momentos em que as condições de conforto não podem ser atendidas (POUEY; BRANDALISE; SILVA, 2012; SILVA; ALMEIDA; GHISI, 2013; SORGATO, 2015; FOSSATI *et al.*, 2016).

Com isso, desde 2014 o Procel Edifica juntamente com o Centro Brasileiro de Eficiência Energética de Edificações (CB3E), desenvolvem uma iniciativa para melhorar os indicadores de desempenho termoenergético das edificações a fim de auxiliar o consumidor na decisão de escolha de seu imóvel (permitindo quantificar a economia gerada por meio da eficiência energética) e, incorporar a avaliação de edificações de energia quase zero e edificações de energia positiva em sua metodologia, incentivando desta forma a geração de energia renovável nas próprias edificações (INMETRO, 2022).

Através deste projeto, o Ministério da Economia e o Inmetro publicaram em setembro de 2022 a Portaria Consolidada nº 309, a qual aprovou uma nova proposta para avaliação do desempenho energético das habitações: a Instrução Normativa Inmetro para Classe de Eficiência Energética de Edificações Residenciais – INI-R (BRASIL, 2022). Esta defini os critérios e os métodos para classificação de edificações residenciais quanto à sua eficiência energética, obtendo através de suas diretrizes à etiquetagem das edificações pelo método prescritivo, simplificado ou de simulação.

No que se refere aos seus procedimentos de avaliação, a INI-R se baseia nas determinações da NBR 15575, que por sua vez considera, dentre outros, o exposto na NBR 15220. As referidas normativas compreendem as únicas em vigor no Brasil que tratam do desempenho térmico das habitações.

A NBR 15.220 – Desempenho térmico de edificações (ABNT, 2022), estabelece métodos de cálculo e medição das propriedades térmicas dos componentes construtivos das edificações, sendo composta por cinco partes. A terceira parte dessa norma aborda o zoneamento bioclimático brasileiro, o qual divide o território nacional em oito zonas e recomenda diferentes diretrizes construtivas de acordo com as características de cada uma destas. As estratégias bioclimáticas sugeridas referem-se à ventilação, sombreamento das aberturas, tipos de vedações externas, inércia térmica, entre outras, sendo baseadas na carta bioclimática adaptada de Givoni publicada em 1992.

Já a parte 1 da NBR 15.575 - Edificações habitacionais - Desempenho (ABNT, 2024) estabelece critérios e requisitos para o desempenho das habitações, sendo dividida em seis partes, com a quarta e a quinta divisão tratando de requisitos para os sistemas de vedações verticais externas e sistemas de coberturas, respectivamente.

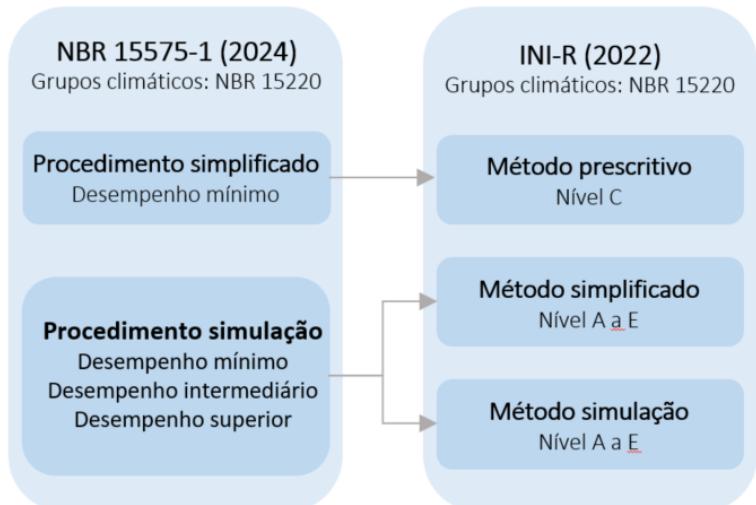
O método simplificado da norma define limites de propriedades térmicas para paredes externas e coberturas, a fim de garantir o desempenho térmico mínimo aceitável. A partir da edição publicada em 2021, a norma de desempenho passou a considerar as cargas internas de ocupação, iluminação artificial e equipamentos como fontes de calor no ambiente, o que aumentou a confiabilidade de seu método de simulação computacional e contribuiu para a compatibilização entre a sua metodologia e a utilizada na INI-R. Conforme afirmado por Fossati (2016), tal alinhamento tende a facilitar as análises por parte dos projetistas, construtores e consultores.

No que diz respeito a etiquetagem das envoltórias através da INI-R, no método prescritivo a classificação pode ser conhecida comparando as características geométricas das APPs (Áreas de Permanência Prolongada) e, as propriedades térmicas de seus sistemas construtivos com valores de referência destes parâmetros, os quais são determinados no procedimento simplificado da NBR 15575 – Parte 1: 2024. A obtenção do nível mínimo de desempenho pelo método simplificado da NBR 15575 (2024) conduz à classificação C de eficiência energética.

Para alcançar uma classificação mais alta na eficiência energética da envoltória (classes B ou A), é necessário avalia-la por meio do método simplificado ou de simulação. Nesses métodos, a classificação é determinada pelo percentual de redução do consumo de energia primária, comparando o consumo da edificação real (que mantém a geometria, propriedades térmicas e construtivas da edificação avaliada) com um modelo de referência (a mesma edificação com características de referência) equivalente à classe C.

No método simplificado, a área de superfície de elementos transparentes nos ambientes de permanência prolongada (APP) é limitada proporcionalmente à área de piso (LABEEE, 2023). Já o procedimento de simulação computacional, por sua vez, é a forma mais completa e representativa de análise de desempenho térmico disponível na NBR 15575-1:2024, permitindo avaliações para obter os níveis de desempenho mínimo, intermediário e superior. A Figura 15 apresenta um resumo da abordagem metodológica da INI-R em relação a NBR 15575-1:2024.

Figura 15 – Resumo da abordagem metodológica da INI-R em relação a NBR 15575-1:2024.



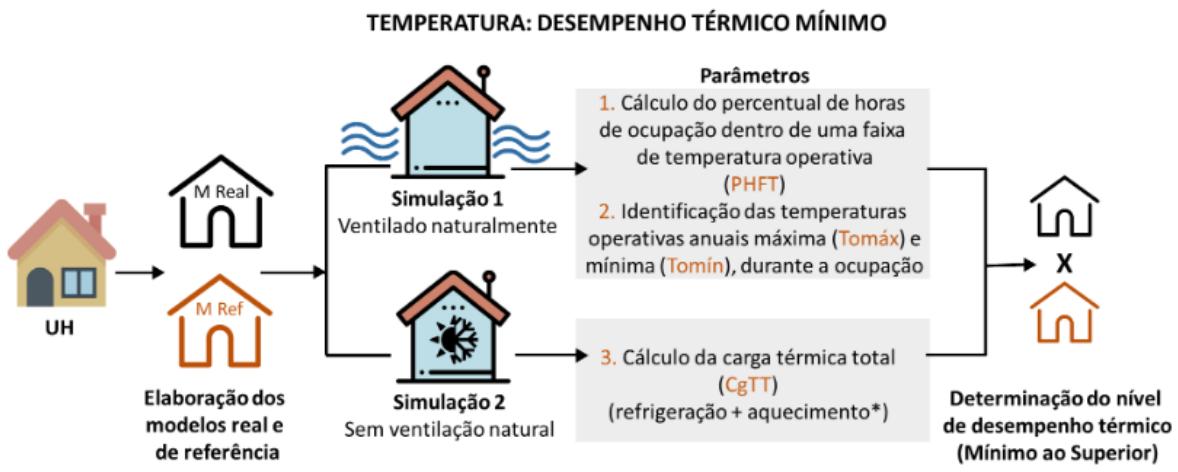
Fonte: Adaptado de Oliveira (2022).

Para atender ao nível mínimo de desempenho térmico, os modelos real e de referência devem ser simulados considerando somente a utilização de ventilação natural nos APPs. Já para alcançar os níveis intermediário e superior, os modelos real e de referência devem ser simulados em duas situações: com o uso de ventilação natural (simulação 1) e sem o uso de ventilação natural (simulação 2).

A obtenção do nível mínimo é obrigatória no procedimento de simulação computacional, enquanto a obtenção dos níveis intermediário ou superior é opcional. Os níveis de desempenho térmico da unidade habitacional (UH) são determinados a partir de critérios específicos apresentados na NBR 15575-1 (ABNT, 2024). Na Figura 16 é possível verificar quais indicadores de desempenho térmico e modelos de simulação são necessárias para a avaliação dos níveis mínimo, intermediário e superior da mais recente NBR 15575 (ABNT, 2024).

A partir dos resultados da simulação 1 podem ser determinados o percentual de horas de ocupação dos APP dentro de uma faixa de temperatura operativa (PHF_{APP}), variando essa faixa conforme o clima local, e a temperatura operativa anual máxima (Tomáx_{APP}) de cada APP, considerando apenas os períodos de ocupação do APP. No caso da edificação analisada estar situada entre as zonas bioclimáticas 1 a 4, será determinada a temperatura operativa anual mínima (Tomín_{APP}) de cada APP, considerando apenas os períodos de ocupação das respectivas. A partir dos valores de PHF_{APP}, Tomáx_{APP} e Tomín_{APP} para cada APP, serão obtidos o PHFT_{UH}, Tomáx_{UH} e Tomín_{UH} da Unidade Habitacional (UH).

Figura 16 – Indicadores de desempenho térmico da NBR 15575-1:2024.



CARGA TÉRMICA: DESEMPENHO TÉRMICO INTERMEDIÁRIO E SUPERIOR

Fonte: LabEEE (2023).

Para conhecer o PHFT_{UH} deve ser calculada a média anual da temperatura externa de bulbo seco (TBSm) do clima analisado, empregando-se os dados do arquivo climático usado na análise termoenergética. A Tabela 1 apresenta os intervalos correspondentes as médias anuais da temperatura externa de bulbo seco (TBSm).

Tabela 1 – Intervalos de temperaturas externas de bulbo seco (TBSm).

Classificação dos intervalos	Média anual da temperatura externa de bulbo seco
Intervalo 1	$\text{TBSm} < 25,0^{\circ}\text{C}$
Intervalo 2	$25,0^{\circ}\text{C} \leq \text{TBSm} < 27,0^{\circ}\text{C}$
Intervalo 3	$\text{TBSm} \geq 27,0^{\circ}\text{C}$

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 15575-1 (2024).

A partir deste valor é possível saber em qual intervalo de temperatura estabelecido na NBR 15575-1 o local avaliado é enquadrado, impactando diretamente na faixa de temperatura operativa a ser considerada para a UH e, consequentemente, na grandeza do PHFT_{UH} .

Por meio da simulação 2 são obtidos os valores referentes ao somatório anual dos valores horários da Carga Térmica de Refrigeração (CgTR_{APP}) e da Carga Térmica de Aquecimento (CgTA_{APP}), sendo a última empregada somente para as análises de climas compreendidos entre as Zonas Bioclimáticas (ZBs) 1 a 4. Através dos valores de CgTR_{APP} e CgTA_{APP} para cada APP, consegue-se determinar o somatório anual dos valores horários da Carga Térmica Total da UH (CgTT_{UH}).

Com a obtenção dos valores referentes ao PHFT_{APP}, Tom_{XUH}, Tom_{NUH} e a CgTT_{UH}, torna-se possível conhecer a equivalência quanto às classes de eficiência energética da INI-R. A Figura 17 evidencia a relação destas.

Figura 17 – Relação das classificações entre a NBR 15575 e a INI-R.

NBR 15575	INI-R
Inferior ao mínimo	Classe E
Mínimo	Classe D
Intermediário	Classe C
Superior	Classe B

Fonte: Adaptado de INMETRO (2022).

Para a classificação da envoltória a escala se estende de A a E, cujo desempenho da primeira corresponde ao mais elevado enquanto do último configura um desempenho inferior ao mínimo da ABNT NBR 15575-1 e, em desacordo com o critério de carga térmica total da classe D de eficiência energética.

Em geral, pode-se dizer que a definição de um desempenho térmico para as edificações possibilita verificar se as condições de habitabilidade e sustentabilidade são adequadas. A NBR 15575-1 avalia o desempenho térmico das habitações considerando todo o projeto arquitetônico proposto em relação às trocas térmicas entre o ambiente construído e o ambiente externo, visando assim, garantir o conforto térmico adequado conforme a região em que a tipologia será construída e, possibilitando a realização de estudos com resultados mais confiáveis quanto a eficiência energética obtida nestas.

2.4 DESEMPENHO TÉRMICO E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM HABITAÇÕES RESIDENCIAIS

O desempenho termoenergético é uma das principais características que determinam a qualidade de uma edificação, tornando fundamental a busca por soluções que permitam a redução do consumo de energia elétrica e proporcionem conforto e bem-estar aos usuários. Além disso, a utilização de recursos renováveis na etapa de produção contribui para a maior sustentabilidade das construções.

De acordo com Daly *et al.* (2021), é comum que habitações de interesse social apresentem uma performance inferior em seus sistemas quando comparadas com

outras moradias disponíveis, cujos problemas, geralmente relacionados à baixa qualidade do ambiente interno, tendem a resultar no aumento dos preços das contas de energia e no comprometimento da saúde de um grupo social particularmente mais vulnerável (URMEE, THOO, KILICK, 2012; BAKER, MOULD, 2017).

Desta forma, Flores-Larsen e Filippin (2021), realizaram um estudo sobre habitações de baixa renda em Santa Rosa, Argentina, durante períodos de calor extremo. Seus principais objetivos incluíram investigar como as condições ambientais afetam a saúde dos moradores, avaliar o desempenho das moradias originais e identificar estratégias de design e retrofit para melhorar a eficiência energética e a resiliência térmica das habitações. A residência unifamiliar escolhida tinha área útil total de 50,74 m², com paredes da envoltória constituídas por tijolos cerâmicos vazados com espessura de 0,18 m revestidos com argamassa em ambos os lados, enquanto a cobertura era composta por uma laje de concreto de baixa qualidade (laje com pedregulho) de 0,10 m de espessura e telhas cerâmicas. Para a análise quantitativa foram coletados dados climáticos horários de janeiro de 2018 na cidade de Santa Rosa (mês do ano como o mais quente na região), realizadas simulações computacionais utilizando o software *EnergyPlus* e, coletados dados de consumo de energia elétrica de uma amostra aleatória de 75 casas no bairro estudado. Já a análise qualitativa incluiu entrevistas com moradores e profissionais envolvidos na construção e manutenção das habitações e, uma análise estatística multivariada executada através do software *StatAdvisorTM* e o posterior cálculo de indicadores estáticos visando verificar se existe relação entre o número diário de consultas e os parâmetros ambientais, sendo baseada em dados de consultas de vigilantes fornecida pelo hospital mais próximo do bairro estudado. Os resultados revelaram que as habitações de baixa renda analisadas não conseguem lidar de forma resiliente com períodos de calor extremo devido ao seu design energético ineficiente. As temperaturas internas frequentemente ultrapassaram 33°C nas casas sem ar-condicionado, e cerca de 60% do tempo as temperaturas estavam acima do limite de conforto para Santa Rosa. Nas casas com ar-condicionado, observou-se uma subutilização de cerca de 43% devido a razões econômicas. As estratégias de design e retrofit mais eficazes incluíram a combinação de ventilação noturna com isolamento térmico de paredes e telhados, vidros duplos herméticos, cobertura de telhado de cor clara e sombreamento de janelas e paredes voltadas para leste e oeste.

Macias *et al.* (2017), movidos pela necessidade em explorar o potencial de economia de energia oferecido pelo setor de construção do Equador, buscaram avaliar o

desempenho energético de habitações de interesse social comparando três práticas modernas de construção em três sistemas de envelope comuns no país. A pesquisa também buscou calcular a energia incorporada em cada sistema de construção e comparar os resultados com estudos anteriores de habitações residenciais e de interesse social. A pesquisa foi realizada com uma casa modelo de 36 m², com paredes compostas por blocos ocos de concreto de 9 cm de espessura, restringidos a cada 3 metros por pilares de concreto armado, sendo o telhado composto por painéis de liga de zinco apoiados em estrutura formada por perfis metálicos. Os outros dois sistemas avaliados consistiram em formas de concreto isoladas (ICF) e o sistema de paredes de carga (LBW). O modelo LBW era formado por uma estrutura monolítica de concreto, composta por paredes portantes de concreto de 10 cm e lajes maciças, enquanto o sistema ICF foi composto por um conjunto autoportante de painéis de poliestireno, conectores de aço e duas camadas de concreto armado. Além disso, foram considerados telhados adaptados para cada sistema na análise. A simulação considerou seis tipos de envoltórias de edifícios e o impacto da seleção de isolamento de telhado e parede foi calculado para todas as seis configurações (três tipos de construção e duas montagens de telhado) em duas condições climáticas: Guayaquil e Quito. Os principais resultados indicaram que o sistema de formas de concreto isoladas combinada com laje de concreto isolada (ICF + S) apresentou o melhor desempenho energético, com uma redução de 49% a 69% no consumo de energia em relação ao sistema de alvenaria confinada com viga-coluna e telhado de liga de zinco (CM + Z). Apesar disso, o sistema mais tradicional (CM + Z) apresentou a menor energia incorporada, enquanto o sistema com melhor performance energética (ICF + S) apresentou a maior energia despendida entre as fases de produção e operação. Além disso, a análise de consumo de energia operacional mostrou que a maioria da energia consumida ao longo do ciclo de vida das habitações de interesse social estudadas ocorreu durante a fase operacional, variando de 81,1% a 97,0% do consumo total de energia.

Wang et al. (2023), investigaram o ambiente térmico em residências tradicionais situadas na cidade de Handan, na China, durante o inverno e o verão. Eles coletaram dados sobre temperatura, umidade e conforto térmico dos moradores e desenvolveram um modelo de avaliação de conforto térmico. No estudo, as habitações foram organizadas em: modelo A e B, que correspondem as moradias tradicionais típicas de tipo antigo e, modelo C e D, representando as habitações tradicionais de tipo novo. As antigas, possuem estrutura e vedação de tijolos com espessura total de 36 cm, enquanto as tipologias construídas pós anos 2000 possuem estrutura de concreto

e, vedação de tijolos com espessura total de 24 cm. A metodologia utilizada na pesquisa envolveu uma combinação de medidas objetivas e questionários subjetivos para investigar as condições térmicas nas residências. No estudo, 131 residentes locais participaram de questionários que incluíam informações básicas, hábitos comportamentais, sensações subjetivas e parâmetros do ambiente térmico. Já os processos objetivos, contaram com a medição de parâmetros ambientais no local, tendo a temperatura do ar ambiente e a umidade relativa como os principais parâmetros da avaliação do ambiente térmico e, a partir destas informações, pode-se empregar um método de análise de regressão para estabelecer a relação entre a sensação térmica dos residentes e a temperatura operacional. Em relação aos resultados, foi revelado que as residências tradicionais em Handan apresentam problemas de isolamento térmico e equipamentos de aquecimento e resfriamento inadequados, o que resulta em condições térmicas desconfortáveis para os residentes. A pesquisa também forneceu diretrizes para melhorar o ambiente térmico interno das residências tradicionais em regiões frias da China, incluindo a adoção de medidas de isolamento térmico. No entanto, a pesquisa também reconheceu que suas conclusões são limitadas às residências de estrutura de tijolo e concreto em regiões frias da China, sendo necessárias pesquisas futuras para explorar a aplicação de novos materiais e tecnologias.

Nouadje e Kaben (2022) investigaram numericamente o conforto térmico em dormitórios de habitações residenciais construídas com materiais locais na cidade de Bandjoun, Camarões, onde os moradores relataram desconforto térmico durante o sono devido a altas temperaturas. A pesquisa também propôs o desenvolvimento de um questionário para avaliar a percepção dos ocupantes das edificações em relação ao conforto térmico em dormitórios. A metodologia utilizada na pesquisa consistiu em uma simulação numérica tridimensional de ambientes de dormir em edifícios residenciais construídos com materiais locais como: blocos de concreto e tijolos de terra compactada, ambos com 15 cm de espessura. A geometria de uma moradia típica da região oeste de Camarões com área de 30 m² foi construída usando o software *Comsol Multiphysics 5.6*. O questionário desenvolvido empregou uma escala inspirada em estudos anteriores e aplicada para avaliar o nível de satisfação dos ocupantes em relação ao conforto térmico nos dormitórios. Para esta investigação, foram consideradas 12 habitações com uma média de 2 ocupantes. Dentre os principais resultados encontrados estão que os blocos de concreto difundiram o calor mais rapidamente do que a terra comprimida, apesar disso, ambos apresentaram uma boa inércia térmica. O questionário revelou que a percepção de desconforto térmico interior em ambientes

de dormir foi superior para os ocupantes de edifícios de blocos de concreto (cerca de 88 %) quando comparada com a percepção dos ocupantes de edifícios de tijolos de terra compactada (cerca de 76 %). Para trabalhos futuros, os autores sugerem levar em consideração o revestimento de paredes com tinta ou ladrilhos cerâmicos, por exemplo. Entretanto, pode-se mostrar importante a verificação do desempenho térmico de outras tecnologias construtivas frente ao clima do local.

Os efeitos do aquecimento global atual e em cenários climáticos futuros (2050 e 2080) foram explorados na pesquisa de Thapa *et al.* (2023), sendo analisado o desempenho energético de um edifício multifamiliar construído na região de Darjeeling, no Himalaia, leste da Índia. Para se alcançar os resultados traçados, foi modelado um edifício multifamiliar existente de 3 andares que é representativo dos edifícios construídos na região. A modelagem empregou a ferramenta de construção *DesignBuilder* versão 6, que usa o mecanismo de simulação *EnergyPlus*. O telhado exposto do edifício é feito de chapa de ferro galvanizado e o piso entre divisórias é constituído por laje de concreto armado de 10 cm de espessura. O envelope das paredes é descrito como de tijolo de argila refratária de 12 cm de espessura com reboco de cimento de 1,5 cm em ambos os lados. Dentre os principais resultados está que a simulação computacional mostrou que o edifício residencial estudado apresentou um aumento na temperatura operativa interna em cenários climáticos futuros, indicando um risco de superaquecimento em algumas áreas do edifício. Neste aspecto, houve uma redução de 59,8% e 81,2% na energia de aquecimento anual e um aumento de 221,9% e 467,0% na energia de resfriamento para o clima futuro de 2050 e 2080 em comparação com o presente. As estratégias de projeto propostas, como o uso de materiais de alta inércia térmica e a redução do tamanho das janelas, podem melhorar o desempenho térmico do edifício e reduzir o consumo de energia. A análise paramétrica realizada considerando a orientação, o valor U da parede, a taxa de infiltração e as razões janela-parede revelaram que a orientação leste/sudeste teria o melhor desempenho em relação ao superaquecimento devido às mudanças climáticas. As principais conclusões da pesquisa foram que as mudanças climáticas podem ter um impacto significativo no desempenho térmico de edifícios residenciais, aumentando o risco de superaquecimento e desconforto térmico em algumas áreas do edifício. É destacado ainda a importância em considerar o desempenho térmico dos edifícios em cenários climáticos futuros ao projetar edifícios mais sustentáveis e resilientes.

No Brasil, Tubelo *et al.* (2018) avaliaram novas configurações de envelopes de HIS com o intuito de aumentar o conforto térmico e a eficiência energética em habitações populares do país. A estrutura dos componentes da envoltória foi definida a partir de uma combinação do que é tipicamente utilizado na construção civil brasileira e o que é mais utilizado em edificações de alto desempenho térmico como as baseadas no padrão *Passivhaus* (norma alemã de otimização energética para a construção de moradias). Todas as configurações das vedações testadas contaram com tijolos ou blocos cerâmicos em suas composições. Três localidades foram selecionadas para serem analisadas no estudo: Curitiba, São Paulo e Porto Alegre, todas situadas em clima moderado e subtropical e onde vive mais de 50% da população brasileira. Adotou-se um método de análise de sensibilidade para perceber quais os parâmetros da envolvente que mais impactavam no desempenho térmico das habitações e posteriormente nos custos da envolvente. A pesquisa foi desenvolvida através do uso de simulação dinâmica de edificações empregando o software *Thermal Analysis Simulation* (TAS) e, um modelo representativo da tipologia habitacional construída em todo o país, caracterizado por uma casa térrea de 1 pavimento e 2 dormitórios com área útil de 39,19 m². Os principais resultados mostraram que a combinação de paredes e telhados altamente isolados com vidros de baixa transmitância térmica melhorou o desempenho térmico e o conforto. No entanto, essas configurações otimizadas eram mais caras, custando cerca de 50% a mais do que os envelopes tradicionais, tornando-se inviáveis para habitações populares. O envelope mais econômico foi a combinação de vidro simples, paredes isoladas com blocos vazados e telhado inclinado de folha de alumínio, com custos adicionais de menos de 10% e melhorias de até 42% no conforto térmico em comparação com os envelopes típicos brasileiros. Por fim, foi constatado que os envelopes típicos brasileiros comumente usados nesses edifícios acessíveis apresentam baixo desempenho em termos de conforto térmico quando comparados com as outras combinações de envelopes investigadas.

No mesmo âmbito, Garcia (2020) estudou o desempenho termoenergético da envoltória de HIS multifamiliares considerando a cidade de Joinville, Brasil. A análise foi realizada conforme as diretrizes apresentadas para o método de simulação da INI-R, que se encontrava em fase de desenvolvimento e aprovação durante a época do estudo. Um modelo representativo foi criado após analisar habitações multifamiliares existentes em Joinville. O modelo conta com 5 pavimentos, com 4 apartamentos por andar, as vedações externas e internas são constituídas por blocos cerâmicos de dois furos com argamassa em ambos os lados e a cobertura possui laje maciça e telha de

fibrocimento. Após definido o caso base foram realizadas simulações computacionais no *EnergyPlus* e, a partir dos resultados obtidos, determinou-se a classificação de eficiência energética da envoltória. Em seguida, foi aplicado o método de amostragem hipercubo-latino e realizada uma análise de sensibilidade de dez parâmetros construtivos da edificação. A classificação energética da envoltória recebeu níveis “C” e “D” para os casos simulados, evidenciando o baixo desempenho termoenergético destas habitações no clima local. Na análise de sensibilidade, constatou-se que a exposição do piso e sombreamento das aberturas promovem maior redução no consumo de energia da envoltória. Os fatores relacionados a absorvividade solar das paredes e exposição da cobertura foram os que mais contribuíram com o aumento do consumo energético no modelo representativo.

Considerando a crescente importância atribuída à redução do consumo de energia e à sustentabilidade, a construção em madeira vem ganhando cada vez mais destaque em todo o mundo por se tratar de um material renovável e de baixo impacto ambiental. Conforme afirmado por Liu *et al.* (2016), é amplamente reconhecido que o uso da madeira pode reduzir a energia incorporada e de operação de um edifício. Desta forma, diversos estudos têm sido realizados para avaliar desempenho termoenergético e as condições de conforto em tipologias construtivas em madeira, com ênfase para o sistema *wood frame*, que devido ao seu custo competitivo, grande capacidade de adaptação e, maior rapidez em sua produção, demonstra grandes vantagens em sua adoção.

Neste sentido, Naji *et al.* (2014) buscaram avaliar o comportamento estrutural, energético e econômico de três sistemas construtivos compostos por estruturas leves de madeira (WLF), aço (LGSF) e painéis sanduíche 3D (3DSP), comumente usados na Europa Oriental, incluindo a Turquia. Uma planta arquitetônica de uma casa com dois pavimentos e somando 173,24 m² de área total foi selecionada. Os materiais das paredes, pisos e telhados foram escolhidos de acordo com os predominantes em cada um dos três tipos de sistemas construtivos investigados na pesquisa. Para análise energética, foi escolhida a cidade de Istambul, sendo usados os dados meteorológicos desta para a simulação. O modelo tridimensional foi construído no *Sketchup* enquanto para a simulação foi empregado o software *EnergyPlus*. Variáveis dos edifícios como orientação solar, propriedades de janelas e portas, ocupação, equipamentos e, dispositivos de aquecimento, ventilação e ar condicionado, foram adotadas de forma equivalentes para os três modelos. Os resultados demonstraram que nas estruturas molduradas geralmente ocorrem maiores pontes térmicas. Assim, embora o valor U para

a parede composta por 3DSP seja maior, ocorre menor nível de ponte térmica em sua estrutura, o que é uma vantagem deste sistema. Em termos de massa térmica, os 3DSP apresentaram os maiores valores e, o melhor comportamento térmico tanto no verão quanto no inverno. Além disso, uma avaliação do custo de energia operacional ao longo da vida dos sistemas indicou que o edifício construído com 3DSP demandou menor energia para o resfriamento de seus espaços internos. Entretanto, para o aquecimento, as demandas de energia apresentaram-se ligeiramente maiores no sistema 3DSP devido aos valores U mais altos das paredes externas em relação aos outros dois métodos avaliados. A demanda de energia de aquecimento para edifícios WLF e LGSF foram relativamente semelhantes.

Diferentes envelopes de *wood frame* tiveram os resultados de seu desempenho termoenergético comparados na pesquisa realizada por Pasztori *et al.* em 2012. O estudo se concentrou em avaliar típicas casas norte-americanas e europeias em *wood frame*. Para isso, duas estruturas americanas foram estudadas e denominadas como *American I* e *American II*, sendo a primeira composta por quadros estruturais com montantes de seção igual a 38 mm x 89 mm espaçados a 41 cm entre si e, a segunda com montantes contendo seção de 38 mm x 140 mm e espaçamento equivalente a 61 cm. Nestas, a ossatura detalhada é revestida com painéis de fios orientados (OSB) por fora e com placa de gesso por dentro, sendo finalizadas com revestimento composto de fibrocimento de madeira, além de vinil e tijolo. No envelope europeu, os montantes possuem seção de 60 mm x 140 mm com espaçamento de 62,5 cm. Quanto aos revestimentos, o lado voltado para o exterior é descrito como coberto com placa de gesso reforçado com fibra, enquanto o lado voltado para o interior da casa é coberto com placa de gesso, contando com um Sistema Composto de Isolamento Térmico Externo (ETICS) para o revestimento. Para modelar e comparar as diferentes estruturas de parede, foi utilizado o programa de elementos finitos *WUFI Pro 5.0*. Na simulação, assumiu-se que todas as estruturas estavam localizadas em Indianápolis, Indiana, EUA. Dentre os resultados, verificou-se que a diferença na resistência ao calor entre as estruturas de parede americanas I e II foi considerável. A *American II* teve resistência ao calor 50,2% maior do que a estrutura da parede *American I*, podendo a disparidade dos valores ser explicada pela primeira estrutura ser mais espessa e pelo isolamento de fibra de vidro. Apesar disso, a estrutura *wood frame* europeia foi a que apresentou a maior resistência ao calor e, portanto, a maior eficiência energética, obtendo uma resistência ao calor 32,6% maior que a *American II* e 99,3% maior que a *American I*. Os autores comentam que se a espessura do EPS fosse

reduzida para 5 mm, de modo que a espessura total da camada ETICS fosse aproximadamente a mesma do revestimento na construção *American II*, o valor de isolamento das paredes europeia e americana II seria aproximadamente o mesmo, atribuindo o desempenho térmico superior da construção europeia principalmente ao poliestireno expandido (EPS) na camada ETICS.

Zhu *et al* (2009) investigaram a influência da massa térmica das vedações verticais no comportamento térmico de uma residência implantada em Las Vegas, EUA, com clima apresentando grandes variações de temperatura no decorrer das estações. Para isso, dois diferentes envelopes de paredes foram analisados, sendo o primeiro constituído por um sistema sanduíche com camada intermediária em EPS envolvida em ambas as faces por espessa camada de concreto armado, contando também com revestimento externo argamassado. A segunda composição avaliada consistiu em uma estrutura em *wood frame* com isolante entre os montantes de madeira, sendo acrescida de revestimento externo em EPS seguido de camada argamassada. A metodologia empregada na pesquisa incluiu medições em dois protótipos residenciais, sendo instalada uma grande variedade de termopares e sensores de fluxo de calor nas paredes das UH a fim de determinar a quantidade de energia térmica transmitida entre as faces das vedações. Para estimar as cargas térmicas demandadas em cada protótipo foram realizadas simulações computacionais empregando o software *Energy10*. Os resultados da pesquisa indicaram que a temperatura interna na UH provida de paredes com maior massa térmica permanece mais estável durante as estações do ano. Isso é explicado devido a maior capacidade de armazenamento térmico das paredes de concreto, que transferem menos calor para o interior da residência durante os períodos quentes do dia, enquanto mais calor é transferido para o interior durante os períodos noturnos frios, oferecendo assim um ambiente com maior conforto térmico em comparação as paredes de *wood frame*. No entanto, durante os períodos com maior demanda por cargas de refrigeração, observou-se que as propriedades referentes ao atraso térmico e a menor transmissão de calor das paredes não são mais benéficas, pois o calor armazenado durante o dia é continuadamente liberado para o interior da UH durante a noite. Desta forma, pode-se concluir que durante as estações de transição o comportamento das paredes de concreto foi mais satisfatório, revelando uma temperatura interna mais agradável durante as horas do dia e no período noturno, no entanto, sob condições de altas temperaturas ambientais e forte

luz solar, o calor armazenado no período do dia é dissipado para o interior da edificação posteriormente, aumentando o uso de energia para refrigeração quando comparado ao sistema em *wood frame*.

Adekunle e Nikolopoulou (2019) analisaram um conjunto habitacional construído com painéis estruturais isolados (SIPs) compreendendo 145 unidades, das quais 42 consistem em unidades habitacionais populares e 103 unidades são moradias privadas de dois e três andares. As unidades habitacionais possuem uma variedade de 2 a 5 quartos e, área útil variando entre 61,7 m² e 136 m², estando localizado na cidade de Londres, Inglaterra. O estudo empregou uma combinação de diferentes métodos, como medições físicas de variáveis, levantamento de conforto térmico dos ocupantes dos edifícios selecionados considerados durante a pesquisa de campo. O trabalho também considerou a modelagem e simulação de edifícios que cobrem os meses meteorológicos de inverno (dezembro a fevereiro) e modelos matemáticos para prever os índices de estresse por frio. Para as medições das variáveis ambientais foram monitoradas 5 unidades habitacionais de janeiro a fevereiro de 2013. As medições dos parâmetros (temperatura, ponto de orvalho e UR) foram registradas em intervalos de 60 minutos ao longo do período da pesquisa. No total, 10 espaços foram monitorados nas cinco unidades. As pesquisas de conforto térmico contaram com a participação de todos os moradores das unidades selecionadas. Os autores comentam que os respondentes foram instruídos a preencher os questionários três vezes ao dia (manhã, tarde e noite) sobre sua condição de conforto térmico. Para a simulação foi usado o aplicativo de software *DesignBuilder* do *EnergyPlus* e, os arquivos de dados meteorológicos *Test Reference Year* (TRY) dos anos 2000. Os dados simulados foram calibrados e validados usando os dados medidos coletados e, a modelagem computacional das unidades foi feita de acordo com os documentos de construção e especificações de arquitetos. Os resultados mostraram que 87% das respostas sobre a sensação térmica variaram de ligeiramente frio a ligeiramente quente, enquanto 84% preferiram nenhuma mudança no ambiente térmico. Sobre aceitabilidade térmica, 93% dos participantes destacaram que o ambiente térmico era adequado para eles. Os resultados revelaram que os edifícios pré-fabricados de madeira altamente isolados funcionam melhor no inverno do que no verão e que os ocupantes estão termicamente confortáveis no inverno.

Evola *et al.* (2022) buscaram avaliar o uso de painéis pré-fabricados à base de madeira na renovação de edifícios analisando detalhadamente o desempenho térmico alcançado por duas soluções diferentes. A tecnologia usada na intervenção utilizou

painéis estruturais à base de CLT (denominados e-CLT) que foram aplicados nas paredes cegas exteriores. Os painéis e-CLT foram combinados com painéis não estruturais (denominados e-PANEL) que foram colocados nas paredes externas com janelas. Diferente do e-CLT, o e-PANEL não teve função de reforço estrutural, possuindo uma estrutura de madeira leve que garantiu uma fabricação mais fácil, além de baixo impacto ambiental e economia de custos. O edifício empregado para a análise corresponde a um bloco de apartamentos construído em 1964 na cidade de Catânia, Itália. O edifício objeto do estudo possui cinco andares com duas unidades residenciais para cada pavimento e, uma planta aproximadamente retangular com tamanho bruto de 24 x 9,5 m. Suas paredes externas de enchimento são feitas com duas camadas de blocos ocos de concreto leve feitas de cimento e agregados vulcânicos leves, com um intermediário não ventilado. Na Figura 18 é indicada a composição dos dois sistemas empregados de forma conjunta na pesquisa.

Figura 18 – Componentes das tecnologias de adaptação propostas.



Fonte: Adaptado de Evola *et al.* (2022).

Para as simulações o modelo 3D foi construído no *SketchUp* por meio do *plugin Open Studio*. As simulações de energia dinâmica do edifício avaliado foram executadas de hora em hora por meio da ferramenta de software *EnergyPlus* v.9.0.1. Os autores registram que a contribuição das pontes térmicas para a carga de aquecimento/resfriamento foi incluída por meio de operações de pós-processamento, adicionando, de hora em hora e ao longo do ano, junto à carga térmica fornecida pela simulação do edifício sem pontes térmicas. Os principais resultados obtidos reduziram cerca de 60% e 16% das demandas de energia para aquecimento e resfriamento, respectivamente. Outra descoberta interessante diz respeito à influência das pontes térmicas na determinação da economia de energia de aquecimento e resfriamento do

edifício após a reforma, sendo que no caso de não serem contabilizadas a economia pode ser superestimada em 16% e 5%, respectivamente. Por fim, é enfatizado a potencialidade do estudo para avaliação de retrofit aplicado em outros edifícios implantados em diferentes contextos europeus.

Stazi *et al.* (2018) pesquisaram a eficiência energética de diferentes envelopes de *wood frame* em climas distintos. Inicialmente, os autores escolheram uma estrutura com estratigrafia convencional em *wood frame* aplicada em uma residência com dois pavimentos construída na província de Fermo, região central da Itália. Os autores verificaram que o envelope empregado foi incapaz de dissipar o calor aprisionado no interior da edificação durante o dia no período de calor mais extremo do ano, sendo esta condição atribuída a elevada capacidade de isolamento e à decrescente onda térmica que caracteriza a parede analisada (valores muito baixos de U e f), os quais diminuíram a entrada de fluxos de calor durante o dia, porém, também reduziram fortemente os de saída. Para a execução do estudo, foi realizado o monitoramento durante todo o mês de agosto da habitação utilizada como caso base, permitindo uma melhor calibragem do modelo de simulação, sendo empregado o software *EnergyPlus* para análise energética. Após sondar os resultados iniciais, foram propostas diferentes configurações de paredes externas visando investigar a relação entre o aumento da capacidade calorífica das camadas estratigráficas voltadas para o lado interno dos ambientes e a eficiência energética proporcionada a habitação. A análise também se estendeu para os climas do Cairo (Egito), de Londres (Inglaterra) e, de Ancona, Palermo e Bolzano (Itália). Através dos resultados, observou-se que no clima mediterrâneo, para estratégias de ventilação híbridas e naturais, a adoção de tijolos internos de 12 cm e o uso de painéis duplos de argila foram as melhores soluções, garantindo níveis ótimos de conforto no verão (24% das horas de desconforto no verão). Para os demais climas, os dados mostraram que a adoção de um painel duplo de argila seca reduziu as horas de superaquecimento em relação à solução construída para todos os climas, exceto para a situação extrema de ventilação natural no Cairo. Nesta região, devido ao clima desértico extremo caracterizado por altas temperaturas ambientais contínuas, a alta massa do envelope não é mais benéfica pois mais calor será armazenado do que liberado à noite. A introdução de ambos os tipos de camadas maciças internas teve efeitos insignificantes no inverno tanto em climas temperados quanto em climas extremamente frios, principalmente nos casos de valores de U semelhantes. Basicamente, a combinação dessas estratégias (revestimento interno maciço e ventilação adequada), permitiu uma redução dos níveis de desconforto em até 50% em

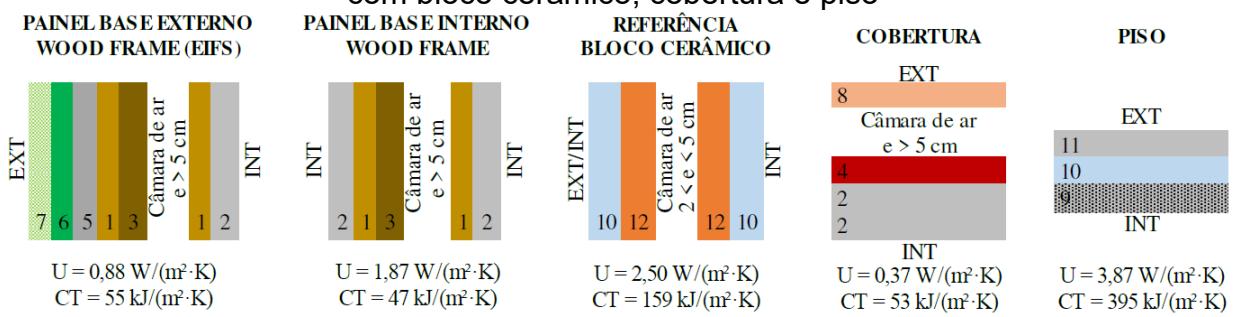
climas temperados para a melhor solução com ventilação natural e camada interna de 12 cm de espessura. No clima de Palermo a redução foi de 31% com ventilação natural e painel duplo de argila seca. No clima severo do Cairo a redução foi de 6% com ventilação híbrida. Por fim, os autores destacaram a incidência conflitante entre os aspectos energéticos e os ambientais ocorrida no estudo, que também avaliou as fases do ciclo de vida dos materiais analisados, frisando que os materiais isolantes propostos que obtiveram melhores resultados durante a fase operacional também acarretaram em um maior impacto ambiental considerando o ciclo de vida de forma global.

Tendo em vista o enunciado no estudo anterior, Cascone *et al.* (2018) concentraram sua pesquisa em comparar o desempenho energético, econômico e ambiental de dois sistemas construtivos em madeira. O primeiro denominado XLAM (*Cross Laminated*), o segundo sistema construtivo avaliado consiste em uma estrutura leve de madeira que contou com uma nova tecnologia constituída por um enchimento em palha comprimida como material isolante. O edifício escolhido para o estudo de caso foi descrito com um pavimento, situado em Giarre, em Catania (Itália). A modelagem da edificação foi realizada por meio do software *DesignBuilder* e, para a análise energética foi empregado o software *EnergyPlus*. Foram realizadas duas análises diferentes, a primeira com à estratigrafia da envolvente do edifício existente realizada em XLAM e, a segunda com a hipótese de adoção do sistema construtivo *wood frame*, ambas as estruturas com a mesma espessura total. Diferentes locais foram considerados na análise energética: Catania, representando o clima mediterrâneo com verões secos; Amsterdam (Países Baixos), com clima oceânico úmido ameno com verões quentes; e Estocolmo (Suécia) para o clima boreal. Os resultados da simulação demonstraram que o sistema em *wood frame* proporcionou melhor desempenho durante o inverno, resultando em menor consumo de energia em torno de 1% em relação ao sistema XLAM. Durante a época estival, este sistema implicou em um aumento do consumo de energia, apesar disso, no que diz respeito ao consumo anual, ainda se verificou uma poupança energética, demonstrando um desempenho de economia de energia ligeiramente melhor que o sistema XLAM. Com relação aos custos, o sistema em madeira leve apresentou uma expressiva vantagem econômica de aproximadamente 38% em relação ao sistema *Cross Laminated*, devido sobretudo à menor quantidade de madeira necessária. Quanto ao fator ambiental, o *wood frame* consumiu cerca de 1/5 do volume de madeira requerido pelo XLAM e, aproximadamente, 40% da energia incorporada incluída neste sistema. Assim, os autores concluíram que o *wood frame* representa uma alternativa válida ao sistema XLAM, tanto do ponto de

vista energético, quanto do ambiental e econômico, sendo necessário mais estudos em diferentes climas para melhor análise de sua performance.

No Brasil, Bortone, Nunes e Giglio (2019), avaliaram o desempenho termoenergético de unidades habitacionais de edificações multifamiliares construídas em *wood frame*, nas zonas bioclimáticas 3 e 8 da NBR 15220-3 (ABNT, 2005), referentes as cidades de São Paulo e Belém, respectivamente. A edificação multifamiliar analisada é composta por quatro pavimentos com quatro apartamentos por andar, sendo que sua projeção contém 188,56 m² construídos. Para a envoltória da edificação adotou-se como base inicial o sistema de *wood frame* consolidado no documento técnico exposto no SINAT – DATec nº 020-C. Todavia, para a face externa das vedações perimetrais optou-se por adotar o painel base com o sistema exterior *Insulation and Finish Systems* (EIFS), sendo adicionado poliestireno expandido (EPS) e retirada a placa cimentícia da composição de seu envelope. Com o intuito de ter um referencial para comparação, todas as simulações da edificação também foram realizadas com a envoltória em alvenaria convencional de blocos cerâmicos. Os autores explicam a adoção do material por ser amplamente disseminado e consagrado no Brasil. O desempenho termoenergético da edificação foi analisado a partir do método de simulação computacional do RTQ-R, vigente na época do estudo. Para tanto, utilizou-se o *EnergyPlus v. 8.7* com o *plug-in Euclid* inserido no *SketchUp*. A Figura 19 ilustra a composição das vedações verticais, do piso e da cobertura considerados na pesquisa, bem como seus respectivos valores de transmitância e capacidade térmica, enquanto o Quadro 1 discrimina os materiais empregados.

Figura 19 – Representação dos painéis *wood frame* (EIFS), alvenaria convencional com bloco cerâmico, cobertura e piso



Fonte: Bortone, Nunes e Giglio (2019).

Quadro 1 – Especificação dos materiais empregados.

Material	
1	Chapa OSB
2	Placa de gesso acartonado
3	Madeira de Pinus
4	Lâ de vidro (cobertura)
5	EPS
6	Base coat (EIFS)
7	Acabamento acrílico
8	Telha cerâmica
9	Radier (concreto)
10	Argamassa
11	Piso cerâmico
12	Bloco cerâmico

Fonte: Bortone, Nunes e Giglio (2019).

Quanto aos resultados, para o município de São Paulo, classificado na ZB 3, o sistema construtivo em *wood frame* com EIFS obteve bom desempenho (níveis A e B) para situações de pavimentos térreo e intermediário quando a radiação solar não incidiu diretamente na abertura da fachada. O desempenho do sistema construtivo inovador foi prejudicado conforme variou-se as situações de pavimento intermediário e cobertura. Quando comparado a alvenaria com blocos cerâmicos, o *wood frame* mostrou desempenho superior no pavimento térreo e deixou a desejar somente nas situações de orientação leste e oeste do pavimento intermediário, além dos casos da cobertura. Já para a zona bioclimática 8, analisada especificamente para a cidade de Belém, o desempenho dos dois sistemas construtivos estudados foi parecido, com ligeira vantagem para a alvenaria tradicional. Assim como em São Paulo, os melhores resultados ocorreram na condição de pavimento térreo associado às orientações norte e sul. De maneira geral, os resultados da pesquisa proposta mostraram que a orientação solar e o contato da edificação com o solo são fatores cruciais para um bom nível de eficiência da edificação, sobretudo quando executada em sistema leve.

Triana, Lamberts e Sassi (2021) proporam uma abordagem integrada considerando indicadores de sustentabilidade relacionados ao ciclo de vida energético de um edifício para a avaliação de medidas de eficiência energética com adaptação às mudanças climáticas em projetos de habitação social brasileiros. Para tal, foi proposto como forma de comparação um Índice de Sustentabilidade no Ciclo de Vida Energético que inclui indicadores ambientais, energéticos, econômicos e de conforto térmico

dos utilizadores. Também foi apresentado um estudo de caso localizado na cidade de São Paulo (ZB3), sendo simuladas necessidades de energia operacional para o verão e inverno na análise realizada. O caso base consistiu em um projeto representativo de uma edificação unifamiliar de baixa renda (casa geminada) com 39,74 m². Os casos com medidas de eficiência energética para adaptação às alterações climáticas consideraram o mesmo projeto arquitetônico do caso base com algumas diferenças nos componentes da envolvente. Em relação ao ciclo de vida, foram consideradas três fases: pré-uso, uso e pós-uso. Três cenários climáticos foram considerados, sendo um considerado o cenário climático atual. Os outros dois cenários que representam as mudanças climáticas foram os de 2020 e 2050. O Quadro 2 apresenta as estruturas de paredes utilizadas para cada caso analisado no estudo.

Quadro 2 – Especificação dos casos analisados.

Caso analisado	Estrutura das paredes
Caso base	Tijolo de concreto perfurado (6 furos), com reboco interno e externo de 2 cm e, largura total da parede de 13 cm.
Caso 1	Dupla parede de madeira (2,2 cm) com lã de rocha de 5 cm.
Caso 2	Tijolo de barro perfurado (9 furos), com reboco interno e externo de 2 cm e, largura total da parede de 18 cm.
Caso 3	Tijolo duplo de 6 furos com cavidade de ar de 3 cm, com reboco interno e externo de 2 cm, somando uma espessura de 25 cm.
Caso 4	10 cm de parede de concreto com 2,5 cm de lã de rocha e 2 cm gesso externo.

Fonte: Adaptado de Bortone, Nunes e Giglio (2019).

Com relação aos resultados, o caso 3 apresentou o menor consumo total de energia no ciclo de vida, enquanto o consumo de energia apresentado no caso 1 se mostrou ligeiramente maior que o caso 2 no cenário climático de linha de base, mas para 2050, o caso 2 apresentou consumo maior que o caso 1. O caso 4 exibiu o maior consumo de energia entre os casos com medidas de adaptação, mas ainda menor que o caso base. Observando o desempenho do caso base, no cenário climático de linha de base, o uso esperado de energia para ar condicionado no caso base representou 34% do ciclo de vida total, enquanto para o cenário de 2050 é de 52%. Em relação às emissões de CO₂ do ciclo de vida, o desempenho dos casos foi diferente do indicador anterior, no entanto, o caso base ainda apresentou o pior desempenho em todos os cenários. A menor emissão incorporada inicial e recorrente foi encontrada

no caso 1, segundo os autores, em grande parte isso resultou das paredes de madeira, especificadas como madeira plantada, que possuem baixas emissões de CO₂. No cenário climático de 2050, as emissões totais do ciclo de vida para o caso 1 foram de 56,76 tCO₂, o que representou uma redução de 22,6% em relação ao caso base. No cenário climático de 2020 a diferença para o caso base com os casos 2 e 3 foi de cerca de apenas 3% a mais. De acordo com os autores, para o indicador de custo, ficou evidente a importância de se considerar cenários de mudanças climáticas na avaliação, pois os mesmos podem influenciar radicalmente a avaliação dos casos, já que um maior volume no custo esperado de ar condicionado fica mais evidente em cenários futuros.

2.5 CONSIDERAÇÕES SOBRE O REFERENCIAL TEÓRICO

Mediante o exposto no transcorrer neste capítulo, nota-se que os materiais de construção exercem grande influência sobre as condições de conforto térmico e eficiência energética das edificações, tornando essencial o entendimento de suas propriedades para a melhor especificação destes e de seus arranjos em relação ao clima no qual serão inseridos. Nesse sentido, as paredes externas possuem grande relevância na performance térmica tanto no cenário atual quanto no cenário futuro das habitações, onde as demandas de energia elétrica para aquecimento devem diminuir enquanto as necessárias para a refrigeração aumentarão substancialmente.

Conforme evidenciado na pesquisa de Nunes e Giglio (2022), as variáveis de projeto com maior impacto termoenergético no cenário atual correspondem a ventilação natural, seguida da absorvividade solar da envolvente e da transmissão térmica das paredes. Ainda segundo os autores, em 2050 as mudanças climáticas ocasionadas pelo aquecimento global tornarão a transmitância térmica das paredes o fator com maior influência nos custos para condicionamento interno, impactando principalmente na quantidade de energia destinada a refrigeração durante a fase de operação das edificações.

Diversas pesquisas vêm indicando que sistemas construtivos em madeira podem representar uma estratégia eficaz na redução do consumo de energia primária produzida a partir de fontes fósseis e, na descarga de substâncias poluentes na atmosfera (principalmente o CO₂), comprovando significativos benefícios em termos de mitigação das mudanças climáticas. Dessa forma, a tipologia *wood frame* que já apresenta fatores construtivos atrativos com custo competitivo e rápida execução, bem

como, a grande possibilidade de adaptação de sua estratigrafia de acordo com o clima local, demonstra grande vantagem frente a outras tecnologias em madeira, particularmente quando voltadas para a construção de habitações de interesse social.

Conforme evidenciado em alguns trabalhos relatados acima, este sistema já consagrado em países da América do Norte e Europa Central e Nórdica apresenta resposta térmica satisfatória quando implantado em regiões de clima frio. Entretanto, sua expansão para áreas de climas quentes requer maiores estudos com ênfase na avaliação das cargas térmicas necessárias para a refrigeração de ambientes internos, tendo em vista que, devido a sua concepção original para climas com baixas temperaturas, sua tecnologia é comumente focada na otimização da economia de energia para o inverno e raramente no superaquecimento do verão (STAZY *et al.*, 2017).

Considerando o enunciado, em regiões com maior incidência de calor como as de clima mediterrâneo, onde sistemas construtivos de pedras e alvenaria - qualificados com alta inércia térmica - são historicamente predominantes, vem sendo observada a crescente adoção de sistemas de madeira leve, sendo aplicadas tanto em novas moradias, quanto em técnicas de *retrofit* para renovação de edifícios antigos. Nestes locais, percebe-se que a carência de inércia térmica intrínseca a tipologia em *wood frame* e a adoção de materiais isolantes nos painéis da envoltória ocasiona, na maioria das vezes, o superaquecimento durante os períodos anuais de maior calor.

Esta circunstância, no entanto, pode ser superada a partir de alterações na estratigrafia da envolvente, adaptando o envelope de estrutura de madeira de acordo com as condições climáticas e de uso das edificações, conforme constatado em estudos desenvolvidos nos últimos anos. Estas adequações, tornam possível obter resultados comparáveis e, em alguns casos até superiores em relação a sistemas tradicionais quanto ao conforto térmico e eficiência energética. Assim, o *wood frame* que já apresenta vantagens validadas durante sua produção e final de vida, pode ser alavancado em face de seu melhor desempenho térmico na fase operacional do ciclo de vida de moradias, desempenhando melhores índices de sustentabilidade no ambiente construído de forma global.

No Brasil, as pesquisas voltadas para o desempenho termoenergético do *wood frame* ainda são escassas em virtude deste ser considerado um sistema inovador no país. De maneira geral, observa-se que os estudos desenvolvidos emergiram após 2013, impulsionados pela publicação do DATec 020, que possibilitou o financiamento da tecnologia construtiva em madeira em programas habitacionais como o MCMV. No entanto, embora este documento tenha promovido um marco para a difusão do *wood*

frame em território nacional, é de consenso que ele também impôs restrições significativas, confinando as construções às especificidades das suas diretrizes e limitando o financiamento imobiliário habitacional à empresa desenvolvedora do produto DATec 020.

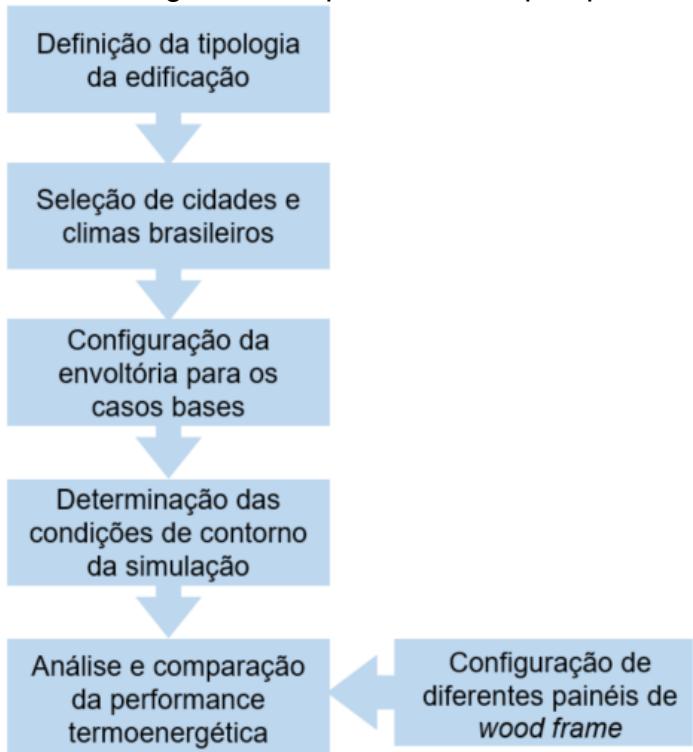
Recentemente, a publicação da NBR 16.936: Edificações em *light wood frame* marcou um avanço significativo para a disseminação do sistema construtivo *wood frame* no Brasil, uma vez que permite que qualquer construtor possa produzir a tecnologia em estrutura leve de madeira para empreendimentos unifamiliares de até dois pavimentos. Além disso, a referida normativa também ampliou as possibilidades na adoção de materiais empregados como revestimentos externos das vedações verticais, o que reforça a premência em conhecer o comportamento termoenergético de painéis de *wood frame* nos variados climas brasileiros, de modo que as condições de conforto térmico e eficiência energética nas habitações do país seja otimizada.

Desta forma, este trabalho tem como objetivo analisar a eficiência energética de diferentes envelopes de *wood frame* inseridos em climas brasileiros distintos, sendo executadas simulações computacionais de acordo com as orientações da ABNT NBR 15575-1:2024. Os arranjos construtivos avaliados são aplicados na envolvente de uma tipologia de edificação residencial unifamiliar, com a performance energética da envoltória sendo classificada conforme a metodologia apresentada na INI-R (INMETRO, 2022).

3. MÉTODO

Neste capítulo é apresentado o método adotado nesta pesquisa para alcançar o objetivo de analisar o desempenho termoenergético da envoltória de edificações residenciais empregando dois sistemas construtivos: *wood frame* e alvenaria de bloco cerâmico. A Figura 20 apresenta um diagrama que elenca as etapas do processo realizado neste estudo.

Figura 20 – Diagrama dos processos da pesquisa.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Para possibilitar a investigação, foi selecionada uma tipologia de edificação residencial, baseada em um modelo representativo de HIS, cuja geometria serviu de referência para simular a implantação dos dois sistemas construtivos. As simulações, executadas através de um programa computacional, foram baseadas na metodologia indicada na NBR 15575-1 e, a partir das suas variáveis de saída, pode-se classificar cada caso objeto de avaliação de acordo com o procedimento de etiquetagem apresentado na INI-R. Assim, foi possível determinar o nível de eficiência energética para cada arranjo construtivo projetado na análise.

Em particular, a pesquisa é baseada em diferentes composições de envelopes em *wood frame*, tendo em comum os elementos que compõem a sua estrutura em madeira de *Pinus Taeda*, as chapas OSB (constituídas por compósitos de madeira) e,

as placas de gesso acartonado servindo como revestimento interno das vedações verticais. Além destes, a cobertura composta por forro de madeira e camada de isolamento característica do referido sistema construtivo, também permaneceu constante dentre os casos propostos. Sendo assim, os painéis de *wood frame* foram associados especificamente aos elementos das paredes. O estudo abrangeu as 8 zonas bioclimáticas brasileiras apresentadas na NBR 15220 (ABNT, 2005) com a seleção de 10 cidades, das quais 3 representam a zona bioclimática 8 devido a sua predominância no território nacional.

Inicialmente, com base no referencial teórico, foram definidas as configurações dos elementos construtivos para os modelos reais denominados caso base em *wood frame* e caso base em alvenaria, sendo identificadas as propriedades termofísicas de seus materiais e as condições de contorno para realizar as simulações no software *EnergyPlus*. Após processadas as simulações, os resultados foram analisados e comparados a fim de definir a etiqueta e o desempenho térmico de cada caso avaliado. Em uma última etapa da pesquisa, a fim de verificar a performance termoenergética de diferentes envelopes em *wood frame* quando inseridos em climas brasileiros, foram selecionados 7 outros tipos de painéis e realizadas novas simulações, bem como análises comparativas.

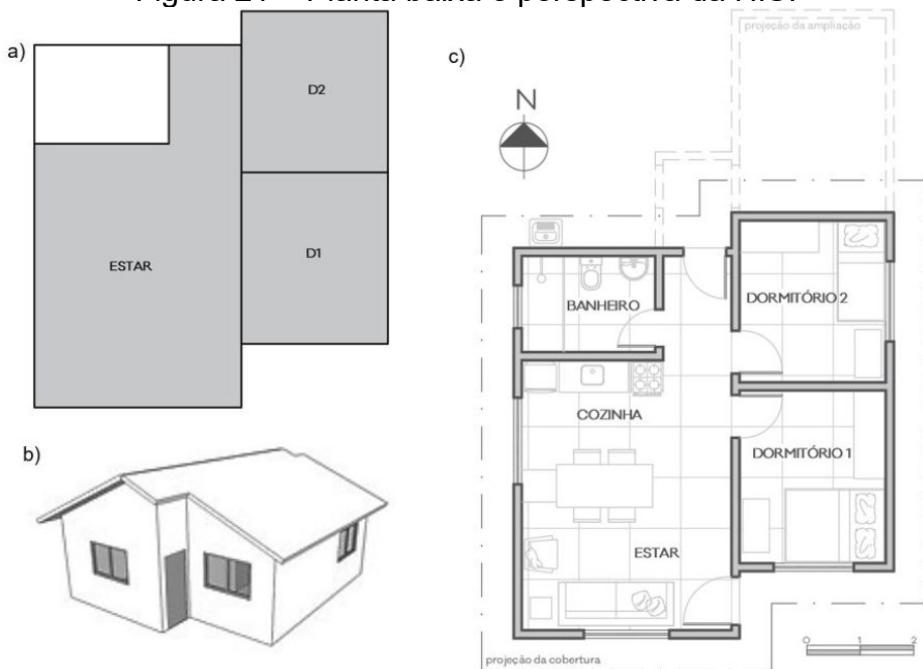
3.1 DEFINIÇÃO DA TIPOLOGIA DA EDIFICAÇÃO

Para a análise dos métodos construtivos, buscou-se um modelo que melhor representasse as habitações brasileiras, abrangendo o maior número de casos reais presentes no país destinados a população mais vulnerável.

Desta forma, foi considerada para a escolha a Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios (PNAD) realizada pelo IBGE, na qual foi indicado que em 2019 as casas correspondiam a 85,6% dos domicílios brasileiros (IBGE, 2019). Segundo Ferreira (2012), destas, as mais recorrentes são as residências unifamiliares térreas, sendo comumente destinadas as populações de baixa renda (LEITE, 2013).

Assim, foi selecionado um modelo representativo de habitação produto do trabalho de Triana, Lamberts e Sassi (2015), sendo a tipologia obtida através de duas amostras que somaram um total de 120 projetos, identificando a partir destes as tipologias mais comuns na habitação social do Brasil. A Figura 21 exibe o modelo de arquitetura escolhido para a pesquisa com base no enunciado acima.

Figura 21 – Planta baixa e perspectiva da HIS.



Fonte: Adaptado de Triana, Lamberts e Sassi (2015).

Como pode ser observado, o modelo representativo é composto por sala de estar e cozinha integradas, banheiro, circulação, além de dois dormitórios, somando uma área útil total de 43,22 m². As paredes são constituídas por tijolo de barro perfurado com dimensões de 9x14x19 cm, contando com reboco interno e externo, o que resulta em uma espessura total de 14 cm. A Tabela 2 apresenta as áreas úteis de cada ambiente da edificação.

Tabela 2 – Área útil dos ambientes da edificação.

Ambiente	Área útil (m ²)
Estar (cozinha, sala e circulação)	20,04
Dormitório 1	8,07
Dormitório 2	7,54
Banheiro	4,09
Área útil total UH	39,74

Fonte: Adaptado de Triana, Lamberts e Sassi (2015).

Quanto às aberturas, as janelas dos dormitórios e da sala de estar possuem área de 1,50 m², já a da cozinha equivale a 1,20 m² e, a do banheiro corresponde a 0,48 m². Com relação às portas, tanto as internas quanto as externas possuem medidas de 0,80x 2,10 metros, no entanto, as primeiras são constituídas em madeira en-

quanto as últimas são de alumínio. Referente aos materiais constituintes das esquadrias, as janelas contam com vidro simples transparente de 3 mm de espessura com molduras em alumínio ou aço.

O modelo unifamiliar térreo possui pé-direito de 2,50 metros, com beiral de 0,50 metros e forro de PVC. A cobertura é composta por duas águas e telha de barro vermelha. O piso conta com peças cerâmicas de 1 cm.

Por fim, ressalta-se que além das características geométricas, a orientação solar utilizada para avaliar o desempenho termoenergético dos diferentes sistemas construtivos será a mesma apresentada do projeto evidenciado na figura 25, estando a fachada principal, que corresponde as aberturas dos ambientes sala e dormitório 1, voltada para o sul.

3.2 CIDADES E CLIMAS ANALISADOS

O Brasil é um país delimitado por grande extensão latitudinal que contribui para uma notável diversidade de climas, sendo dividido em oito zonas bioclimáticas (ZB), onde ZB 1 corresponde a zona mais fria e ZB 8 é a mais quente (ABNT, 2005).

Desta forma, a fim de avaliar o comportamento termoenergético das edificações de *wood frame* em diferentes condições climáticas, foram selecionadas diferentes cidades as quais representam cada ZB brasileira, sendo compreendido dentre estas os três intervalos de temperaturas externas definidos pela NBR 15.575 (ABNT, 2024).

Além disso, para a seleção também foram considerados outros dois fatores: a posição geográfica e o número de habitantes dos municípios. Referente ao primeiro mencionado, buscou-se incluir municípios representantes das cinco regiões brasileiras e o maior número de estados federativos possíveis, já com relação a quantidade de habitantes, deu-se preferência aos maiores centros urbanos enquadrados nos grupos elencados inicialmente. Na Tabela 3 são apresentadas as cidades selecionadas com as respectivas ZBs, os intervalos de temperaturas externas, a tipologia climática conforme classificações de Köppen-Geiger, a localização geográfica e o número de habitantes, respectivamente.

Em virtude da grande parcela de área enquadrada como ZB8 – mais de 50% do território nacional segundo a NBR 15220 –, foram escolhidas 3 representantes para esta zona bioclimática: Rio de Janeiro, localizada na região sudeste e detentora da segunda maior população do país; Fortaleza, maior cidade em número de habitantes da região nordeste e; Manaus, município mais populoso da região norte.

Tabela 3 – Características das cidades selecionadas.

Cidade	ZB	Intervalo	Köppen-Geiger	Localização	Nº de habitantes
Curitiba	ZB1	1	Temperado Oceânico	PR/sul	1.773.718
Pelotas	ZB2	1	Temperado Oceânico	RS/sul	325.689
São Paulo	ZB3	1	Temperado Oceânico	SP/sudeste	11.451.999
Brasília	ZB4	1	Tropical de Savana	DF/centro-oeste	2.817.381
Joinville	ZB5	1	Temperado Oceânico	SC/sul	616.317
Campo Grande	ZB6	1	Tropical de Monção	MS/centro-oeste	898.100
Teresina	ZB7	3	Tropical de Savana	PI/nordeste	866.300
Rio de Janeiro	ZB8	1	Tropical de Monção	RJ/sudeste	6.211.423
Fortaleza	ZB8	2	Tropical Quente e Úmido	CE/nordeste	2.428.678
Manaus	ZB8	3	Tropical Superúmido	AM/norte	2.063.689

Fonte: Adaptado de ABNT (2005); ABNT (2024), Sentelhas (2014), IBGE (2022).

A tabela 4 mostra o resumo de algumas variáveis climáticas das cidades escolhidas para esta pesquisa com base nos dados de seus arquivos climáticos disponibilizados no repositório do *climate.onebuilding.org*. Especificamente para as cidades de Pelotas e Joinville, foram empregados arquivos TMYx (únicos presentes na base de dados), enquanto para as demais cidades usou-se arquivos INMET.

Tabela 4 – Variáveis características das cidades selecionadas.

(continua)

Cidade	Temperatura Mín. (°C)	Temperatura Máx. (°C)	Umidade média anual (%)	Temperatura média anual (°C)
Curitiba	3,7	32,2	78,73	17,38
Pelotas	3,2	38,0	79,68	18,73
São Paulo	8,5	33,8	71,71	19,57

Fonte: Elaborado pela autora (2024) com base nos dados de *climate.onebuilding.org* (2023).

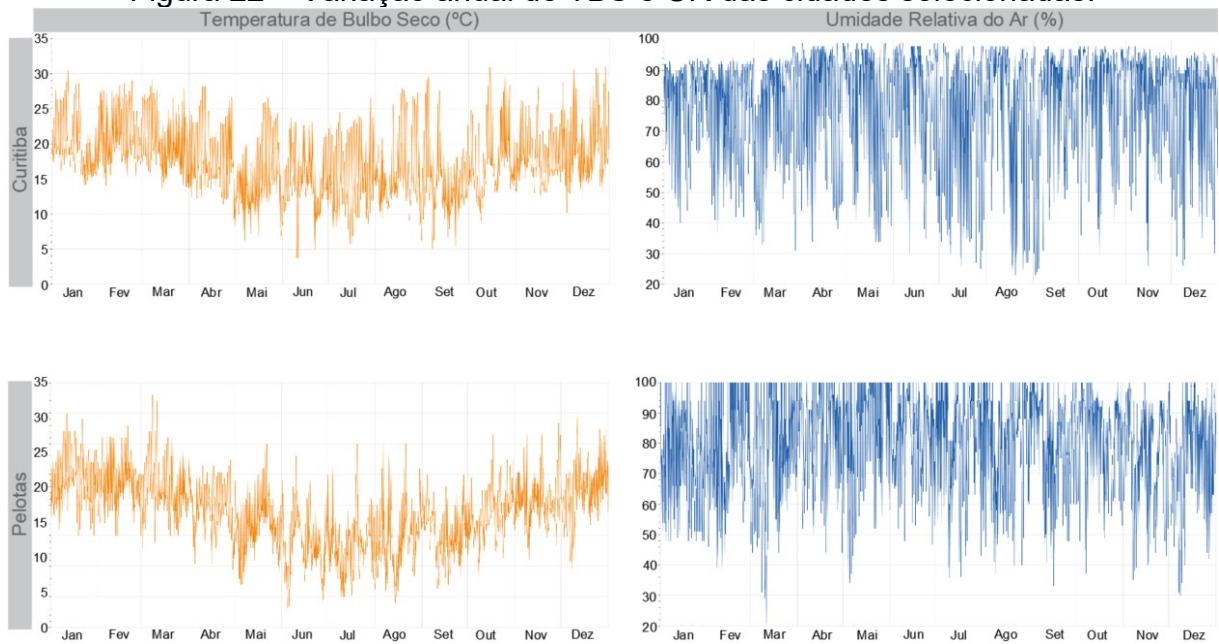
Tabela 4 – Variáveis características das cidades selecionadas.

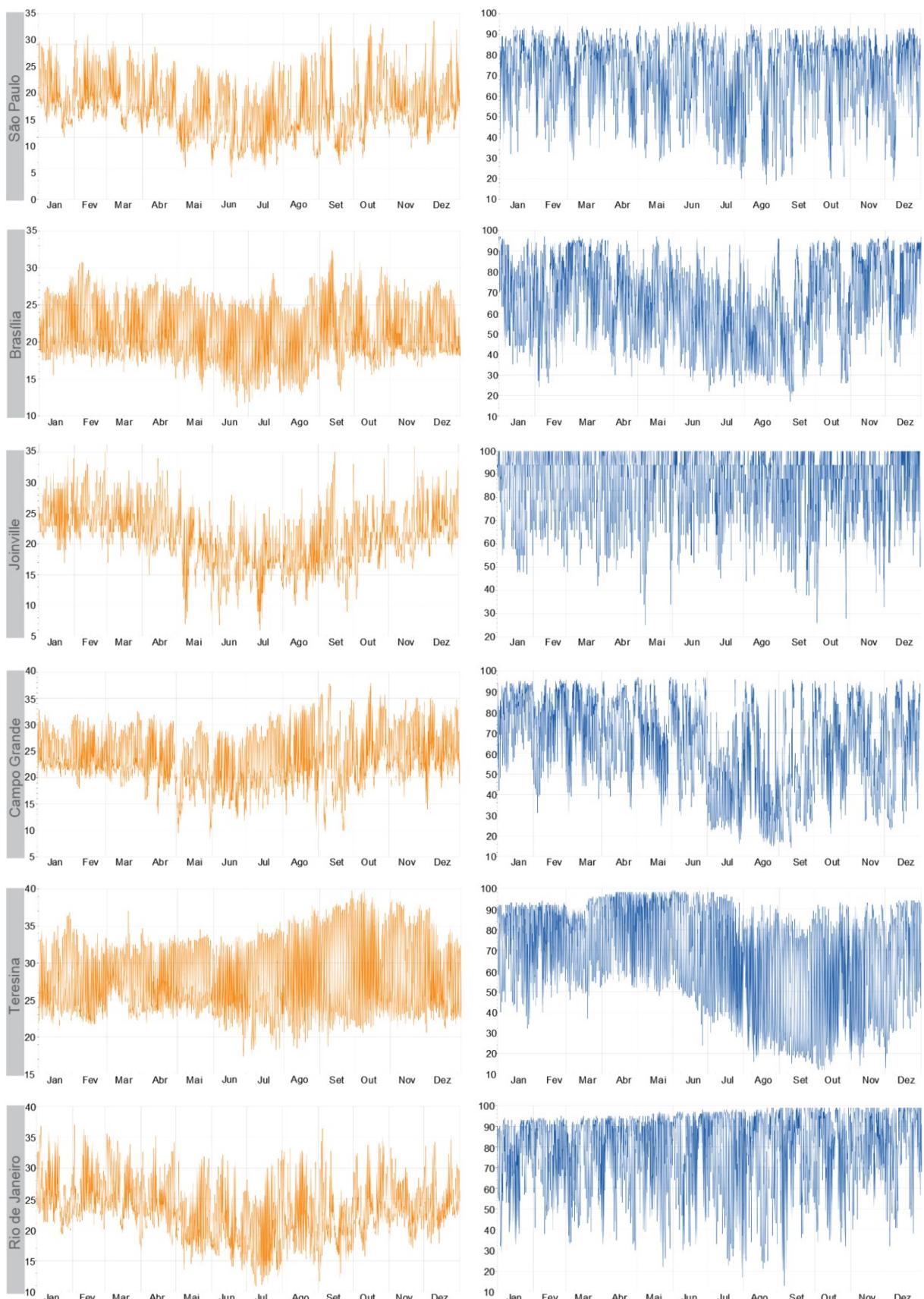
	(conclusão)			
Brasília	11,2	32,7	66,25	21,08
Joinville	6,0	36,0	85,78	21,12
Campo Grande	8,0	37,9	65,70	23,45
Teresina	17,4	39,9	68,47	27,69
Rio de Janeiro	10,9	37,0	78,29	23,15
Fortaleza	21,0	32,4	75,67	26,65
Manaus	20,6	37,0	80,36	27,28

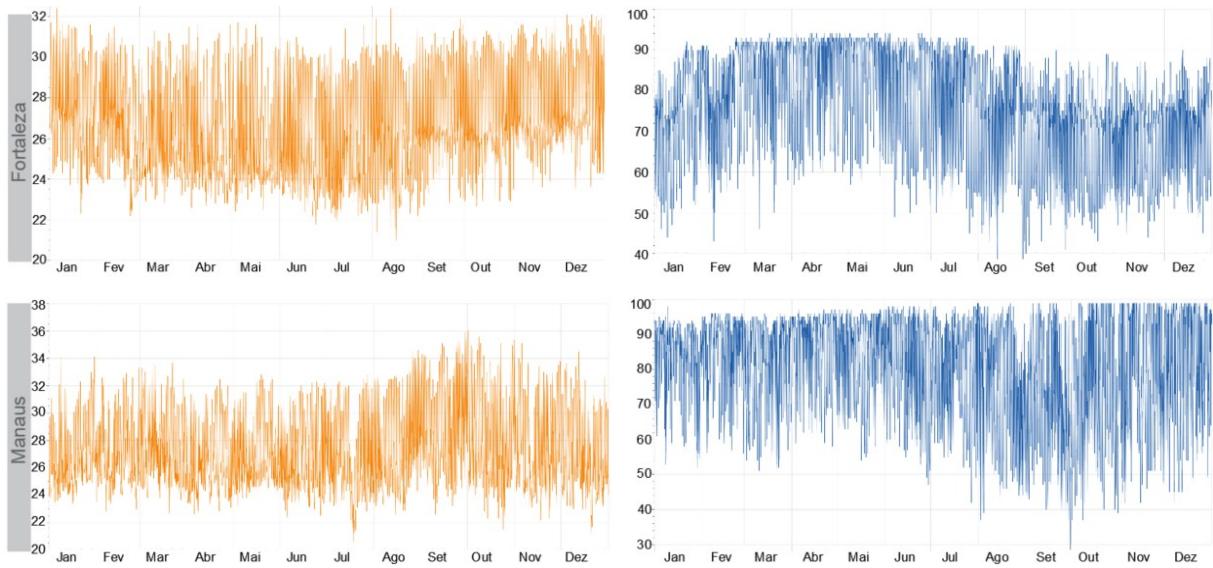
Fonte: Elaborado pela autora (2024) com base nos dados de climate.onebuilding.org (2023).

A Figura 22 apresenta graficamente as variações anuais da TBS e Umidade Relativa (UR) do ar de cada clima e cidade selecionada. Os valores apresentados foram extraídos dos arquivos climáticos seguindo o sugerido pela Parte 1-1 da NBR 15.575 (ABNT, 2021), os quais foram obtidos a cada hora para cada dia do ano.

Figura 22 – Variação anual de TBS e UR das cidades selecionadas.







Fonte: Elaborado pela autora (2024) com base nos dados de climate.onebuilding.org (2023).

Dentre as cidades selecionadas Curitiba, Pelotas, São Paulo e Joinville possuem clima temperado oceânico, o qual é caracterizado por apresentar as estações bem definidas ao longo do ano. Já Brasília e Teresina apresentam clima do tipo tropical de savana, caracterizado por possuir inverno seco.

Rio de Janeiro e Campo Grande possuem clima de monção tropical, com alto índice de chuvas durante o verão, enquanto Fortaleza se enquadra no clima tropical quente e úmido, possuindo verão seco. Por último, a cidade de Manaus classificada como clima tropical úmido ou superúmido, não apresenta estação seca.

3.3 CONFIGURAÇÃO DAS ENVOLTÓRIAS E PARÂMETROS TERMOFÍSICOS DOS MATERIAIS

As configurações das envoltórias das edificações simuladas, assim como a definição dos parâmetros termofísicos de cada material, foram definidos para três modelos iniciais: um caso de referência e dois casos base para o modelo real. Para o último modelo mencionado, foi incorporado o sistema construtivo *wood frame* (WF) e a alvenaria convencional (AC), sendo analisados e comparados os desempenhos termoenergéticos dos três casos citados.

Todos os modelos avaliados apresentam as mesmas características de volume interno, áreas de superfícies expostas ao exterior, norte geográfico, área de piso total dos ambientes e a mesma condição de contato com o solo. Apresentam, ainda, a mesma divisão interna de ambientes e ático sob a cobertura, sendo este modelado como um ambiente, conforme orientações da NBR 15.575 (ABNT, 2024). Referente a

cobertura, cabe indicar que, devido a simplificações do programa computacional empregado nas simulações, nos três modelos estudados a câmara de ar que compõe o ático e o telhado foram modelados de forma paralela entre si, sendo desconsiderada a inclinação das telhas que formam a geometria real da cobertura.

Para a determinação das propriedades térmicas dos materiais construtivos foram consultadas as normativas NBR 15.220 (ABNT, 2005), NBR 15.575 (ABNT, 2024) e catálogos de fornecedores. Os elementos verticais transparentes (vidros), foram considerados com as mesmas características em todos os modelos analisados, sendo adotado um vidro transparente e simples de 3 mm de espessura, com condutividade térmica de 0,90 W/m.K e emissividade de 0,84. A seguir são apresentados com mais detalhes cada um dos modelos avaliados e as suas configurações.

3.3.1 Modelo de referência

O modelo de referência, conforme mencionado no capítulo anterior, representa a edificação com características de referência. Seguindo a NBR 15575 (ABNT, 2021), este modelo mantém a volumetria do modelo real, porém, são alterados os percentuais de elementos transparentes e aberturas para ventilação, além das propriedades térmicas dos sistemas construtivos. Nesse modelo também não são considerados elementos de sombreamento da edificação, como o beiral.

Para a simulação do caso referência, utilizou-se um arquivo compactado de simulação disponibilizado pelo LabEEE da UFSC. Este modelo contém as características geométricas de uma edificação residencial unifamiliar baseada no estudo de Triana, Lamberts e Sassi (2015), correspondendo a mesma moradia elencada para esta pesquisa. Os elementos construtivos opacos e os valores das suas propriedades termodifísicas inseridas nas simulações são expositas na Tabela 5, enquanto a projeção isométrica da moradia referenciada é apresentada na Figura 23.

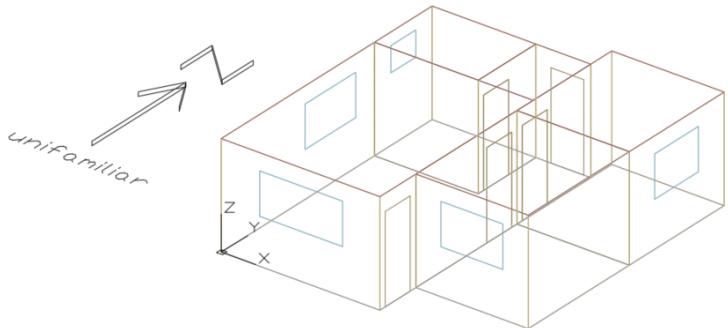
Para a absorvidade à radiação solar e a emissividade das paredes internas, laje e pisos da edificação foi adotado um valor padrão em todas as simulações, correspondendo a 0,30 para a primeira variável e a 0,90 para a segunda. Estes valores são equivalentes a uma pintura de cor clara, conforme apresentado na NBR 15220, e foram empregados a fim de uniformizar a interferência destes fatores nos resultados de cada caso analisado no presente estudo.

Tabela 5 - Parâmetros termofísicos dos elementos opacos do modelo de referência.

Elemento	Condutividade térmica (W/mk)	Calor específico (J/KgK)	Absorvtividade à radiação solar	Emissividade de onda longa	Densidade (Kg/m ³)
Paredes exter- nas	1,75	1000	0,58	0,90	2200
Paredes in- ternas	1,75	1000	Adotar valor do modelo real	Adotar valor do modelo real	2200
Pisos	1,75	1000	Adotar valor do modelo real	Adotar valor do modelo real	2200
Telha com 6 mm de espessura	0,65	840	0,65	0,90	1700
Laje com 100 mm de espes- sura	1,75	1000	Adotar valor do modelo real	Adotar valor do modelo real	2200

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 15575 (2021) e ABNT NBR 15220 (2022).

Figura 23 – Geometria do modelo de referência.



Fonte: Adaptado de LabEEE (2023).

Quanto aos elementos transparentes das vedações verticais, os vidros do modelo de referência são simples de 3 mm, com fator solar de 0,87 e transmitância térmica equivalente a 5,70 W/m²K, conforme apresentado na Tabela 6.

Referente a ventilação, para os ambientes de permanência prolongada (APP) foi modelada uma área total de 17% da área do piso para os elementos transparentes, os quais contaram com abertura equivalente à 45% da área do respectivo elemento. Deste modo, a abertura para ventilação dos APPs foi igual a 7,5% em relação a área de seu piso, enquanto nos demais ambientes manteve-se as características do modelo real, em conformidade ao determinado no item 11.4.7.2 da Parte 1 da NBR 15575 (ABNT, 2024).

Tabela 6 – Características térmicas dos elementos transparentes do modelo de referência.

Elemento	Fator solar (FS)	Transmitância térmica (W/m ² k)	Percentual de elementos transparentes (%)
Vidro simples com 3 mm de espessura	0,87	5,70	17,00

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 15575 (2021) e ABNT NBR 15220 (2022).

Cabe destacar que para a simulação da ventilação natural das aberturas (portas e janelas), seguindo a NBR 15.575 (ABNT, 2024), as portas permaneceram sempre fechadas. A janela do banheiro manteve-se sempre aberta com ventilação constante, e as demais janelas dos APP tiveram seus critérios de ventilação definidos conforme as variações no padrão de uso.

Além desses elementos, conforme estabelecido na norma brasileira de desempenho de edificações habitacionais, foi adotada uma câmara de ar entre a laje e a cobertura com resistência térmica de 0,21 (m².K)/W e, exclusivamente para as cidades de Rio de Janeiro, Fortaleza e Manaus - por estarem localizadas na ZB 8 -, considerou-se o uso de isolamento sobre a laje, com resistência térmica igual a 0,67 (m².K)/W e absorvividade solar de 0,70.

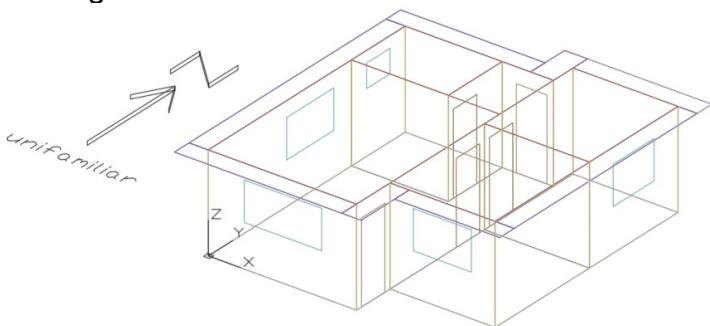
3.3.2 Modelos reais

Para os modelos reais, as dimensões dos ambientes da edificação mantiveram-se as mesmas do caso referência, assim como as áreas de aberturas para portas e janelas. Entretanto, nos modelos reais, adicionou-se o beiral de 0,50 m conforme o projetado no modelo representativo de habitações sociais levantado por Triana, Lambererts e Sassi (2015) e apresentado na Figura 24.

Além disso, alterou-se a composição dos materiais das paredes e laje da cobertura, a fim de analisar os sistemas construtivos desejados. Inicialmente, foram desenvolvidos dois casos para serem simulados como modelos reais: um em *wood frame* e outro em alvenaria, visando comparar os desempenhos térmicos das envoltórias, visto que a alvenaria convencional, como mencionado anteriormente, é o sistema construtivo mais utilizado no Brasil atualmente.

Da mesma maneira, como considerada no modelo de referência, para os modelos reais adotou-se uma câmara de ar entre a laje/forro e a cobertura, com resistência térmica de 0,21 (m².K)/W, conforme exposto na Tabela 9 da NBR 15220/2022.

Figura 24 – Geometria do modelo de real.



Fonte: Adaptado de LabEEE (2023).

Quanto ao isolamento, para o modelo em *wood frame*, o qual não conta com laje na cobertura, foi considerada uma camada isolante de lã de rocha com 50 mm de espessura sobre o forro, sendo esta configuração simulada para todas as zonas bioclimáticas, conforme o recomendado no item 4.3.1 do DATec nº 020-E.

Já para o modelo em alvenaria, o qual igualmente ao modelo de referência conta com laje na cobertura, foi empregado um isolamento exclusivamente para as cidades localizadas na ZB 8, o qual conta com resistência térmica igual a 0,67 $(m^2 \cdot K)/W$ e absorvividade solar de 0,70, sendo considerado como material a lã de rocha com 30 mm de espessura.

3.3.2.1 Caso base em *wood frame*

As configurações adotadas para as paredes deste modelo real foram baseadas nas composições mais utilizadas em HIS no Brasil empregando o sistema construtivo *wood frame*. Os arranjos correspondem aos apresentados no DATec nº 020-E destinados as edificações terreas, sendo a primeira tipologia do sistema leve em madeira aprovada pelo SINAT que permitiu o financiamento de casas construídas com a referida tecnologia em programas habitacionais.

Inicialmente, para reproduzir os quadros estruturais em madeira serrada, fez-se necessário definir a espécie da mesma. Desta forma, ao consultar a NBR 16936, observou-se em seu item 7.4.2 a indicação de uma composição básica de parede estrutural com resistência ao fogo por 30 minutos, conforme ensaio de resistência a incêndio apresentado na ABNT NBR 5628. Esta parede é descrita com montantes de madeira de pinus com seção de 38mm x 89 mm, tratados com CCA, classe C25, espaçados a cada 60 cm, de maneira consoante a estrutura apresentada ao DATec nº

020-E, que defini ainda a espécie empregada como a do tipo *taeda*, sendo esta configuração a selecionada para compor a ossatura do caso base em *wood frame*.

O *Pinus taeda* reúne excelentes qualidades de produção florestal, tendo capacidade de crescimento 30% maior que outras espécies destinadas ao reflorestamento e compõe cerca de 70% das florestas plantadas no Brasil (TOMAZELLO FILHO *et al.*, 2017). As especificações técnicas e as propriedades termofísicas deste material foram atribuídas de acordo com o indicado na norma de desempenho térmico das edificações, tendo condutividade térmica equivalente a 0,15 W/m.K, densidade de 600 kg/m³ e calor específico igual a 1340 J/kg.K, conforme apresentado no Quadro 3.

Para o contraventamento da ossatura adotou-se painéis OSB em sua face externa seguida de membrana impermeável, a qual protege as superfícies da madeira ao permitir a saída de vapor e umidade interna da edificação ao mesmo tempo que impede a entrada de água que pode passar pelo acabamento externo. A última camada da face externa é composta por placas cimentícias com 8 mm de espessura.

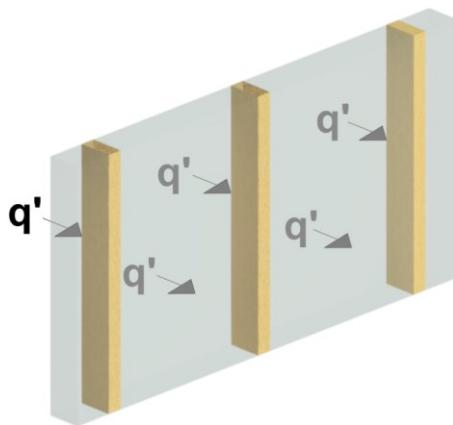
As paredes internas da edificação consistem em manter o mesmo quadro estrutural mencionado acima seguido de face contraventada com painéis OSB. No caso de paredes secas, estas foram envolvidas por chapas drywall de 12,5 mm, não sendo necessário o emprego de membrana impermeável. Já as paredes internas das áreas molhadas (cozinha e banheiro) apresentam acabamentos com revestimento cerâmico, sendo aplicado sobre o sistema drywall do tipo resistente a umidade (RU), com a finalidade de proteger a madeira. A membrana impermeável foi associada junto ao drywall nesses casos, também com a finalidade de proteger os painéis da umidade.

Para o piso da edificação, com o intuito de simular o mesmo tipo de contato com o solo para todos os casos, optou-se por manter a laje de concreto, a qual é comumente empregada no sistema leve em madeira tendo em vista a umidade constante presente na superfície terrea. Adicionalmente, seguindo a mesma configuração do modelo representativo elaborado por Triana, Lamberts e Sassi (2015), foi associada sobre a estrutura de concreto uma camada de revestimento cerâmico.

Na cobertura, empregou-se uma configuração básica aplicada a casas térreas, sendo composta por forro de madeira e isolante térmico em manta de lã de vidro, conforme indicado no item 4.3.1 do DATec nº 020-E. Para o telhado foram adotadas telhas de barro, conforme as características do modelo representativo de Triana, Lamberts e Sassi (2015).

Convém elucidar que, nos elementos verticais de vedação opacos (paredes), especificamente nos quadros estruturais, foi necessário efetuar ajustes na configuração de seus arranjos. Isso decorreu em virtude da área transversal da referida camada ser composta por montantes de madeira e câmaras de ar paralelos entre si, fazendo com que o fluxo de calor atravesse elementos com propriedades térmicas distintas posicionadas em uma mesma camada. A Figura 25 ilustra o enunciado.

Figura 25 – Fluxo de calor atravessando elementos do quadro estrutural em paralelo.

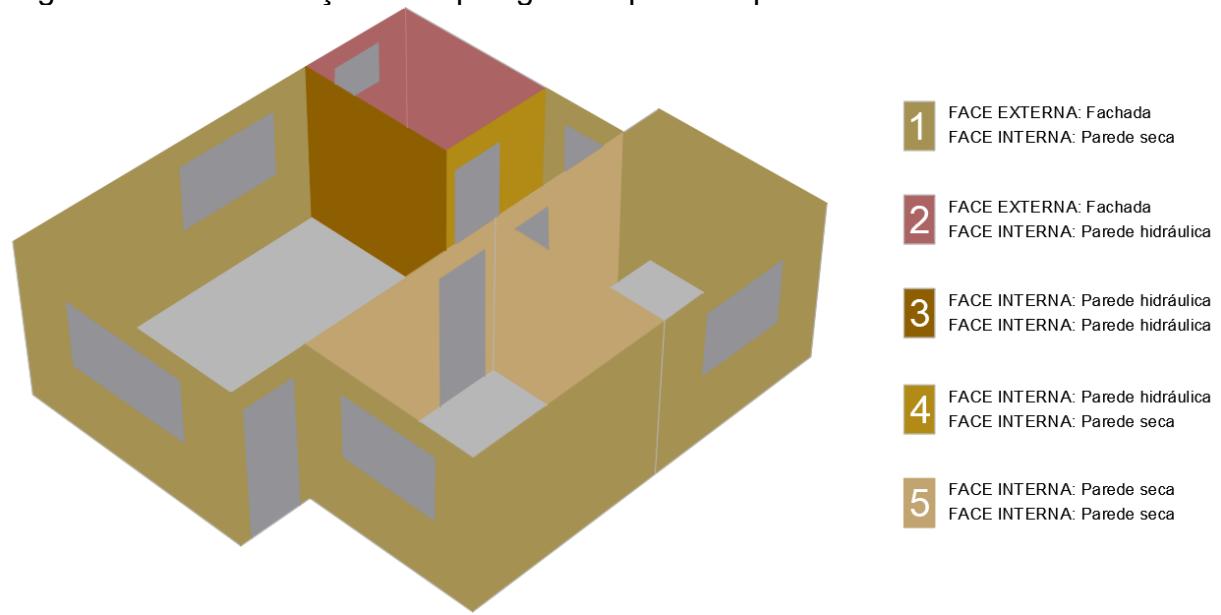


Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Desta forma, tendo em vista que o *software* empregado para executar as simulações possui limitações quanto a geometria do componente para a quantificação energética, foi necessário adequar a camada heterogênea que compõe o quadro estrutural do modelo em *wood frame*. Para isso, suas camadas em paralelo foram convertidas em camadas em série, uma vez que o *software* de simulação computacional considera todos os componentes formados por camadas transversais ao fluxo de calor, não permitindo o cálculo de resistências térmicas em paralelo.

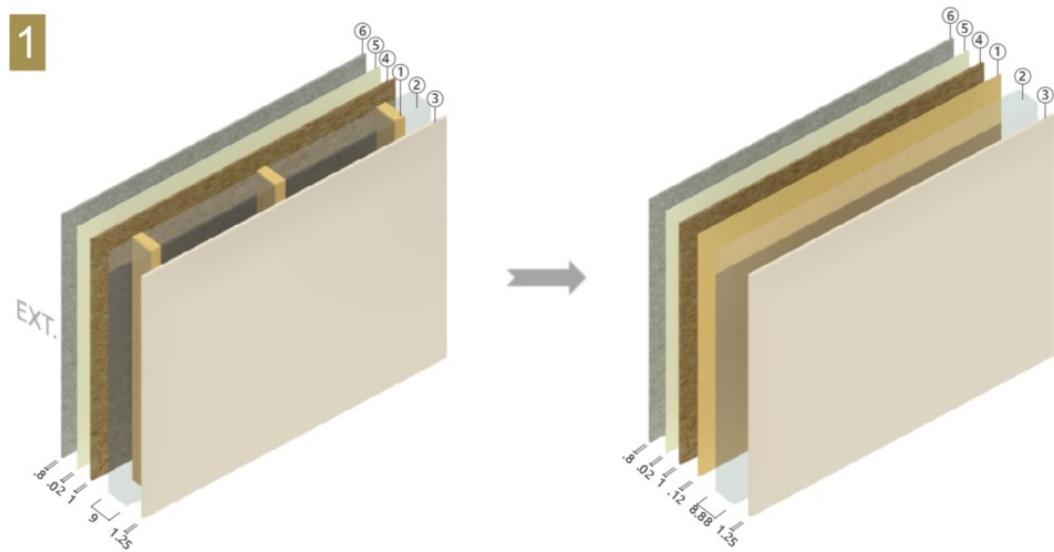
Com isso, optou-se por utilizar uma equivalência das espessuras das camadas dos montantes de madeira e das câmaras de ar sem alterar os parâmetros de resistência térmica dos elementos, aplicando a metodologia apresentada no estudo de Weber *et al.* (2017). Estas configurações equivalentes dos painéis originais permitiram modelar as paredes em *wood frame* no *software* de simulação computacional, podendo ser verificados nas Figuras 26 e 27 e no Quadro 3 as classificações e configurações dos elementos construtivos descritos, assim como os valores dos parâmetros termofísicos inseridos nas simulações.

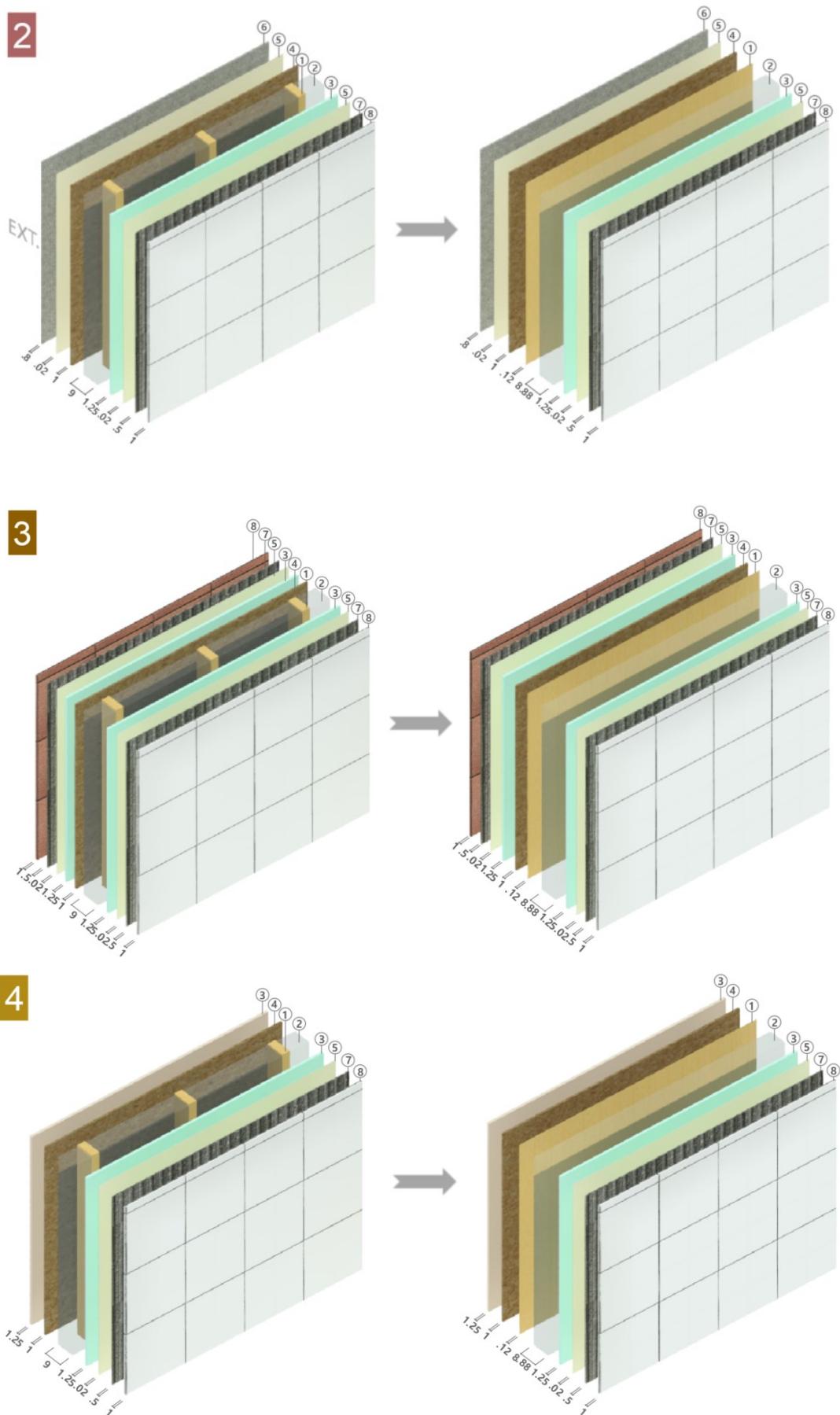
Figura 26 – Classificação das tipologias de paredes para o modelo em *wood frame*.

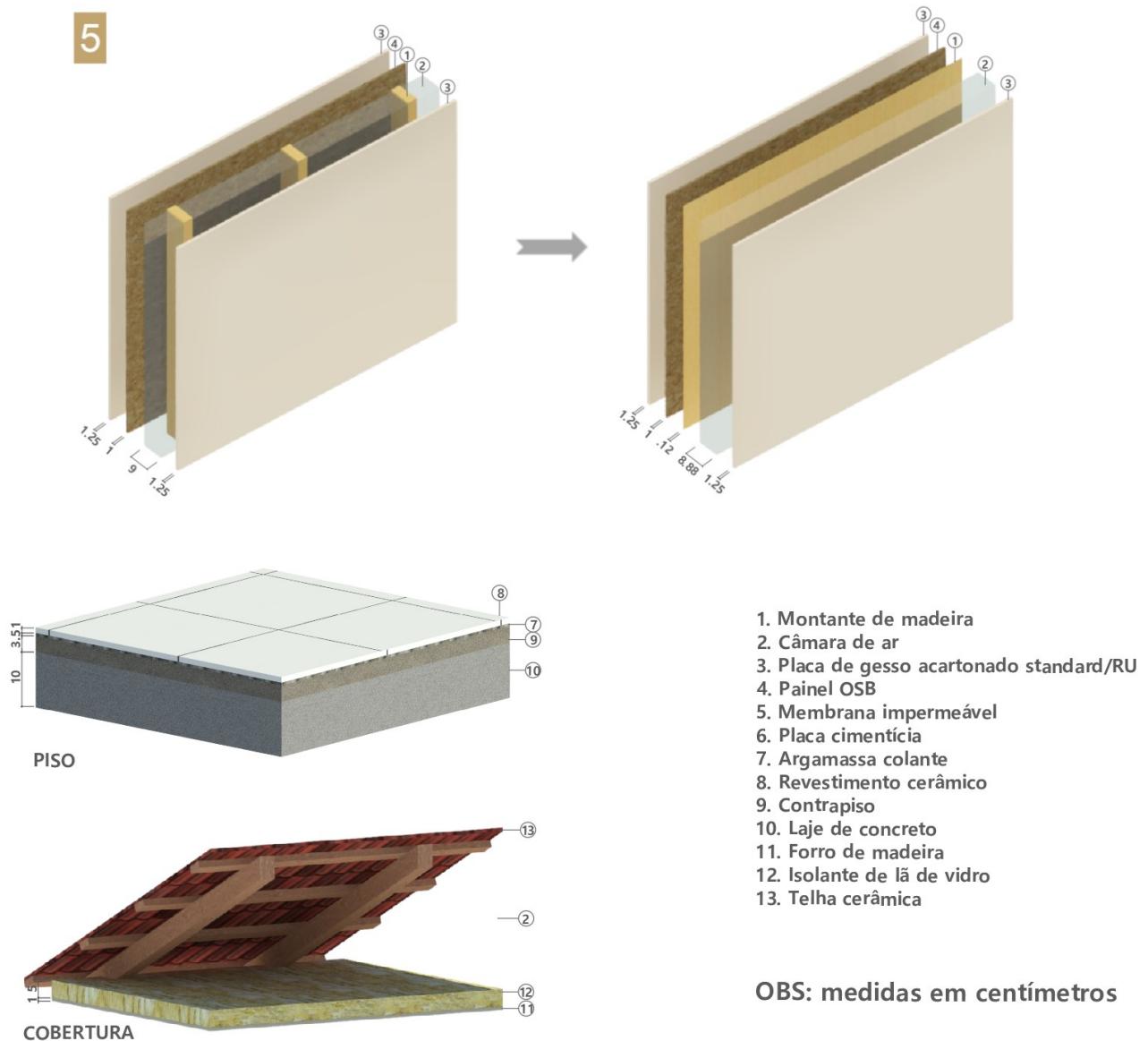


Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Figura 27 – Configuração das paredes originais e equivalentes e dos demais elementos construtivos do modelo em *wood frame*.







Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Quadro 3 – Parâmetros termofísicos dos materiais para o modelo *wood frame*.

(continua)

Material	Espessura (mm)	Conduvidade térmica (W/m.k)	Densidade (Kg/m³)	Calor específico (J/kg.K)	Absorvidade solar	Emissividade
Montante de madeira	1,2	0,15	600	1340	0,70	0,90
Placa de gesso acartonado standard/RU	12,5	0,35	750	840	0,30/0,50	0,90
Painel OSB	10	0,15	500	2300	0,50	0,87
Membrana impermeável de polietileno	2	0,16	950	1850	0,70	0,88

Fonte: Adaptado de ABNT (2005); Thermoworks (s.d.).

Quadro 3 – Parâmetros termofísicos dos materiais para o modelo *wood frame*.

(conclusão)

Material	Espessura (mm)	Condutividade térmica (W/m.k)	Densidade (Kg/m ³)	Calor específico (J/kg.K)	Absorção solar	Emissividade
Placa cimentícia	8	0,95	1520	840	0,30	0,90
Argamassa colante	5	1,15	2000	1000	0,60	0,94
Revestimento cerâmico	10	1,00	1700	920	0,30	0,94
Contrapiso	30	1,15	2000	1000	0,60	0,94
Laje de concreto	100	1,75	2200	1000	0,50	0,95
Forro de madeira	10	0,15	600	1340	0,30	0,90
Porta de madeira	30	0,15	650	1340	0,50	0,90
Telha cerâmica	6	1,05	2000	920	0,65	0,90

Fonte: Adaptado de ABNT (2005); *Thermoworks* (s.d.).

O isolante térmico em lã de vidro foi considerado como um material de baixa massa na simulação, sendo desta forma utilizado o valor da sua resistência térmica, obtida através da razão entre a condutividade térmica do material, equivalente a 0,045 W/m.k, e a sua espessura, igual a 50 mm.

Para as câmaras de ar também foi adotada a resistência térmica como parâmetro nas simulações. No caso das paredes, com fluxo de calor considerado na direção horizontal e com espessura da camada de ar entre 50 mm a 100 mm, adotou-se o valor de 0,16 m².K/W, enquanto para a cobertura, como já mencionado anteriormente, assumiu-se o valor de 0,21 m².K/W, estando tais grandezas em conformidade ao exposto nas tabelas 8 e 9 da ABNT NBR 15220/2022.

Estes valores também foram empregados para mensurar a transmitância térmica (U) dos elementos construtivos do caso base em *wood frame*, sendo apresentados na Tabela 7 juntamente com a capacidade térmica (C) de cada componente. Para o cálculo das respectivas características térmicas empregou-se as equações 1, 3 e NA.1 indicadas na ABNT NBR 15220-2/2022.

Tabela 7 – Características térmicas dos elementos construtivos do caso base em *wood frame*.

Parede 1	Parede 2	Parede 3	Parede 4	Parede 5	Cobertura
U (W/m ² K)	2,24	2,16	1,98	2,05	2,12
C (kJ/(m ² K))	30,33	56,07	79,12	53,38	27,64

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Especificamente para a configuração da parede 1, que delimita a envoltória dos APPs da UH, e para a cobertura do modelo em *wood frame*, também se determinou o atraso térmico dos referidos sistemas, sendo equivalente a 1,55 horas e 1,21 horas, respectivamente. Para o cálculo da referida variável aplicou-se as equações indicadas na ISO 13786/2017.

Cabe ainda indicar que, a fim de uniformizar a interferência da absorvidade e emissividade térmica nos resultados termoenergéticos, os materiais com área superficial diretamente exposta ao ambiente, como placas de gesso acartonado, placas cimentícias e forro de madeira, tiveram os valores de tais variáveis fixadas a 0,30 e 0,90, respectivamente, em consonância ao enunciado no item 3.3.1.

Por fim, torna-se importante evidenciar que tais valores foram padronizados somente para o caso das superfícies expostas, não se aplicando quando os mesmos materiais se encontram posicionados no interior da estrutura do elemento construtivo. Assim, para o caso das placas de gesso RU, localizadas na parte interna da parede em *wood frame*, assumiu-se o valor de absorvidade solar de 0,50, conforme valor divulgado pela ThermoWorks (empresa fabricante de instrumentos para medição de parâmetros termofísicos).

3.3.2.2 Caso base de alvenaria

As configurações adotadas para os elementos construtivos do modelo real de alvenaria foram baseadas no modelo representativo obtido por Triana, Lamberts e Sassi (2015), sendo, porém, efetuadas algumas adequações a fim que as simulações fossem executadas de forma mais proporcional entre os casos.

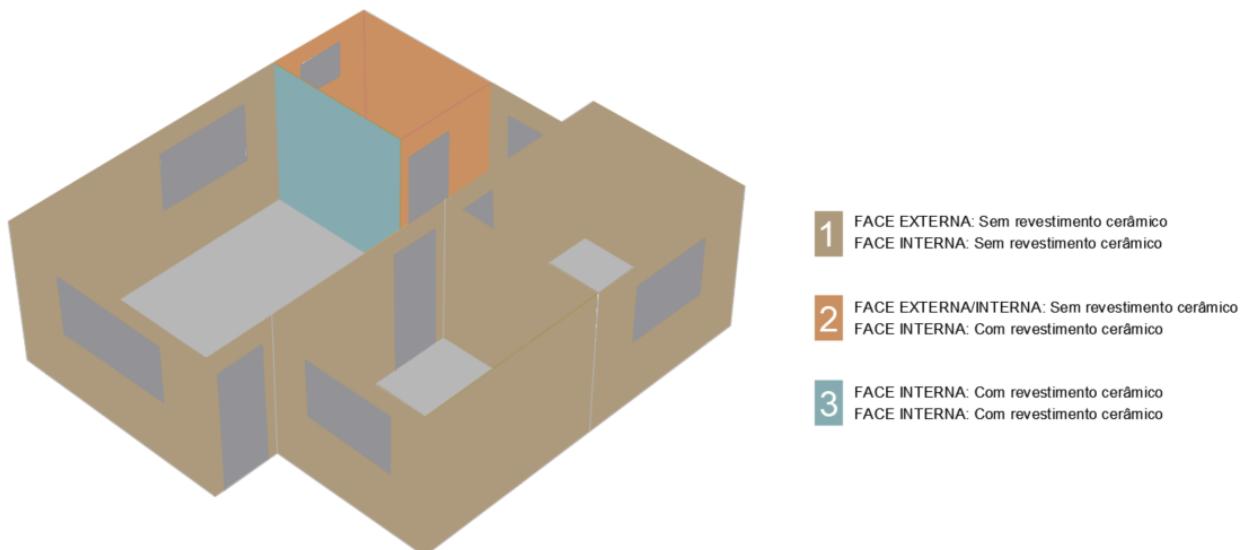
Para esta tipologia as vedações verticais opacas são compostas por blocos de tijolos cerâmicos furados de 9 x 14 x 19 cm (largura, altura, comprimento), revestidos com camada de reboco na face interna e externa com espessura de 2 cm. Nas áreas molhadas, como cozinha e banheiro, encontram-se adicionadas placas de revestimento cerâmico nas faces das paredes.

Igualmente ao modelo de referência, foi adotada uma laje de concreto de 10 cm para o arranjo da cobertura, visando assim simular parâmetros semelhantes quanto aos elementos construtivos dos casos analisados. Para o acabamento inferior dessa laje, considerou-se uma camada de reboco e, exclusivamente para as cidades inseridas na ZB 8, foi associada uma camada de isolamento térmico de lã de vidro com resistência térmica igual a 0,67 m².K/W e absorvidade solar de 0,70.

A fim de simular o mesmo tipo de contato com o solo, para o piso desta edificação, da mesma forma que no modelo em *wood frame*, optou-se por associar uma laje de concreto com a aplicação de revestimento cerâmico sobre esta. As classificações e configurações dos elementos construtivos descritos para este modelo real podem ser verificadas nas Figuras 28 e 29, respectivamente.

Como pode ser observado em sequência, assim como o quadro estrutural do modelo em *wood frame*, o tijolo cerâmico também tem sua estrutura composta por diferentes elementos, formando uma camada heterogênea. Desta maneira, foi necessário converter a sua estrutura para camadas em série, a fim de que todos os componentes materiais da parede em alvenaria tenham a sua geometria formada por camadas transversais ao fluxo de calor, o que possibilitou a simulação no programa computacional.

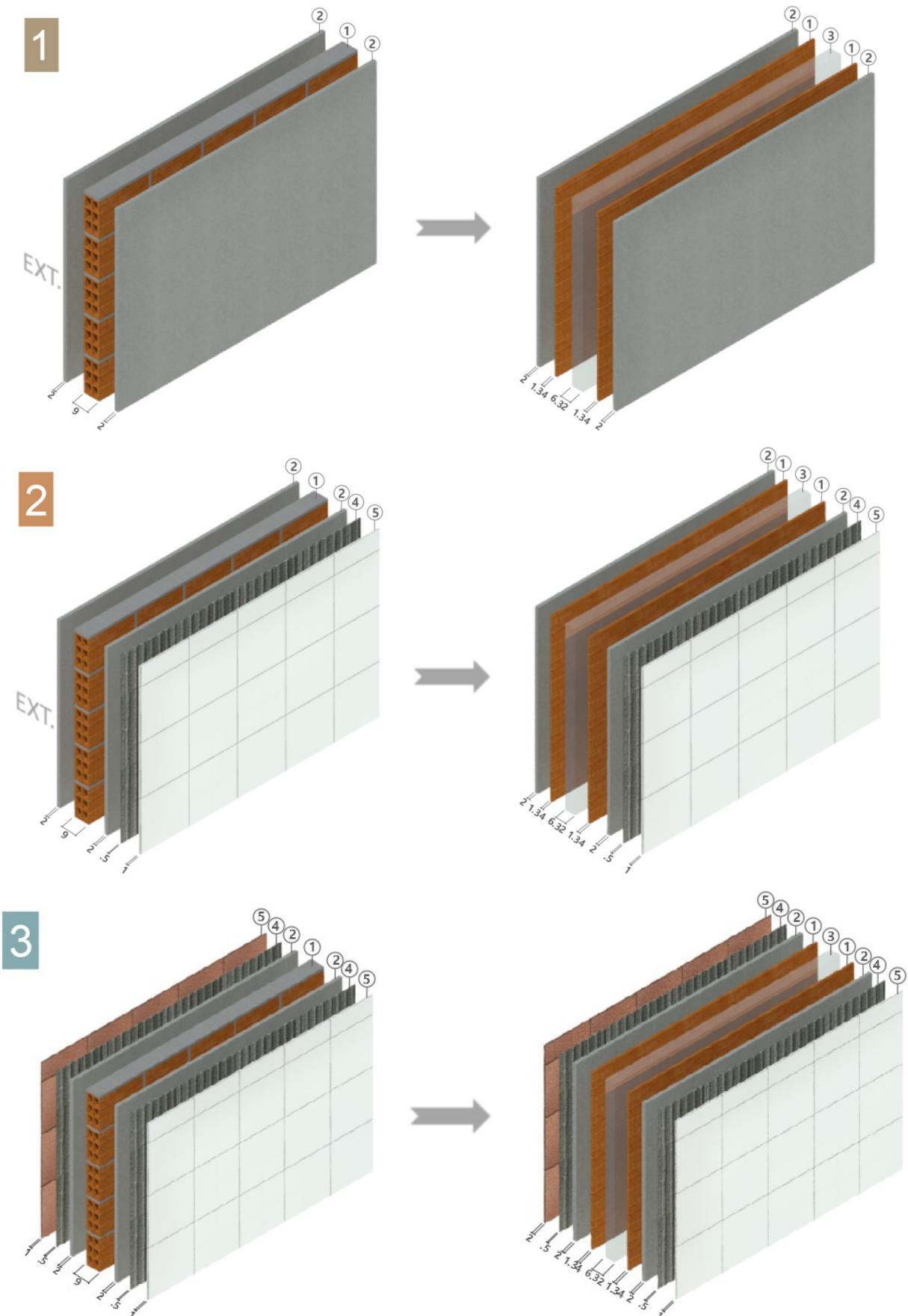
Figura 28 – Classificação das tipologias de paredes para o modelo em *wood frame*.

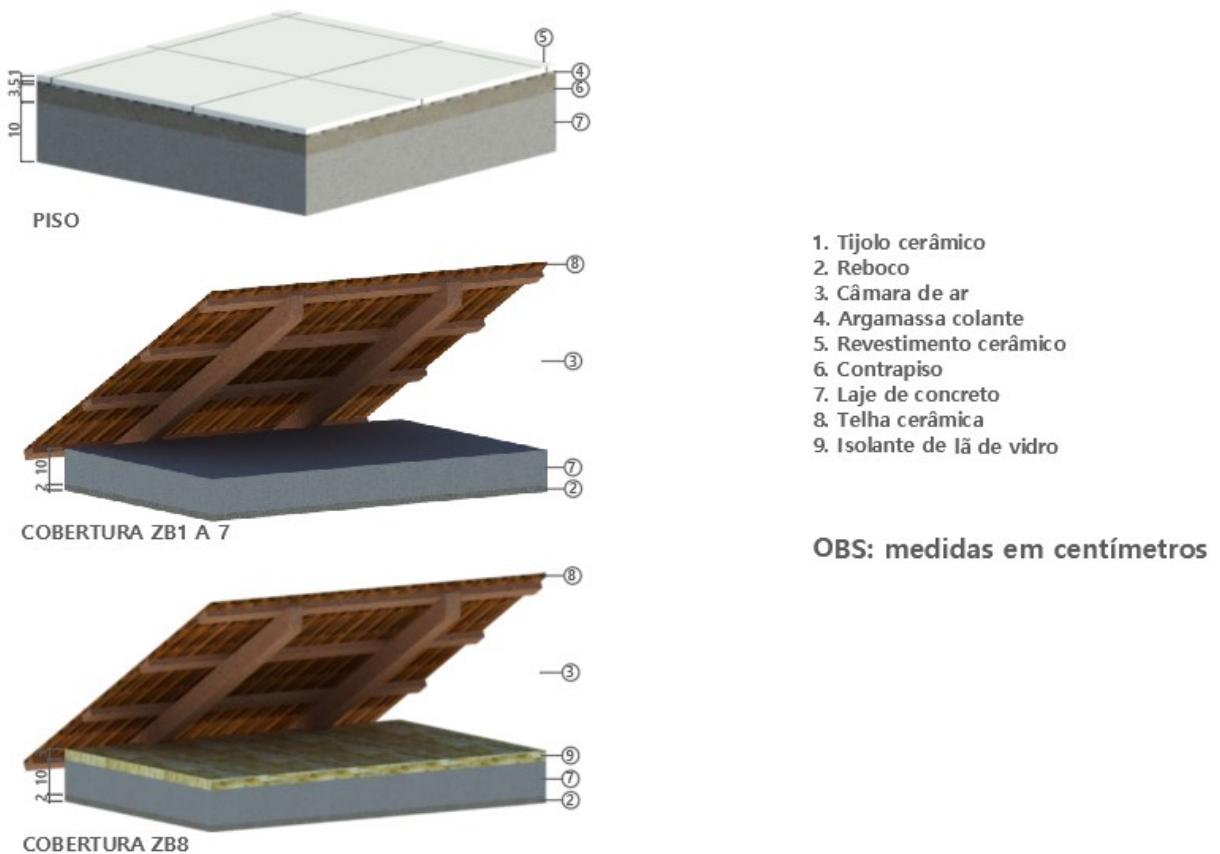


Fonte: Elaborado pela autora (2024).

As espessuras equivalentes das camadas de cerâmica e das câmaras de ar do tijolo foram obtidas diretamente através dos resultados do estudo de Weber *et al.* (2017, p. 43), no qual foram alteradas as espessuras originais dos materiais com camadas heterogêneas sem alterar os parâmetros térmicos da sua estrutura. Conforme o referido estudo, o tijolo que compõe o sistema construtivo objeto desta análise possui camadas equivalentes, que correspondem a duas camadas cerâmicas com 1,34 cm de espessura e uma câmara de ar de 6,32 cm de espessura, sendo tais medidas adotadas para os modelos equivalentes das vedações verticais opacas do sistema construtivo em alvenaria.

Figura 29 – Configuração das paredes originais e equivalentes e dos demais elementos construtivos do modelo em alvenaria.





Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Para a câmara de ar das paredes em alvenaria, em virtude destas possuírem parâmetros similares aos das paredes em *wood frame*, adotou-se uma resistência térmica de $0,16 \text{ m}^2.\text{K/W}$, enquanto para a câmara de ar presente na cobertura, pelos mesmos motivos, assumiu-se uma resistência térmica de $0,21 \text{ m}^2.\text{K/W}$, conforme a ABNT NBR 15220/2022. O Quadro 4 a seguir apresenta os parâmetros termofísicos associados aos elementos construtivos para o modelo de alvenaria.

Quadro 4 – Parâmetros termofísicos dos materiais para o modelo de alvenaria.

(continua)

Material	Espessura (mm)	Conduvidade térmica (W/m.k)	Densidade (Kg/m ³)	Calor específico (J/kg.K)	Absorção solar	Emissividade
Argamassa colante	5	1,15	2000	1000	0,60	0,94
Revestimento cerâmico	10	1,00	1700	920	0,30	0,94
Contrapiso	30	1,15	2000	1000	0,60	0,94

Fonte: Adaptado de ABNT (2005); Weber *et al.* (2017); Thermoworks (s.d.).

Quadro 4 – Parâmetros termofísicos dos materiais para o modelo de alvenaria.

(conclusão)

Material	Espessura (mm)	Condutividade térmica (W/m.k)	Densidade (Kg/m ³)	Calor específico (J/kg.K)	Absortividade solar	Emissividade
Argamassa colante	5	1,15	2000	1000	0,60	0,94
Revestimento cerâmico	10	1,00	1700	920	0,30	0,94
Contrapiso	30	1,15	2000	1000	0,60	0,94
Laje de concreto	100	1,75	2200	1000	0,50	0,95
Telha cerâmica	6	1,05	2000	920	0,65	0,90
Porta de madeira	30	0,15	650	1340	0,50	0,90
Reboco	2	1,15	1950	1000	0,30	0,90
Tijolo cerâmico	13,4	0,90	1600	920	0,70	0,90

Fonte: Adaptado de ABNT (2005); Weber *et al.* (2017); Thermoworks (s.d.).

Da mesma maneira executada no caso do modelo em *wood frame*, o isolante térmico em lã de vidro foi considerado como um material de baixa massa na simulação, sendo utilizado o valor da sua resistência térmica igual a 0,67 m².K/W, conforme determinado pela NBR 15575-1/2024. As propriedades referentes a transmitância e a capacidade térmica do modelo em alvenaria também foram mensuradas de acordo com as equações apresentadas na ABNT NBR 15220-2/2022, podendo ser visualizadas na Tabela 8.

Tabela 8 – Propriedades térmicas dos elementos construtivos do caso base em alvenaria.

	Parede 1	Parede 2	Parede 3	Cobertura ZB1 a 7	Cobertura ZB8
U (W/m²K)	2,53	2,45	2,36	2,00	0,86
C (kJ/(m²K))	116,59	141,98	167,37	270,04	271,09

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Igualmente ao modelo anterior, a configuração da parede 1, que delimita a envoltória dos APPs da UH, bem como os dois arranjos da cobertura, tiveram o atraso térmico de seus sistemas calculados conforme o indicado na ISO 13786/2017, correspondendo a 2,74, 5,70 e 10,36 horas, respectivamente.

Convém ainda indicar que, a fim de uniformizar a interferência da absorvidade e emissividade térmica nos resultados termoenergéticos, os materiais opacos e com

área superficial diretamente exposta ao ambiente tiveram seus valores fixados em 0,30 e 0,90, respectivamente, em consonância ao enunciado no item 3.3.1.

3.4 MÉTODO DE AVALIAÇÃO

Para o desenvolvimento desta pesquisa foi necessário definir as condições de contorno e operação de equipamentos e sistemas de iluminação. Além destes, o calor gerado pelas atividades humanas também foi considerado nas simulações computacionais.

Com isso, a partir da obtenção das variáveis de saída (temperaturas operativas máximas e mínimas, carga térmica de refrigeração e aquecimento, bem como, o percentual de horas ocupadas dentro da faixa de temperatura operativa), foi possível classificar o nível de eficiência energética de cada caso avaliado e comparar as performances termoenergéticas de cada um destes.

3.4.1 Simulação computacional

A norma NBR 15575-1 (ABNT, 2024), estabelece que o programa de simulação computacional deve ser capaz de estimar a variação da temperatura operacional, das cargas térmicas de refrigeração e aquecimento e o uso de ventilação natural na unidade habitacional (UH), definidos separadamente em 8.760 horas durante o ano, considerando as variações horárias de ocupação, potência de iluminação e equipamentos. Para cumprir esses requisitos, a versão 23.2.0 do *EnergyPlus™* foi selecionada para conduzir as simulações desta pesquisa.

O *EnergyPlus™* é um *software* de simulação energética de edificações que possibilita a modelagem do consumo de energia para aquecimento, resfriamento, ventilação e iluminação da edificação (DOE, 2018). Utilizando os princípios de equilíbrio térmico, este programa executa um processo integrado e simultâneo das condições das zonas térmicas, permitindo ao usuário detalhar a geometria da edificação, elementos de construção e componentes dos sistemas existentes, além de determinar os padrões de uso para cada zona térmica e sistema (WEBER *et al.*, 2017), conforme o realizado neste estudo.

3.4.1.1 Condições de operação e de contorno

A edificação foi modelada diretamente no *EnergyPlus*TM e para que o referido software executasse as simulações termoenergéticas foram usados arquivos climáticos disponíveis no repositório de dados do *climate.onebuilding.org*.

O calor produzido pelos equipamentos, pela presença de pessoas e pelo sistema de iluminação nos ambientes foi constante e seguiu os parâmetros estabelecidos pela NBR 15.575 (ABNT, 2024). Os valores utilizados para as cargas de equipamentos, iluminação e ocupação estão apresentados nas Tabelas 9, 10 e 11, respectivamente.

Para a simulação computacional da ventilação natural pelas aberturas, as definições propostas pela NBR 15575 (ABNT, 2024) consideram que as portas permanecem fechadas e a infiltração de ar ocorre por meio das frestas. A janela do banheiro tem ventilação constante e permanece sempre aberta. Para as janelas localizadas nos ambientes de permanência prolongada (APP), o critério de ventilação foi definido de acordo com variações no padrão de uso. Mesmo com portas e janelas fechadas, a infiltração de ar continuou ocorrendo através das frestas.

Tabela 9 – Período de uso e potência adotados para os equipamentos.

Ambiente	Período de uso	Potência (W)
Sala	14:00 – 21:59	120

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 15575 (2021).

Tabela 10 – Densidade de potência adotada para a iluminação.

Ambiente	DPI – Densidade de Potência Instalada (W/m ²)
Sala	5,0
Dormitórios	5,0

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 15575 (2021).

Tabela 11 - Calor produzido decorrente das atividades realizadas nos ambientes.

Ambiente	Período de uso	Atividade realizada	Calor produzido (W/m ²)	Calor produzido para área de pele = 1,80m ² (W)
Sala	14:00 – 21:59	Sentado ou assistindo TV	60	108
Dormitórios	00:00 – 07:59 e 22:00 – 23:59	Dormindo ou descansando	45	80

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 15575 (2021).

Nas condições de contorno, foi modelado o contato com o solo, uma vez que a edificação é térrea. O programa *EnergyPlus*TM permite a simulação do solo de diferentes maneiras, variando o nível de detalhamento e exigência computacional (ELI *et al.*, 2019). A forma mais simples utiliza temperaturas médias do solo extraídas dos arquivos climáticos. A forma mais detalhada emprega o pré-processador *Slab*, que requer simulações adicionais para a predição das temperaturas do solo utilizadas na simulação.

O *Ground Domain* é a terceira forma de modelagem do solo na simulação do *EnergyPlus*TM. Nesta abordagem, as temperaturas do solo são calculadas de forma iterativa por meio de três métodos diferentes: *Finite Difference*, *Kusuda-Achenbach* e *Xing*. Este trabalho utilizou o método *Finite Difference* do objeto *Ground Domain*, conforme descrito no manual de uso do objeto *Ground Domain* desenvolvido no La- bEEE/UFSC (ELI *et al.*, 2019).

3.4.1.2 Modelagem com e sem o uso da ventilação natural

As simulações dos modelos reais e do modelo de referência foram realizadas em duas condições diferentes de uso dos APPs: uma com ventilação natural (VN), para determinar o PHFT_{UH} e as temperaturas operativas anuais máximas (Tomáx_{UH}) e mínimas (Tomín_{UH}); e outra sem ventilação natural (AC), para calcular as cargas térmicas anuais de refrigeração (CgTR_{UH}) e aquecimento (CgTA_{UH}).

A abertura das janelas foi permitida do modelo VN somente quando o APP estivesse em uso e sob dois critérios de temperatura: a temperatura interna de bulbo seco igual ou superior a 19°C e a temperatura interna de bulbo seco maior que a temperatura externa. As portas internas mantêm-se abertas e as portas externas fechadas, com possibilidade de infiltração por frestas. Os modelos AC simulados mantiveram todas as portas e janelas fechadas durante todo o ano, e os mesmos coeficientes de infiltração utilizados no modelo VN.

3.5 CLASSIFICAÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DA ENVOLTÓRIA

A metodologia apresentada na Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (INI-R) usa os produtos da simulação computacional como indicadores. Para a etiquetagem proposta na INI-R foram empregados: o percentual de fração de horas ocupadas dentro dessas mesmas

faixas de temperaturas operativas (PHFT), as temperaturas operativas máxima e mínima entre uma faixa estabelecida pela norma (Tomáx e Tomín) e, carga térmica anual de refrigeração e de aquecimento (CgTR e CgTA), que somadas equivalem a CgTT da UH, conforme já mencionado no item 2.3 do capítulo anterior.

Estes indicadores utilizados como critérios para classificação energética da envoltória foram obtidos a partir das diretrizes da NBR 15575 - Parte 1/2024, sendo apresentados a seguir.

3.5.1 Diretrizes para obtenção dos indicadores de desempenho da envoltória – NBR 15575: Parte 1

Inicialmente, para a avaliação do primeiro indicador, precisou-se analisar as temperaturas operativas anuais máxima (Tomáx) e mínima (Tomín) da UH, as quais foram determinadas considerando os períodos de ocupação dos APP, sendo que para a Tomáx adotou-se o maior valor obtido, enquanto para a Tomín foi selecionado o menor valor. A Tomáx foi avaliada para todas as ZBs, enquanto a análise da Tomín se restringiu as ZB 1 a ZB 4.

Para atender ao critério da Tomáx a normativa de desempenho habitacional estabelece que o valor obtido para o modelo real deve ser menor ou igual ao obtido para o modelo de referência, após somado um valor de tolerância (Δ Tomáx) de 2 °C, conforme a Equação 1:

$$Tomáx_{UH,real} \leq Tomáx_{UH,ref} + \Delta Tomáx \quad (1)$$

Na qual:

$Tomáx_{UH,real}$ é a temperatura operativa anual máxima da UH no modelo real, expressa em graus Celsius (°C);

$Tomáx_{UH,ref}$ é a temperatura operativa anual máxima da UH no modelo de referência, expressa em graus Celsius (°C);

Δ Tomáx é o valor de tolerância da temperatura operativa anual máxima, expresso em graus Celsius (°C).

Já para o atendimento do critério da Tomín, o valor obtido para o modelo real deve ser superior ou igual ao obtido para o modelo de referência, após reduzido um valor de tolerância (Δ Tomín) de 1 °C, sendo aplicada a Equação 2:

$$Tomín_{UH,real} \geq Tomín_{UH,ref} - \Delta Tomín \quad (2)$$

Onde:

$\text{Tomín}_{\text{UH,real}}$ é a temperatura operativa anual mínima da UH no modelo real, expressa em graus Celsius ($^{\circ}\text{C}$);

$\text{Tomín}_{\text{UH,ref}}$ é a temperatura operativa anual mínima da UH no modelo de referência, expressa em graus Celsius ($^{\circ}\text{C}$);

$\Delta\text{Tomín}$ é o valor de tolerância da temperatura operativa anual mínima, expresso em graus Celsius ($^{\circ}\text{C}$).

Em sequência, para a obtenção do PHFT foi analisada individualmente cada APP da UH com o seu respectivo período de ocupação, seguindo as faixas de temperaturas operativas (ToAPP) em consonância aos intervalos de temperaturas externas de bulbo seco (TBSm) extraídas do arquivo climático utilizado. A tabela 12 apresenta as temperaturas operativas empregadas para determinação do PHFT.

Tabela 12 - Faixas de temperaturas operativas para a determinação do PHFTAPP.

Intervalos de temperaturas externas	Faixa de temperatura operativa a ser considerada
Intervalo 1	$18,0\text{ }^{\circ}\text{C} < \text{ToAPP} < 26,0\text{ }^{\circ}\text{C}$
Intervalo 2	$\text{ToAPP} < 28,0\text{ }^{\circ}\text{C}$
Intervalo 3	$\text{ToAPP} < 30,0\text{ }^{\circ}\text{C}$

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 15575 (2024)

Após isso, obteve-se o PHFT de cada APP através da Equação 3, a qual consta na NBR 15.575 (ABNT, 2024):

$$\text{PHFT}_{\text{APP}} = \text{NhFT} \cdot \text{Nhocup} \cdot 100 \quad (3)$$

Onde:

PHFTAPP é o percentual de horas de ocupação do APP dentro da faixa de temperatura operativa, expresso em porcentagem (%);

NhFT é o número de horas em que o APP se encontrou ocupado e com temperaturas operativas dentro da faixa de temperatura operativa, estabelecida na Tabela 11, ao longo do ano;

Nhocup é o número de horas em que o APP foi ocupado ao longo do ano - equivalente a 2.920 h para salas e 3.650 h para dormitórios.

Posteriormente, para obter-se o PHFT total da UH real e da referência, foram somados os PHFTAPP de cada uma delas e o valor total foi dividido pelo número total de APP de cada UH correspondente.

Com relação ao critério da carga térmica total da UH ($CgTT_{UH}$), este foi analisado considerando os períodos em que os APPs do modelo com uso de ventilação natural estiveram ocupados e com temperaturas operativas dentro dos limites determinados na Tabela 13.

Tabela 13 - Valores de temperatura operativa para o cálculo da $CgTR_{APP}$ e da $CgTA_{APP}$.

Intervalos de temperaturas externas	Faixa de temperatura operativa para o cálculo da $CgTR_{APP}$	Faixa de temperatura operativa para o cálculo da $CgTA_{APP}$
Intervalo 1	$To_{APP} \geq 26,0 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$To_{APP} \leq 18,0 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Intervalo 2	$To_{APP} \geq 28,0 \text{ }^{\circ}\text{C}$	Não considera
Intervalo 3	$To_{APP} \geq 30,0 \text{ }^{\circ}\text{C}$	Não considera

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 15575 (2024)

Como pode ser observado na tabela acima, a carga térmica de aquecimento ($CgTA_{UH}$) é calculada somente para as cidades compreendidas no intervalo 1 da NBR 15575 – Parte 1 (2024), enquanto a carga térmica de refrigeração ($CgTR_{UH}$) é mensurada para os 3 intervalos de temperaturas externas.

Para se obter a $CgTR$ total da UH real e da referência foi somado o consumo de carga térmica demandada para a refrigeração de cada APP da UH, já para se conhecer a $CgTA$ somou-se as cargas térmicas despendidas para o aquecimento de dos APPs.

Em sequência, para as cidades compreendidas no intervalo 1, a carga térmica total da UH ($CgTT_{UH}$) foi obtida através da adição da $CgTA_{UH}$ e da $CgTR_{UH}$ e, para aquelas contidas nos intervalos 2 e 3, a $CgTT_{UH}$ correspondeu a $CgTR_{UH}$.

3.5.2 Metodologia da INI-R para a classificação energética da envoltória

A avaliação das Tomáx e Tomín consistiu em verificar o atendimento das equações 1 e 2 do item 3.5.1. Nos casos em que os indicadores Tomáx e Tomín não atenderam aos parâmetros estabelecidos acima, a classificação da envoltória da UH avaliada foi E, caso contrário, pode-se enquadrá-la nas demais classes de etiquetagem (A a D), em conformidade ao estabelecido no item 8.2.1 da INI-R.

Com relação ao segundo critério analisado, a classificação quanto ao desempenho termoenergético baseou-se no incremento do $PHFT_{UH,real}$ em relação ao

$\text{PHFT}_{\text{UH,ref}}$ (ΔPHFT) e dividiu-se em dois grupos, classes A-B e C-D, sendo que quando não atendido ao percentual estabelecido para o grupo C-D, a classificação da envoltória da UH avaliada foi classe E. O percentual de incremento do $\text{PHFT}_{\text{UH,real}}$ em relação ao $\text{PHFT}_{\text{UH,ref}}$ foi conhecido seguindo o procedimento de cálculo da Equação 4.

$$\Delta\text{PHFT} = \text{PHFT}_{\text{UH,real}} - \text{PHFT}_{\text{UH,ref}} \quad (4)$$

Onde:

ΔPHFT : é o incremento do $\text{PHFT}_{\text{UH,real}}$ em relação ao $\text{PHFT}_{\text{UH,ref}}$ (%);

$\text{PHFT}_{\text{UH,real}}$: é o percentual de horas de ocupação da UH no modelo real dentro da faixa de temperatura operativa (%);

$\text{PHFT}_{\text{UH,ref}}$: é o percentual de horas de ocupação da UH no modelo de referência dentro da faixa de temperatura operativa (%).

Para o atendimento ao critério de PHFT_{UH} nas classes C e D, o modelo real precisou apresentar, ao longo de um ano e durante os períodos de ocupação dos APPs, $\text{PHFT}_{\text{UH,real}}$ superior a 90% em relação ao obtido para o modelo de referência ($\text{PHFT}_{\text{UH,ref}}$). Já para as classes A e B o atendimento ao critério de PHFT_{UH} foi realizado por meio de um incremento do $\text{PHFT}_{\text{UH,real}}$ em relação ao $\text{PHFT}_{\text{UH,ref}}$ (ΔPHFT), conforme apresentado na tabela 8.3 da INI-R (Figura 30).

Figura 30 – Critério de classificação de eficiência energética da envoltória quanto ao PHFT_{UH} .

Classe A	Classe B	Classe C	Classe D
$\Delta\text{PHFT} \geq \Delta\text{PHFT}_{\text{min}}$	$\Delta\text{PHFT} \geq \Delta\text{PHFT}_{\text{min}}$	$\text{PHFT}_{\text{UH,real}} > 0,9 \cdot \text{PHFT}_{\text{UH,ref}}$	$\text{PHFT}_{\text{UH,real}} > 0,9 \cdot \text{PHFT}_{\text{UH,ref}}$

Fonte: INMETRO (2022).

Convém informar que os valores do incremento mínimo do $\text{PHFT}_{\text{UH,real}}$ foram implementados de acordo com o percentual de $\text{PHFT}_{\text{UH,ref}}$ obtido pelo modelo de referência. Para um modelo de referência com $\text{PHFT}_{\text{UH,ref}}$ inferior a 70%, empregou-se os valores indicados na tabela 8.6 (classe B) e 8.7 (classe A) da INI-R. Nos casos em que o modelo de referência obteve $\text{PHFT}_{\text{UH,ref}}$ igual ou superior a 70%, o valor de redução da $\text{CgTT}_{\text{UH,real}}$ (RedCgTT) foi conhecido por meio do ábaco mostrado na figura 8.1 da respectiva Instrução Normativa do Inmetro.

Por fim, o critério para classificação quanto a $CgTT_{UH}$ considerou o disposto na tabela 8.4 da INI-R e apresentada na Figura 31.

Figura 31 – Critério de classificação de eficiência energética da envoltória quanto à $CgTT_{UH}$.

Classe A	Classe B	Classe C	Classe D
$RedCgTT \geq RedCgTT_{minA}$	$RedCgTT \geq RedCgTT_{minB}$	$RedCgTT \geq 0\%$	$RedCgTT \geq RedCgTT_{minD}$

Fonte: INMETRO (2022).

Enquanto o cálculo da $RedCgTT$ foi realizado conforme o apresentado na Equação 5.

$$RedCgTT = \left[\frac{(CgTT_{UH,ref} - CgTT_{UH,real})}{CgTT_{UH,ref}} \right] 100 \quad (5)$$

Na qual:

$RedCgTT$: é a redução da carga térmica total da UH no modelo real em relação ao modelo de referência (%);

$CgTT_{UH,real}$: é a carga térmica total da UH no modelo real (kWh/ano);

$CgTT_{UH,ref}$: é a carga térmica total da UH no modelo de referência (kWh/ano).

Para o atendimento deste critério, foi necessário determinar a razão entre a $CgTT_{UH,ref}$ e o somatório das áreas de piso de todos os APPs da UH (Ap,APP). A partir disso, consultando as tabelas 8.5 a 8.7, verificou-se o percentual de redução da carga térmica total mínimo a ser obtido para cada classe, de D a A, respectivamente. Nos cenários em que a $RedCgTT$ foi inferior a $RedCgTT_{minD}$ (percentual de redução da carga térmica total mínima para a classe D), a envoltória da UH foi classificada com a etiqueta E.

3.6 DETERMINAÇÃO DE DIFERENTES ARRANJOS DE PAREDES EM WOOD FRAME PARA ANÁLISE TERMOENERGÉTICA

A fim de verificar a influência de diferentes configurações de painéis em *wood frame* na eficiência energética da HIS estudada e, determinar qual arranjo apresenta o melhor desempenho termoenergético em cada ZB brasileira, foram realizadas novas simulações com diferentes envelopes de *wood frame* aplicados nas paredes da envoltória da referida UH. Esses modelos preservaram as características geométricas

da edificação real descritas anteriormente no item 3.3.2.1, e manteram as condições de contorno para as simulações computacionais.

Foram configurados sete novos arranjos para as paredes da envoltória, mantendo a mesma cobertura apresentada na Figura 27, a qual é tipicamente adotada em HIS unifamiliares implantadas no país, conforme previsto no DATec nº 20-E (BRASIL, 2023). Os primeiros quatro casos manteram o mesmo quadro estrutural mostrado no item 3.3.2.1, sendo associado no quarto caso uma camada isolante de lã de vidro com 50 mm de espessura.

Os dois casos seguintes tiveram a altura da seção de seus montantes de madeira alterada para 140 mm, ampliando, em consequência, a espessura da câmara de ar presente no quadro estrutural, também sendo associado no sexto arranjo uma camada isolante de lã de vidro, desta vez com 100 mm de espessura. O último caso é baseado na configuração empregada pela empresa espanhola *RockWool*, o qual conta com um sistema de isolamento em lã de rocha que pode ser empregado tanto entre os montantes da estrutura, quanto como revestimento externo.

Para o primeiro caso, foi adicionado na face interna do quadro estrutural um painel OSB de 9,5 mm espessura, conforme o mostrado na Figura 10 do item 2.1.2.2.2 do capítulo anterior, sendo mantidas as demais camadas da parede em conformidade ao apresentado no item 3.3.2.1 deste capítulo. O segundo caso foi baseado em um modelo que emprega tecnologia em EPS conhecida no Brasil como ITE (Isolamento Térmico pelo Exterior), sendo o respectivo modelo ilustrado na Figura 6 do item 2.1.2.3. O terceiro caso também deriva de um modelo apresentado na Figura 6, sendo o seu revestimento externo composto por uma segunda câmara de ar de 25 mm revestida com *sidings* de madeira. O quarto modelo seguiu as mesmas camadas de materiais que compõe o arranjo mostrado no item 3.3.2.1, sendo desta vez empregado um isolante térmico entre os montantes do quadro estrutural, conforme relatado acima. Convém mencionar que, diferente do exposto na Figura 6, o segundo e terceiro caso não associaram camada de isolamento térmico para o quadro estrutural, visando com isso avaliar composições mais diversificadas de arranjos em *wood frame*.

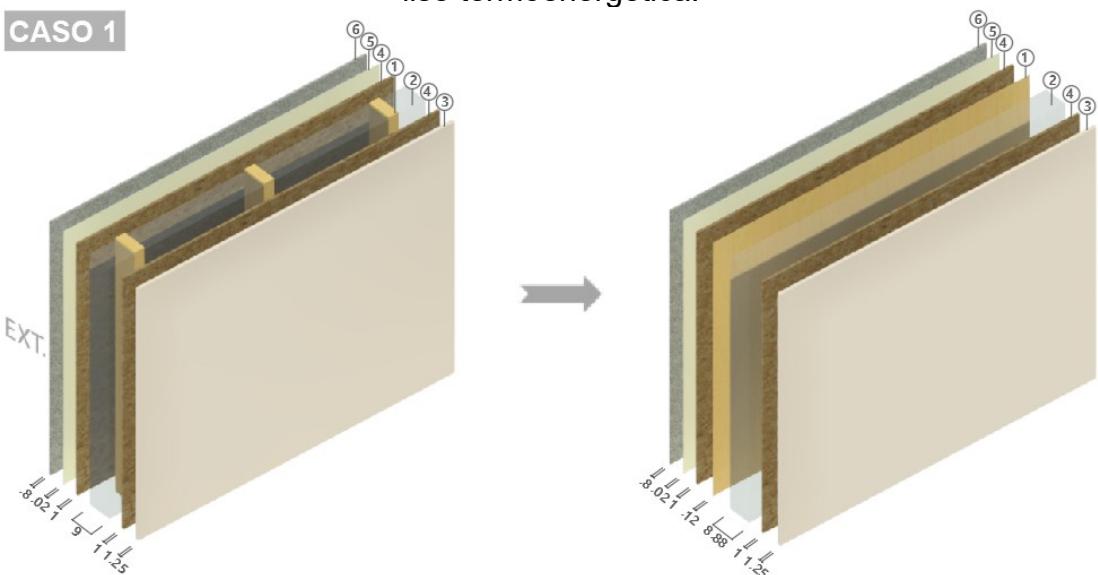
Os casos cinco e seis têm o seu quadro estrutural baseado na composição apresentado no capítulo anterior no estudo de Pasztory *et al.* (2012) e denominada como *American II*, sendo esta estrutura congruente a indicada no DATec nº 20-E para paredes de edificações geminadas. Tal quadro é formado por montantes de seção de 140 x 38 mm (altura x largura), no qual foi empregada dupla chapa de gesso acarto-

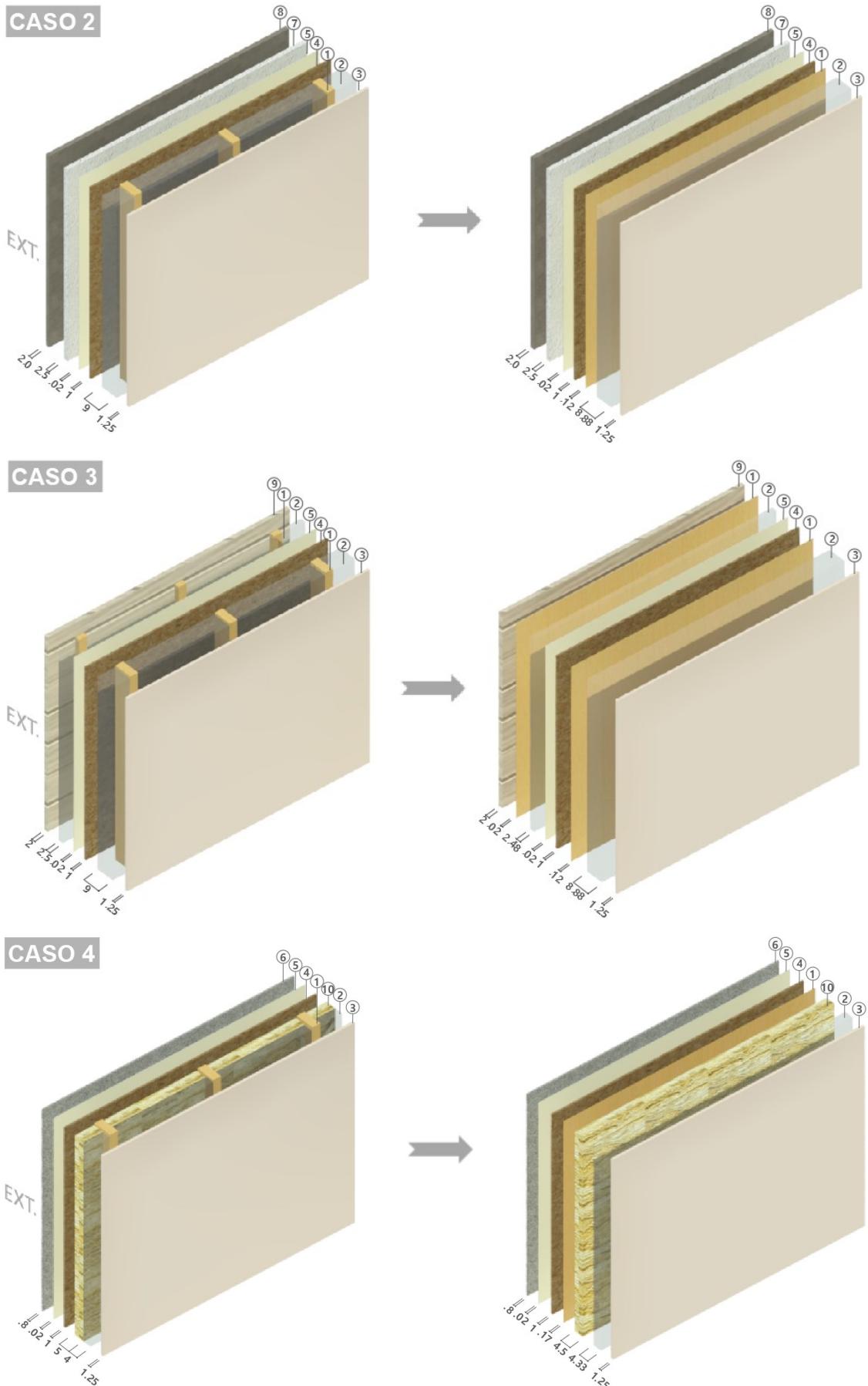
nado na face voltada para o interior da edificação. Para o caso seis, adotou-se também isolante térmico constituído por lã de vidro entre os montantes do quadro estrutural. O sétimo e último caso deriva do modelo apresentado pela *RockWool*, que faz uso de uma tecnologia de isolantes térmicos em lã de rocha empregados tanto entre os montantes da estrutura, quanto como revestimento externo.

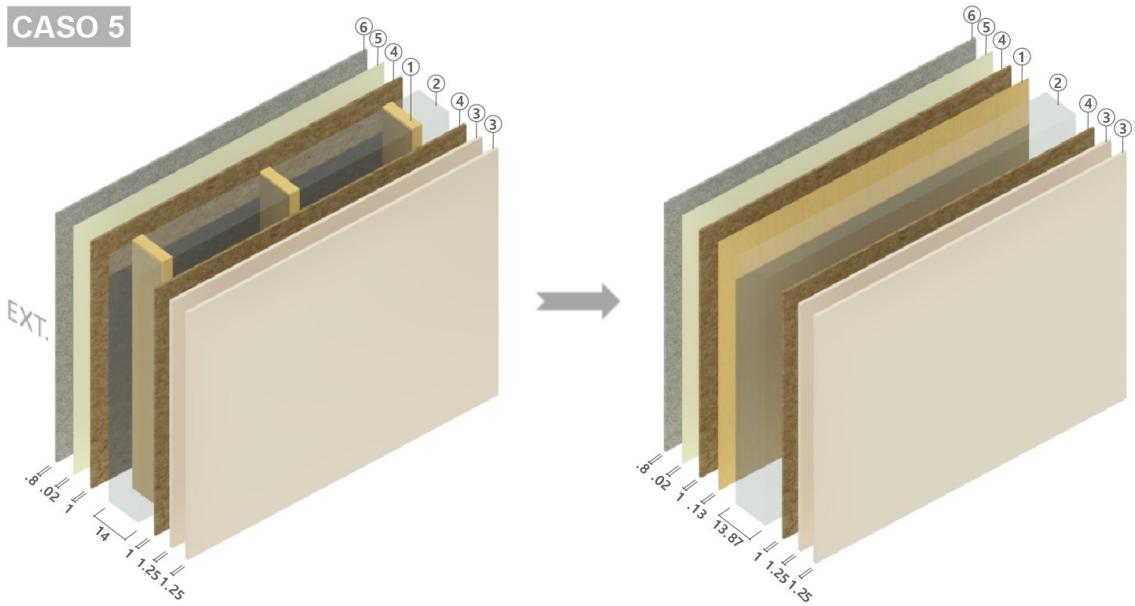
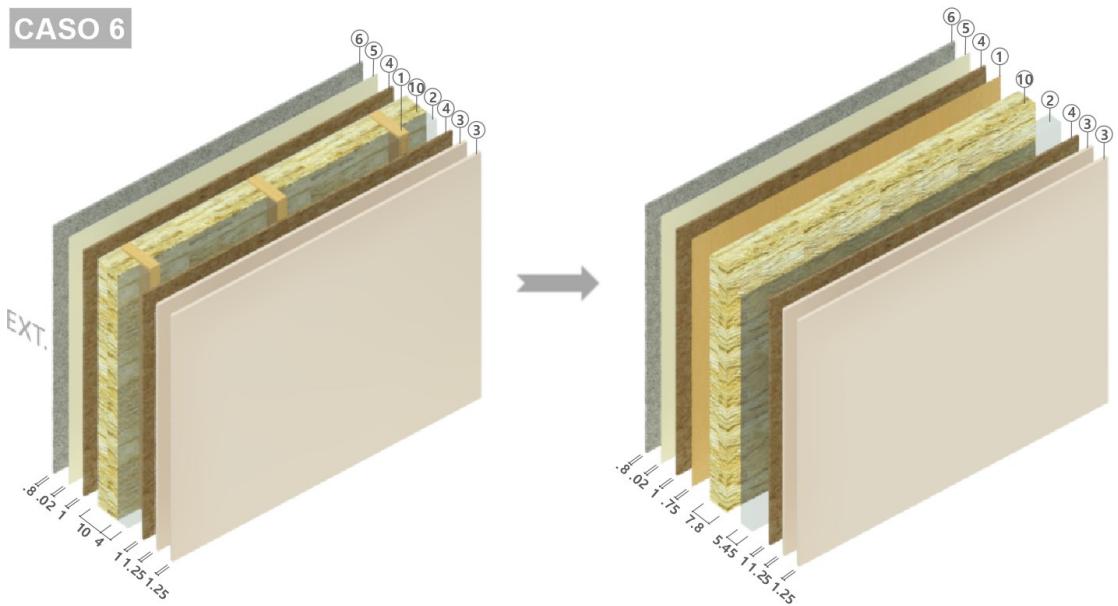
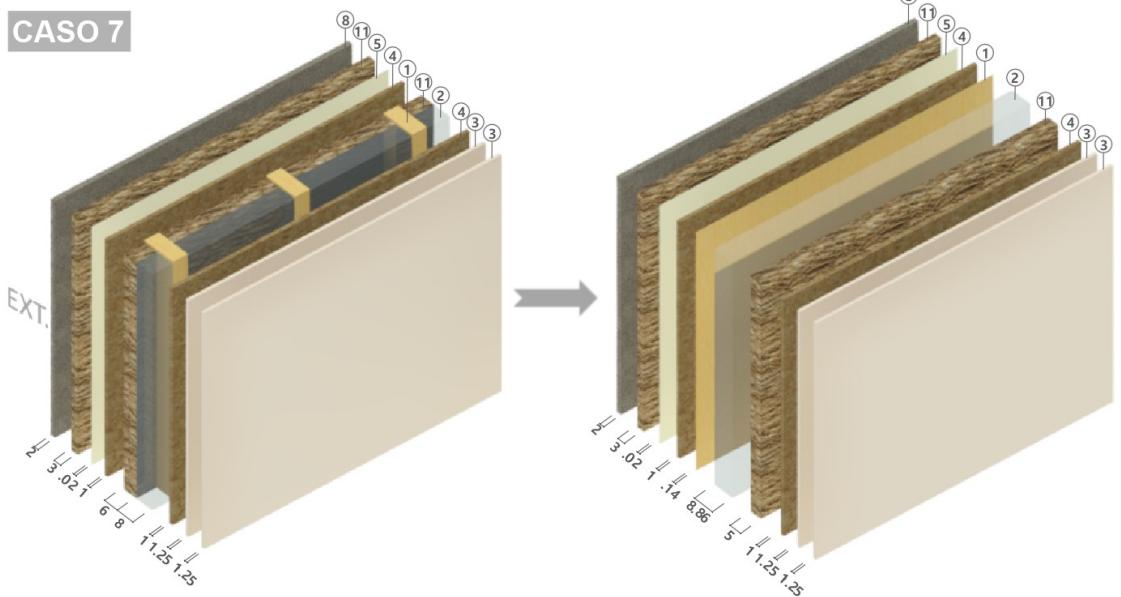
Igualmente ao relatado no item 3.3.2.1, em virtude da estrutura em *wood frame* ser constituída por diferentes elementos foi necessário adequar a sua camada heterogênea. Desta forma, utilizou-se a equivalência das espessuras dos montantes de madeira, das câmaras de ar e, em alguns casos, dos isolantes térmicos posicionados nas cavidades dos quadros estruturais, aplicando para isso a metodologia apresentada no estudo de Weber *et al.* (2017). As configurações originais e equivalentes dos arranjos em *wood frame*, bem como os valores dos parâmetros termofísicos inseridos nas simulações podem ser verificados na Figura 32 e no Quadro 5, respectivamente.

Os isolantes térmicos em lã de rocha e lã de vidro foram considerados como materiais de baixa massa na simulação, sendo desta forma utilizado o valor das resistências térmicas destes. Para o caso da lã de rocha, com condutividade térmica de 0,038 W/m.k, a camada isolante entre montantes com 6 cm de espessura obteve uma resistência térmica de 1,30 m².K/W, enquanto para o revestimento de 3 cm de espessura foi obtido um valor de 0,75 m².K/W para a referida variável. Quanto ao isolante em lã de vidro, com condutividade térmica equivalente a 0,045 W/m.k, para as espessuras de 50 e 100 mm se obteve resistências térmicas correspondentes a 1,0 e 1,73 m².K/W, respectivamente.

Figura 32 – Arranjos das paredes originais e equivalentes em *wood frame* para análise termoenergética.





CASO 5**CASO 6****CASO 7**

1. Montante de madeira
2. Câmara de ar
3. Placa de gesso acartonado standart/RU
4. Painel OSB
5. Membrana impermeável
6. Placa cimentícia
7. Placa de EPS
8. Reboco
9. Siding de madeira
10. Isolante de lã de vidro
11. Isolante de lã de rocha

OBS: medidas em centímetros

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Quadro 5 – Parâmetros termofísicos dos casos *wood frame*.

(continua)

Material	Espessura (mm)	Condutividade térmica (W/m.k)	Densidade (Kg/m ³)	Calor específico (J/kg.K)	Absorтивidade solar	Emissividade
Montante de madeira – caso 1 a 3 (C1,C2 e C3)	1,2	0,15	600	1340	0,70	0,90
Montante de madeira – caso 4 (C4)	1,7	0,15	600	1340	0,70	0,90
Montante de madeira – caso 5 (C5)	1,3	0,15	600	1340	0,70	0,90
Montante de madeira – caso 6 (C6)	7,5	0,15	600	1340	0,70	0,90
Montante de madeira – caso 7 (C7)	1,4	0,15	600	1340	0,70	0,90
Placa de gesso acartonado	12,5	0,35	750	840	0,30/0,50	0,90
Painel OSB	10	0,15	500	2300	0,50	0,87

Fonte: Adaptado de ABNT (2005); *Thermoworks* (s.d.).

Quadro 5 – Parâmetros termofísicos dos casos *wood frame*.

(conclusão)

Material	Espessura (mm)	Condutividade térmica (W/m.k)	Densidade (Kg/m ³)	Calor específico (J/kg.K)	Absorvidade solar	Emissividade
Membrana impermeável de polietileno	2	0,16	950	1850	0,70	0,88
Placa cimentícia	8	0,95	1520	840	0,30	0,90
Reboco	20	1,15	2000	1000	0,30	0,90
Siding de madeira	20	0,15	600	1340	0,30	0,90
Placa de EPS	25	0,040	25	1420	0,60	0,70

Fonte: Adaptado de ABNT (2005); *Thermoworks* (s.d.).

As propriedades térmicas dos novos casos aplicados a envoltória da UH foram obtidas através das equações indicadas na ABNT NBR 15220-2/2022 e na ISO 13786/2017. Na Tabela 14 é mostrada as características térmicas referentes a transmitância, capacidade e o atraso térmico de cada um dos novos envelopes avaliados.

Tabela 14 – Características térmicas dos casos *wood frame*.

Caso 1 (C1)	Caso 2 (C2)	Caso 3 (C3)	Caso 4 (C4)	Caso 5 (C5)	Caso 6 (C6)	Caso 7 (C7)
U (W/m ² K)	1,96	0,93	1,36	0,69	1,83	0,43
C (kJ/(m ² K))	41,26	60,00	36,36	32,31	49,21	56,93
Φ (horas)	2,13	2,87	2,71	3,49	2,52	6,59

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Cabe mencionar que para o piso da edificação, a fim de simular o mesmo tipo de contato com o solo para todas os casos (e de evitar o contato direto da estrutura de *wood frame* com a umidade do solo), optou-se por manter a laje de concreto associada ao revestimento cerâmico, conforme a configuração presente no modelo real do caso base apresentado no item 3.3.2.1.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir são apresentados os resultados obtidos na pesquisa, sendo os mesmos divididos por zonas bioclimáticas. Inicialmente são indicados e comparados os valores de cada parâmetro avaliativo dos casos bases e, na sequência, os dos demais painéis em *wood frame* aplicados na envoltória da HIS. Ao final do trabalho encontram-se anexas as tabelas, ábaco e equações utilizadas para obter os valores do ΔPHFTmín e das RedCgTTmín para a classificação das UH dos modelos reais.

4.1 CASOS BASE

4.1.1 Zona Bioclimática 1

As simulações termoenergéticas realizadas para a ZB 01, representada neste estudo pela cidade de Curitiba (intervalo 1), obtiveram resultados em que o nível de satisfação de um dos modelos reais variou em função do índice avaliado. Neste contexto, embora a UH em *wood frame* tenha apresentado o melhor desempenho quando verificado o critério das cargas térmicas, alguns de seus outros índices analisados não superaram os obtidos pelo modelo de referência e pelo modelo real de alvenaria, ocasionando a mais baixa classificação de acordo com a INI-R.

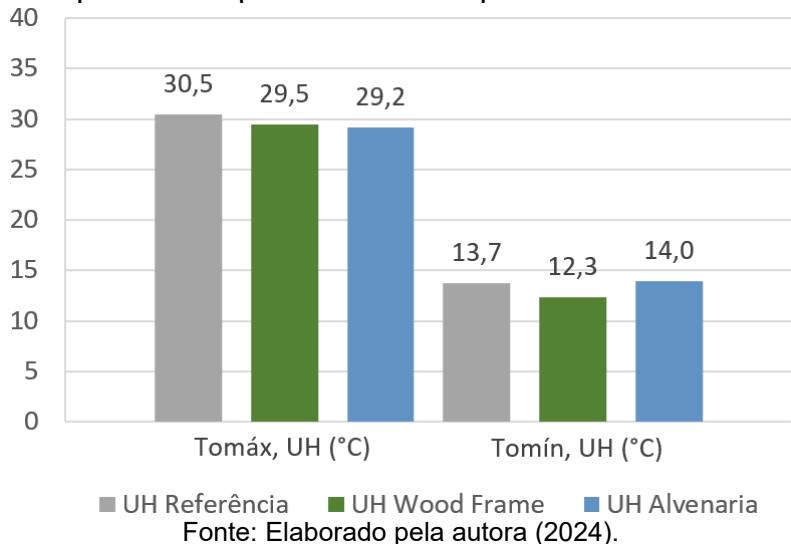
Conforme é possível observar na Figura 33, as Tomáx e Tomín obtidas no modelo real em *wood frame* apresentaram valores menores do que a referência. A Tomáx verificada no modelo real foi de 29,5 °C contra 30,5 °C no modelo da referência, e a Tomín foi de 12,3 °C e 13,7 °C, respectivamente. Desta forma, devido a Tomáx da UH em *wood frame* apresentar valor inferior quando comparada ao valor de Tomáx da UH de referência, confirma-se que a UH em *wood frame* pode ser classificada dentre os níveis A e D, conforme este parâmetro avaliativo.

Entretanto, como a Tomín apresentou variação superior a 1 °C em relação à referência, o critério para Tomín não foi atendido, impossibilitando a classificação da UH em *wood frame* dentre as etiquetas A a D. Ao realizar uma comparação com o modelo de alvenaria, percebeu-se que este obteve resultados superiores nestes parâmetros avaliativos, pois as Tomáx e Tomín verificadas para a UH de alvenaria foram de 29,2 °C e 14,0 °C, respectivamente.

Desta forma, tanto ao avaliar a Tomáx quanto Tomín, pode-se enquadrar a UH em alvenaria dentre as classes A e D da INI-R. O Quadro 6 demonstra os valores e a

designação para o atendimento aos critérios de desempenho térmico para esta avaliação.

Figura 33 – Temperaturas operativas anuais para as UH inseridas em Curitiba.



Quadro 6 – Critérios de avaliação da Tomáx e Tomín para as UH inseridas em Curitiba.

Classe da etiqueta	Critério de avaliação para Tomáx e Tomín (°C)	Wood frame		Alvenaria	
		Tomáx e Tomín UH (°C)	Atende ao critério avaliativo	Tomáx e Tomín UH (°C)	Atende ao critério avaliativo
Entre A e D	$\text{Tomáx}_{\text{UH,real}} \leq 32,5$	29,5	SIM	29,2	SIM
	$\text{Tomín}_{\text{UH,real}} \geq 12,7$	12,3	NÃO	14,0	SIM

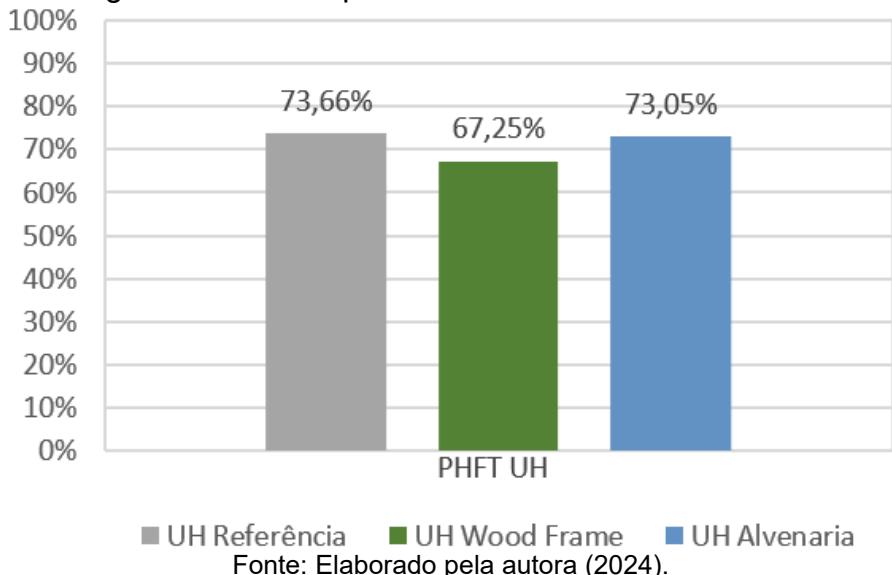
Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Na avaliação do critério do PHFT, a UH de *wood frame* alcançou nível C-D de desempenho termoenergético. Conforme apresentado na Figura 34, o valor do PHFT_{UH} do *wood frame* atingiu 67,25%, o que representou mais de 90% do PHFT obtido pela UH do modelo de referência, que correspondeu a 73,66%. Todavia, devido ao PHFT da UH em *wood frame* ser menor que o da UH de referência, não foi possível classificá-la com os níveis A-B.

Da mesma forma, em razão do PHFT_{UH} da alvenaria ser superior a 90% do PHFT obtido pela UH de referência, este modelo real também foi enquadrado com selo C-D, porém, em virtude de não ser maior que 73,66% - valor do PHFT da UH de referência -, este se manteve com classe C-D. O Quadro 7 detalha essa avaliação conforme os parâmetros exigidos para o referido caso.

Pode-se verificar, portanto, que nenhum dos modelos reais conseguiu alcançar a classificação máxima para este parâmetro de avaliação. Contudo, nota-se que a edificação em alvenaria apresenta valores mais elevados de PHFT_{UH} em relação ao modelo em *wood frame*, contando com 5,80% a mais de horas dentro de uma faixa de temperatura operativa de 18 °C a 26 °C determinada para o Intervalo 1.

Figura 34 – PHFT para as UH inseridas em Curitiba.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Quadro 7 – Critérios de avaliação do PHFT e ΔPHFT das UH inseridas em Curitiba.

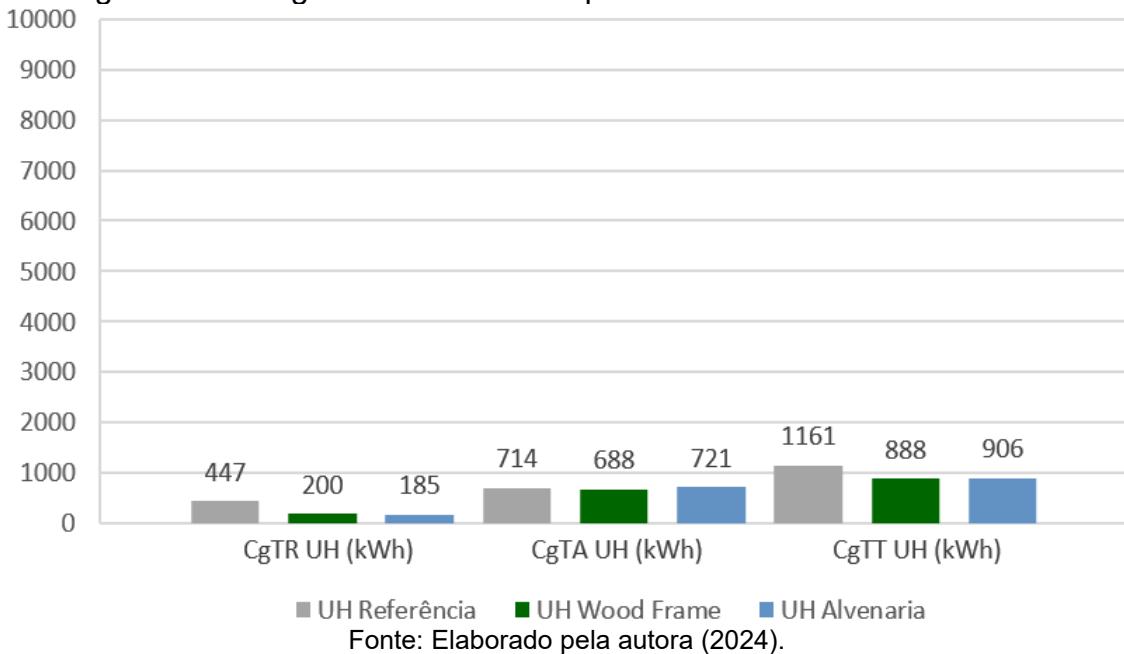
Classe da etiqueta	Critério de avaliação para PHFT e ΔPHFT	Wood frame		Alvenaria	
		PHFT e ΔPHFTmín (%)	Atende ao critério avaliativo	PHFT e ΔPHFTmín (%)	Atende ao critério avaliativo
Entre C e D	PHFT _{UH,real} > 66,30	67,25	SIM	73,05	SIM
Entre A e B	ΔPHFTmín (%) ≥ 0	- 6,41	NÃO	- 0,61	NÃO

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Referente ao critério das cargas térmicas, os modelos reais apresentaram resultados semelhantes de desempenho térmico, correspondendo a uma redução das cargas térmicas totais de 23,52% para o modelo em *wood frame* e 22,03% para o de alvenaria. Enquanto o modelo de referência consumiu uma CgTT_{UH} de 1.161 kWh/ano, a envoltória de *wood frame* consumiu 888 kWh/ano. Como a RedCgTT da UH de *wood frame* foi superior a 17% e inferior a 35% - valores mínimos indicados pela INI-R para receber etiquetagem classe A e B, respectivamente -, a envoltória de *wood frame* obteve classe B. Igualmente, a UH de alvenaria, com RedCgTT entre 17 e 35%, recebeu nível B de eficiência energética de acordo com o referido critério avaliativo.

A Figura 35 e Quadro 8 apresentam com mais detalhes o exposto.

Figura 35 – Cargas térmicas anuais para as UH inseridas em Curitiba.



Quadro 8 – Critérios de avaliação quanto a RedCgTT das UH inseridas em Curitiba.

Classe da etiqueta	Critério de redução mínima $CgTT_{UH,REAL}$ [%]	Wood frame		Alvenaria	
		RedCgTTmín UH (%)	Atende ao critério avaliativo	RedCgTTmín UH (%)	Atende ao critério avaliativo
D	$RedCgTT \geq -17$	23,52	SIM	22,03	SIM
C	$RedCgTT \geq 0$		SIM		SIM
B	$RedCgTT \geq 17$		SIM		SIM
A	$RedCgTT \geq 35$		NÃO		NÃO

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Realizando a compilação dos resultados, é possível verificar que nenhum dos modelos reais teve a sua envoltória classificada com nível A de eficiência energética. No caso da edificação em *wood frame*, mesmo tendo obtido resultados significativos quanto a RedCgTT, em virtude da sua Tomín não satisfazer os critérios para a etiquetagem dos níveis entre A a D, esta recebeu etiqueta E.

Já a UH em alvenaria atingiu nível C de eficiência energética, pois seu PHFT foi inferior em relação ao do modelo de referência, não possibilitando desta maneira melhores classificações. O Quadro 9 apresenta um resumo dos resultados obtidos para a etiquetagem das UH.

Quadro 9 – Classificação da etiqueta de eficiência energética das envoltórias das UH inseridas em Curitiba.

Classe da etiqueta	Critério	Atendimento	
		Wood frame	Alvenaria
Etiqueta D	Tomáx UH	SIM	SIM
	Tomín UH	NÃO	SIM
	PHFT	SIM	SIM
	RedCgTTmínD UH	SIM	SIM
Etiqueta C	PHFT	SIM	SIM
	RedCgTTmínC UH	SIM	SIM
Etiqueta B	ΔPHFTmín	NÃO	NÃO
	RedCgTTmínB UH	SIM	SIM
Etiqueta A	ΔPHFTmín	NÃO	NÃO
	RedCgTTmínA UH	SIM	SIM
Etiqueta da Envoltória da Edificação	Atende a classe D?	NÃO	SIM
	Atende a classe C?	NÃO	SIM
	Atende a classe B?	NÃO	NÃO
	Atende a classe A?	NÃO	NÃO
		E	C

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Desta forma, ao considerar a configuração dos modelos propostos como casos base, é possível afirmar que para a cidade de Curitiba a implantação do sistema construtivo em alvenaria convencional seria mais eficaz do que o em *wood frame*, em termos de eficiência energética.

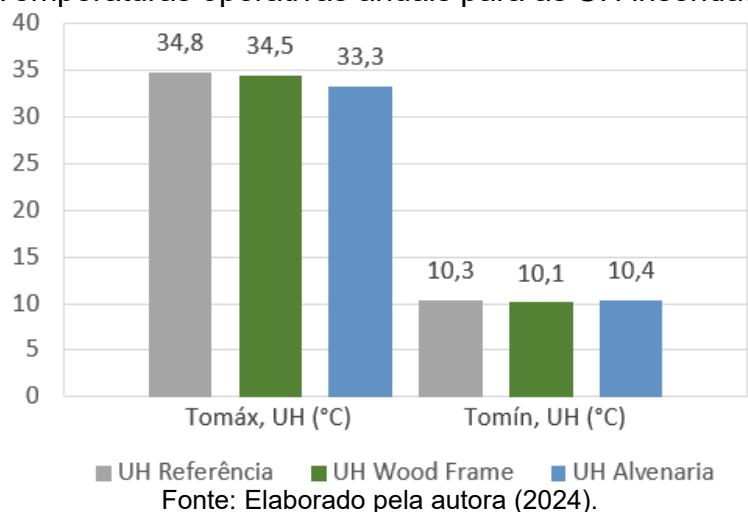
4.1.2 Zona Bioclimática 2

Para a ZB 2, representada nesta pesquisa pela cidade de Pelotas (Intervalo 1), os resultados das simulações termoenergéticas realizadas para a UH em *wood frame* apresentaram valores mais satisfatórios de desempenho termoenergético que os obtidos e apresentados anteriormente para a ZB1. Todavia, tais resultados não foram suficientes para atingir as classes A e B de eficiência energética.

Conforme é possível visualizar na Figura 36 e no Quadro 10, as Tomáx e Tomín obtidas no modelo real em *wood frame* apresentaram valores menores do que a referência. A Tomáx e a Tomín verificadas no modelo real foram de 34,5 °C e 10,1 °C, respectivamente, contra 34,8 °C e 10,3 °C do modelo de referência. Devido, portanto, a Tomáx da UH real em *wood frame* apresentar-se com diferença de 0,3 °C a menos do que a da UH de referência, e a Tomín com menos de 1°C de diferença em relação a respectiva, confirma-se que a UH em *wood frame* pode ser enquadrada dentre a etiquetagens A e D da INI-R.

Quando realizada a comparação com o modelo de alvenaria, em que as Tomáx e Tomín verificadas para a UH real foram, respectivamente, de 33,3 °C e 10,4 °C, observa-se que o referido modelo apresenta valores mais satisfatórios que o de referência e o de *wood frame*, pois este obteve o menor valor de Tomáx e o maior valor de Tomín dentre os casos analisados. Desta forma, constata-se que o modelo de alvenaria também pode ser classificado entre os níveis A e D de eficiência energética da INI-R.

Figura 36 – Temperaturas operativas anuais para as UH inseridas em Pelotas.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Quadro 10 – Critérios de avaliação da Tomáx e Tomín para as UH inseridas em Pelotas.

Classe da etiqueta	Critério de avaliação para Tomáx e Tomín (°C)	<i>Wood frame</i>		Alvenaria	
		Tomáx e Tomín UH (°C)	Atende ao critério avaliativo	Tomáx e Tomín UH (°C)	Atende ao critério avaliativo
Entre A e D	$\text{Tomáx}_{\text{UH,real}} \leq 36,8$	34,5	SIM	33,3	SIM
	$\text{Tomín}_{\text{UH,real}} \geq 9,3$	10,1	SIM	10,4	SIM

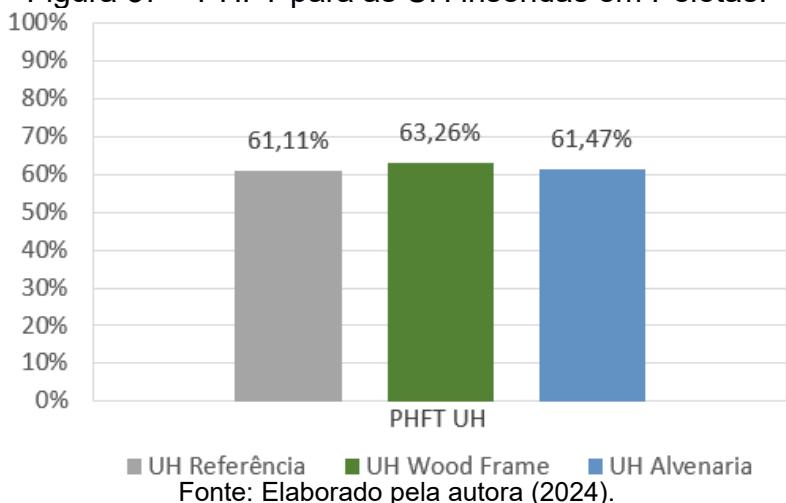
Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Na avaliação do critério do PHFT, a UH de *wood frame* obteve um valor ligeiramente superior em desempenho quando comparado a UH de referência e a de alvenaria, proporcionando assim, mais horas dentro da faixa de temperatura operativa de 18 °C a 26 °C, conforme determinado pelo Intervalo 1.

Como pode ser observado na Figura 37, o valor do PHFT_{UH} do *wood frame* atingiu 63,26%, o que representou um incremento de 2,16% em relação ao PHFT_{UH} do modelo de referência, que correspondeu a 61,11%. O modelo de alvenaria também obteve um pequeno incremento no PHFT quando comparado ao modelo de referência,

correspondendo a 0,36%. Estes valores de PHFT dos modelos reais foram suficientes para atender ao nível de etiquetagem C-D, no entanto, os mesmos não foram suficientes para atingir níveis mais altos na escala classificatória das etiquetas, visto que não superaram o valor de 9,56% de incremento no PHFT quando comparados ao modelo de referência, conforme a grandeza delimitada pela Instrução Normativa. No Quadro 11 está detalhada a avaliação conforme os critérios do PHFT.

Figura 37 – PHFT para as UH inseridas em Pelotas.



Quadro 11 – Critérios de avaliação do PHFT e ΔPHFT das UH inseridas em Pelotas.

Classe da etiqueta	Critério de avaliação para PHFT e ΔPHFT	Wood frame		Alvenaria	
		PHFT e $\Delta\text{PHFTmín}$ (%)	Atende ao critério avaliativo	PHFT e $\Delta\text{PHFTmín}$ (%)	Atende ao critério avaliativo
Entre C e D	$\text{PHFT}_{\text{UH,real}} > 55,00$	63,26	SIM	61,47	SIM
Entre A e B	$\Delta\text{PHFTmín} (\%) \geq 9,56$	2,16	NAO	0,36	NAO

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

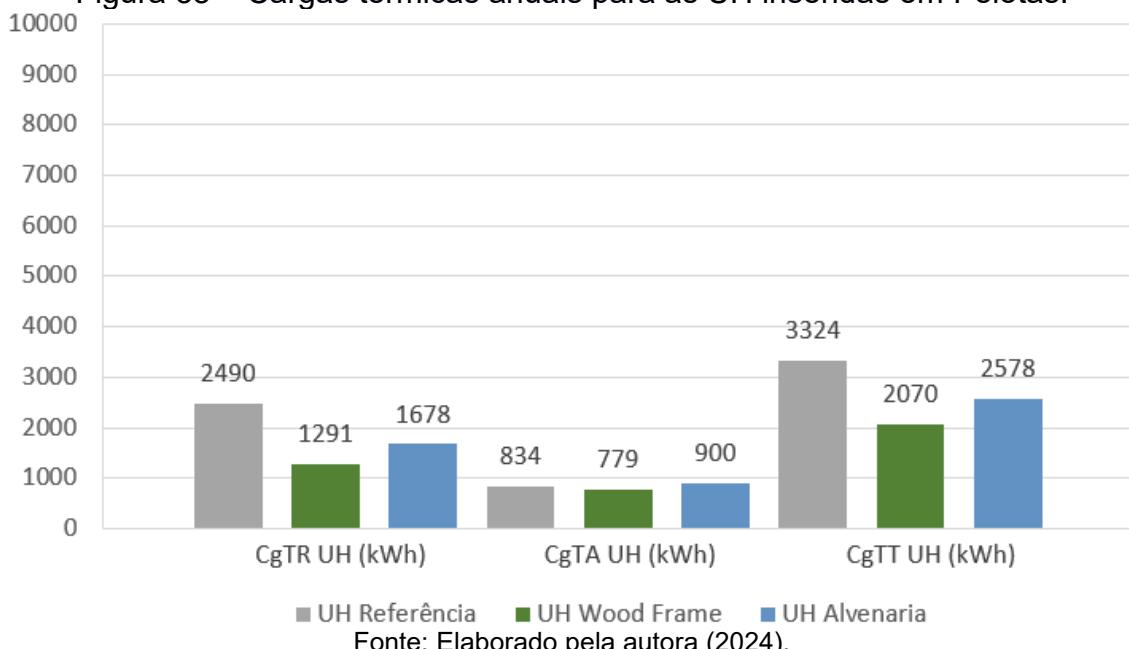
Quanto ao atendimento ao critério de avaliação das cargas térmicas, o modelo real em *wood frame* alcançou nível superior de desempenho térmico para a cidade de Pelotas, pois a redução da CgTT da UH real em comparação com a de referência foi de 37,72%, superando o valor de 35% de redução necessário para o atendimento da etiqueta A. Enquanto o modelo de referência consumiu uma CgTT_{UH} de 3.324 kWh/ano, a envoltória em *wood frame* consumiu 2.070 kWh/ano.

O modelo de alvenaria, porém, não foi capaz de atingir a etiqueta A para este critério, obtendo nível B de eficiência energética da envoltória. A CgTT_{UH} consumida

pela envoltória real de alvenaria foi de 2.578 kWh/ano, o que representou uma redução de 22,46 %, sendo insuficiente para obter o nível mais alto das etiquetas estabelecidas na INI-R.

Para melhor apresentar o exposto, a Figura 38 apresenta o gráfico comparativo para as cargas térmicas das três UH mencionadas (de referência, *wood frame* e alvenaria) e o Quadro 12, em sequência, apresenta os critérios de avaliação e atendimento as etiquetas das envoltórias quanto à RedCgTT_{UH} dos modelos reais.

Figura 38 – Cargas térmicas anuais para as UH inseridas em Pelotas.



Quadro 12 – Critérios de avaliação quanto a RedCgTT das UH inseridas em Pelotas.

Classe da etiqueta	Critério de redução mínima CgTT _{UH,REAL} [%]	Wood frame		Alvenaria	
		RedCgTTmín UH (%)	Atende ao critério avaliativo	RedCgTTmín UH (%)	Atende ao critério avaliativo
D	RedCgTT \geq -17	37,72	SIM	22,46	SIM
C	RedCgTT \geq 0		SIM		SIM
B	RedCgTT \geq 0		SIM		SIM
A	RedCgTT \geq 55		NÃO		NÃO

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Referente ao nível geral de eficiência termoenergética das envoltórias, foi possível verificar que, embora a UH em *wood frame* tenha obtido resultados mais satisfatórios que a de alvenaria em termos da redução da carga térmica total, ambos os modelos reais não conseguiram alcançar o percentual necessário de incremento de horas dentro de uma faixa de temperatura operativa para o Intervalo 1. Assim, tanto a

UH de *wood frame* quanto a de alvenaria receberam a etiqueta nível C de eficiência energética. No Quadro 13 é possível analisar com maior precisão a classificação dos critérios e a etiqueta de eficiência energética alcançada pelas UH avaliadas.

Quadro 13 – Classificação da etiqueta de eficiência energética das envoltórias das UH inseridas em Pelotas.

Classe da etiqueta	Critério	Atendimento	
		<i>Wood frame</i>	Alvenaria
Etiqueta D	Tomáx UH	SIM	SIM
	Tomín UH	SIM	SIM
	PHFT	SIM	SIM
	RedCgTTmín _D UH	SIM	SIM
Etiqueta C	PHFT	SIM	SIM
	RedCgTTmín _C UH	SIM	SIM
Etiqueta B	ΔPHFTmín	NÃO	NÃO
	RedCgTTmín _B UH	SIM	SIM
Etiqueta A	ΔPHFTmín	NÃO	NÃO
	RedCgTTmín _A UH	NÃO	NÃO
Etiqueta da Envoltória da Edificação	Atende a classe D?	SIM	SIM
	Atende a classe C?	SIM	SIM
	Atende a classe B?	NÃO	NÃO
	Atende a classe A?	NÃO	NÃO
		C	C

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Conclui-se, portanto, que para a cidade de Pelotas, o emprego dos sistemas construtivos em alvenaria e em *wood frame* tiveram resultados similares no que tange a eficiência termoenergética dos mesmos.

Contudo, apesar de obterem um PHFT com valores muito próximos, a UH de *wood frame* apresentou uma redução no consumo total da carga térmica de aproximadamente 20% a menos ao ser comparada ao modelo de alvenaria, revelando uma significativa vantagem neste quesito.

4.1.3 Zona Bioclimática 3

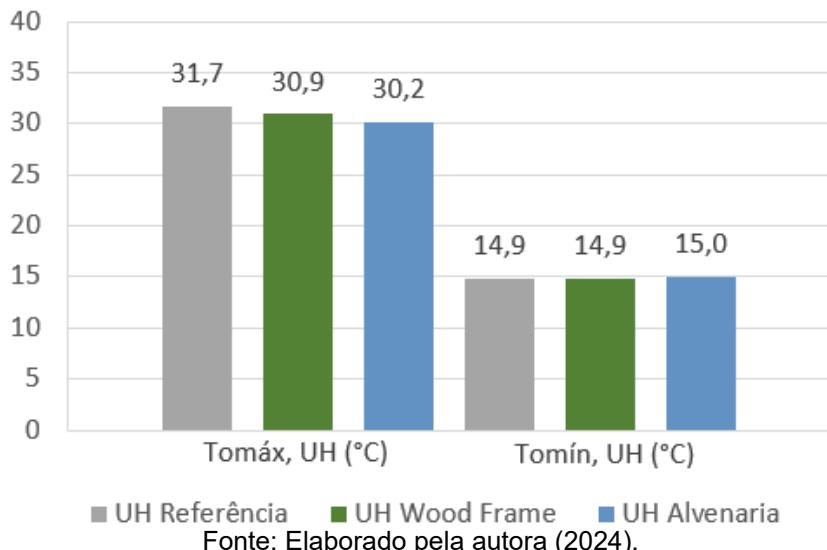
Nas simulações termoenergéticas realizadas para a ZB3, as quais foram baseadas no clima da cidade de São Paulo (Intervalo 1), os resultados obtidos para a envoltória dos modelos reais foram bastante satisfatórios, visto que tanto a envoltória da UH em *wood frame* quanto a de alvenaria receberam a etiqueta nível A de eficiência energética da envoltória.

No tocante as temperaturas operativas anuais, as Tomáx e Tomín obtidas para o modelo real em *wood frame* apresentaram valores menores e equivalentes ao de

referência, respectivamente. A Tomáx verificada no modelo real foi de 30,9 °C contra 31,7 °C no modelo da referência, já as Tomín corresponderam a 14,9 °C para ambos os modelos.

Com isso, devido a Tomáx do modelo real apresentar valor inferior quando comparada a Tomáx da UH de referência e, obter 1 °C a mais em relação a ΔTomín, conclui-se que a UH com estrutura em madeira serrada pode ser classificada com nível acima do E de eficiência termoenergética para esse critério avaliativo. A Figura 39 apresenta os valores de Tomáx e Tomín mencionados e o Quadro 14 demonstra a designação para o atendimento aos critérios de desempenho desta avaliação.

Figura 39 – Temperaturas operativas anuais para as UH inseridas na cidade de São Paulo.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Ao realizar a comparação com o modelo de alvenaria, percebe-se que os resultados foram ainda melhores que o caso anterior, pois as Tomáx e Tomín verificadas para a UH de alvenaria foram de 30,2 °C e 15,0 °C, respectivamente. Desta forma, o modelo real de alvenaria também atende ao parâmetro das temperaturas operativas, podendo ser qualificado com etiqueta acima do nível E de eficiência termoenergética.

Quadro 14 – Critérios de avaliação da Tomáx e Tomín para as UH inseridas na cidade de São Paulo.

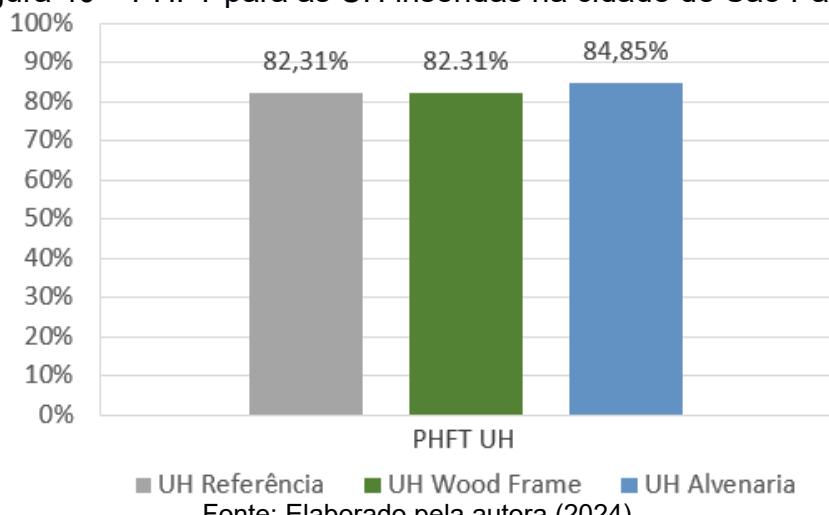
Classe da etiqueta	Critério de avaliação para Tomáx e Tomín (°C)	Wood frame		Alvenaria	
		Tomáx e Tomín UH (°C)	Atende ao critério avaliativo	Tomáx e Tomín UH (°C)	Atende ao critério avaliativo
Entre A e D	Tomáx _{UH,real} ≤ 33,7	30,9	SIM	30,2	SIM
	Tomín _{UH,real} ≥ 13,9	14,9	SIM	15,0	SIM

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Quanto ao critério do PHFT, ambos os modelos reais alcançaram classificação dentre os níveis A-B de eficiência energética. De maneira consoante ao ilustrado na Figura 40, o valor do PHFT_{UH} do *wood frame* correspondeu a 82,31%, mesmo valor obtido pela UH do modelo de referência, que em virtude de não apresentar um PHFT superior ao modelo real em *wood frame*, possibilitou que este fosse enquadrado na categoria das etiquetas A-B.

O modelo de alvenaria, por sua vez, atingiu um nível de PHFT ligeiramente superior em relação as UH de referência e de *wood frame*. O referido modelo real alcançou um valor de 84,85% de horas dentro da faixa de temperatura operativa de 18 °C a 26 °C, com um incremento na ordem de 2,54% em relação aos outros dois casos citados acima, o que também permitiu a sua classificação nos níveis A-B. O quadro 15 apresenta a classificação dos modelos reais citados acima, bem como os parâmetros exigidos para este critério avaliativo.

Figura 40 – PHFT para as UH inseridas na cidade de São Paulo.



Quadro 15 – Critérios de avaliação do PHFT e ΔPHFT das UH inseridas na cidade de São Paulo.

Classe da etiqueta	Critério de avaliação para PHFT e ΔPHFT	<i>Wood frame</i>		Alvenaria	
		PHFT e $\Delta\text{PHFT}_{\text{mín}} (%)$	Atende ao critério avaliativo	PHFT e $\Delta\text{PHFT}_{\text{mín}} (%)$	Atende ao critério avaliativo
Entre C e D	$\text{PHFT}_{\text{UH,real}} > 74,08$	82,31	SIM	84,85	SIM
Entre A e B	$\Delta\text{PHFT}_{\text{mín}} (%) \geq 0$	0	SIM	2,54	SIM

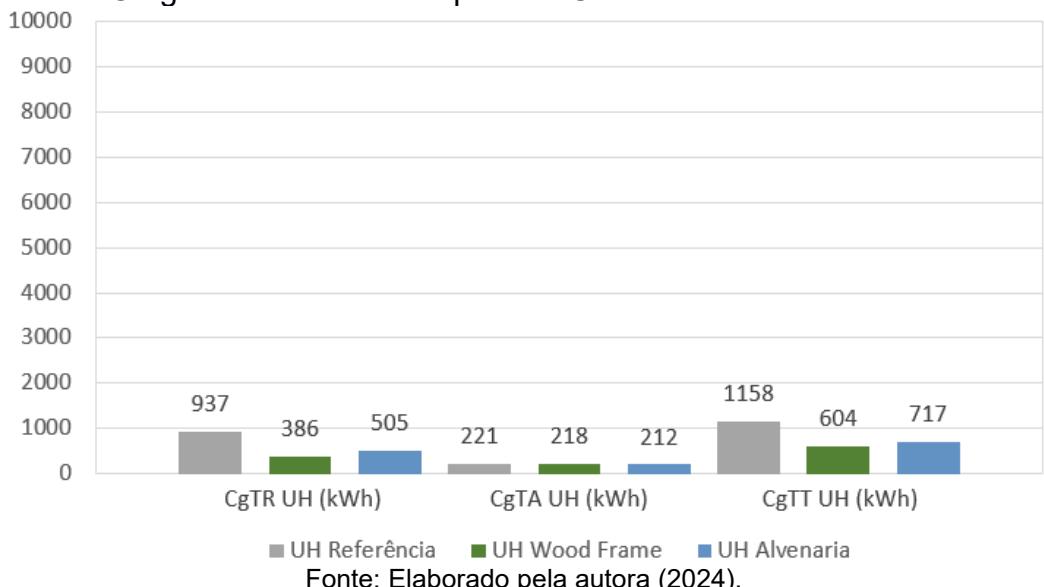
Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Referente ao critério das cargas térmicas, o modelo real em *wood frame* apresentou novamente resultados que o classificaram com a etiqueta nível A de eficiência

energética, tendo alcançado uma redução equivalente a 47,86% das cargas térmicas totais. Neste contexto, enquanto o modelo de referência consumiu uma $CgTT_{UH}$ de 1.158 kWh/ano, a envoltória em *wood frame* consumiu apenas 604 kWh/ano. Como a RedCgTT da UH de *wood frame*, neste caso, foi superior ao valor de 35% especificado como exigência mínima pela INI-R, a envoltória em *wood frame* obteve o nível mais alto na escala das etiquetas.

Com relação ao modelo real de alvenaria, apesar deste ter obtido uma redução das cargas térmicas totais inferior a porcentagem alcançada pela UH de *wood frame*, o respectivo modelo, que consumiu uma $CgTT_{UH}$ de 717 kWh/ano e obteve uma redução de carga térmica igual a 38,03%, também atingiu o nível A de eficiência energética. A Figura 41 e o Quadro 16 exemplificam com mais detalhes o exposto.

Figura 41 – Cargas térmicas anuais para as UH inseridas na cidade de São Paulo.



Quadro 16 – Critérios de avaliação quanto a RedCgTT das UH inseridas na cidade de São Paulo.

Classe da etiqueta	Critério de redução mínima $CgTT_{UH,REAL}$ [%]	<i>Wood frame</i>		Alvenaria	
		RedCgTTmín UH (%)	Atende ao critério avaliativo	RedCgTTmín UH (%)	Atende ao critério avaliativo
D	$RedCgTT \geq -17$	47,86	SIM	38,03	SIM
C	$RedCgTT \geq 0$		SIM		SIM
B	$RedCgTT \geq 17$		SIM		SIM
A	$RedCgTT \geq 35$		SIM		SIM

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Realizando a compilação dos resultados para o atendimento a todos os critérios avaliativos de desempenho energético das UH, é possível verificar que tanto o modelo em *wood frame* quanto o modelo em alvenaria se enquadram na etiqueta classe A de eficiência energética. O Quadro 17 apresenta o exposto.

Quadro 17 – Classificação da etiqueta de eficiência energética das envoltórias das UH inseridas na cidade de São Paulo.

Classe da etiqueta	Critério	Atendimento	
		<i>Wood frame</i>	Alvenaria
Etiqueta D	Tomáx UH	SIM	SIM
	Tomín UH	SIM	SIM
	PHFT	SIM	SIM
	RedCgTTmín _D UH	SIM	SIM
Etiqueta C	PHFT	SIM	SIM
	RedCgTTmín _C UH	SIM	SIM
Etiqueta B	ΔPHFTmín	SIM	SIM
	RedCgTTmín _B UH	SIM	SIM
Etiqueta A	ΔPHFTmín	SIM	SIM
	RedCgTTmín _A UH	SIM	SIM
Etiqueta da Envoltória da Edificação	Atende a classe D?	SIM	SIM
	Atende a classe C?	SIM	SIM
	Atende a classe B?	SIM	SIM
	Atende a classe A?	SIM	SIM
		A	A

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Logo, para a cidade de São Paulo (ZB3), tanto o modelo de *wood frame* quanto o de alvenaria convencional obtiveram excelentes resultados no que tange a eficiência energética. No caso da UH de alvenaria, esta apresentou um PHFT com valor levemente superior aos modelos de referência e de *wood frame*, os quais obtiveram um percentual de 82,31 contra 84,85 da alvenaria.

Em contrapartida, a UH de *wood frame* alcançou novamente diferenças relevantes quanto a redução da carga térmica total, que representou um consumo de 15,76% a menos quando comparada a alvenaria e de 47,86% se equiparada ao modelo de referência. Desta forma, é possível admitir que, mesmo sendo qualificadas com etiquetas equivalentes de eficiência energética, o sistema construtivo em *wood frame* se sobressai ao de alvenaria na ZB3 em virtude de seus expressivos resultados quanto a RedCgTT.

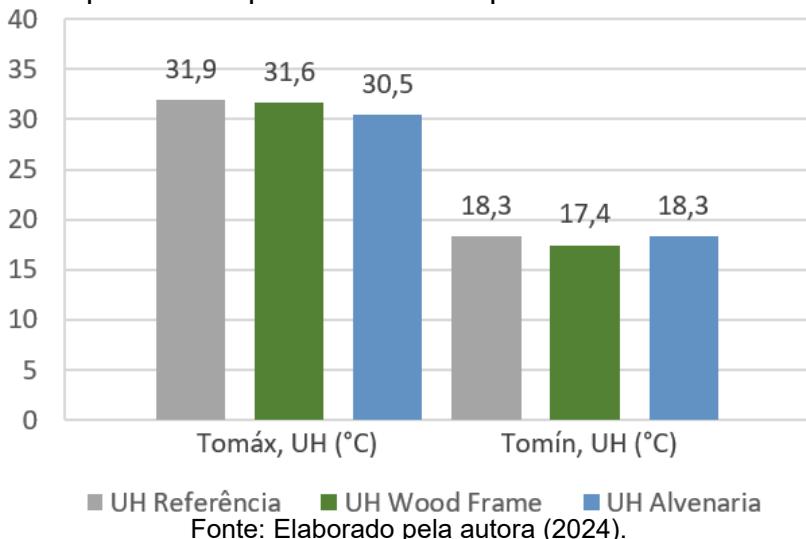
4.1.4 Zona Bioclimática 4

Os resultados das simulações termoenergéticas executadas para a ZB4, representada nesta pesquisa pela cidade de Brasília (Intervalo 1), mostraram-se satisfatórios tanto para o nível de eficiência energética do modelo em *wood frame*, quanto para o modelo de alvenaria convencional, sendo que ambos os modelos dos casos reais obteram etiqueta nível A de eficiência energética.

De maneira congruente ao apresentado na Figura 42 e no Quadro 18, as Tomáx e Tomín alcançadas para o modelo real em *wood frame* revelaram-se com valores menores que os alcançados pela UH de referência. A Tomáx e a Tomín verificadas no modelo real foram equivalentes a 31,6 °C e 17,4 °C, respectivamente, contra 31,9 °C e 18,3 °C do modelo de referência.

Desta forma, em virtude da Tomáx do modelo em *wood frame* apresentar-se com diferença de 0,3 °C a menos do que a da UH de referência, e a Tomín com menos de 1 °C de diferença em relação a respectiva, comprova-se que o modelo em *wood frame* pode ser classificado com etiqueta superior ao nível E.

Figura 42 – Temperaturas operativas anuais para as UH inseridas em Brasília.



Da mesma forma, no modelo de alvenaria as Tomáx e Tomín verificadas correspondem a 30,5 °C e 18,3 °C, respectivamente, sendo também inferiores em relação aos valores apresentados pela UH de referência. Para o Tomáx deste modelo real foi observada uma diferença de 1,4 °C em relação ao Tomáx obtido pela UH de referência, enquanto para a Tomín não houve diferença. Com base nestes valores, concluiu-se

que o modelo de alvenaria também pode ser classificado dentre os níveis A e D de eficiência energética da INI-R.

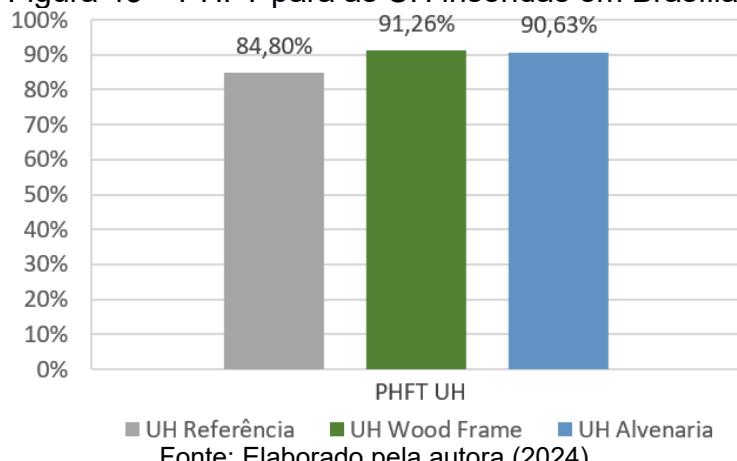
Quadro 18 – Critérios de avaliação da Tomáx e Tomín para as UH inseridas em Brasília.

Classe da etiqueta	Critério de avaliação para Tomáx e Tomín (°C)	Wood frame		Alvenaria	
		Tomáx e Tomín UH (°C)	Atende ao critério avaliativo	Tomáx e Tomín UH (°C)	Atende ao critério avaliativo
Entre A e D	$\text{Tomáx}_{\text{UH,real}} \leq 33,9$	31,6	SIM	30,5	SIM
	$\text{Tomín}_{\text{UH,real}} \geq 17,3$	17,4	SIM	18,3	SIM

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Com relação ao critério do PHFT, a UH de *wood frame* obteve um valor ligeiramente superior em desempenho quando comparado a UH de referência e a de alvenaria. Conforme ilustrado na Figura 43, o valor do PHFT_{UH} do *wood frame* atingiu 91,26%, o que representou um incremento de 6,46% em relação ao PHFT_{UH} do modelo de referência, que correspondeu a 84,80%. No Quadro 19 é apresentada a avaliação conforme os critérios do PHFT.

Figura 43 – PHFT para as UH inseridas em Brasília.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Quadro 19 – Critérios de avaliação do PHFT e ΔPHFT das UH inseridas em Brasília.

Classe da etiqueta	Critério de avaliação para PHFT e ΔPHFT	Wood frame		Alvenaria	
		PHFT e $\Delta\text{PHFTmín}$ (%)	Atende ao critério avaliativo	PHFT e $\Delta\text{PHFTmín}$ (%)	Atende ao critério avaliativo
Entre C e D	$\text{PHFT}_{\text{UH,real}} > 76,32$	91,26	SIM	90,63	SIM
Entre A e B	$\Delta\text{PHFTmín} (\%) \geq 0$	6,46	SIM	5,83	SIM

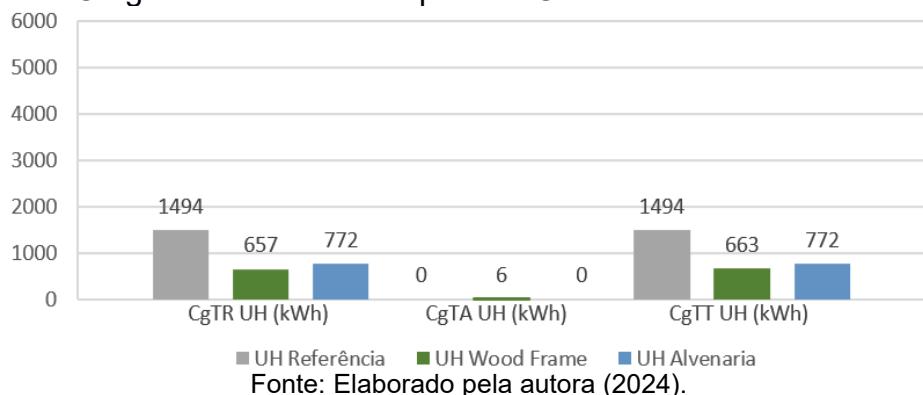
Fonte: Elaborado pela autora (2024).

O modelo de alvenaria obteve um incremento em seu PHFT similar ao do primeiro caso, sendo o referido equivalente a 5,83% quando comparado ao modelo de referência. Assim, os valores de PHFT dos modelos reais foram suficientes para atender ao nível de etiquetagem C-D e A-B.

No tocante ao critério das cargas térmicas, a UH de *wood frame* apresentou resultados que a classificaram com nível A de eficiência energética, atingindo uma RedCgTT de 55,64% quando comparada ao modelo de referência. Assim, a CgTT anual consumida pela UH de *wood frame* não alcançou nem a metade do valor da CgTT anual consumida pelo modelo de referência, correspondendo a 663 kWh/ano e 1494 kWh/ano, respectivamente. Logo, em razão da RedCgTT do modelo em *wood frame* ser superior ao valor de 35% especificado como exigência mínima para o atendimento da classe A da INI-R, a envoltória da UH em *wood frame* obteve o nível mais alto na escala.

Quanto ao modelo real de alvenaria, este consumiu uma CgTT_{UH} de 772 kWh/ano e obteve uma redução de carga térmica equivalente a 48,35%, garantindo também o nível A de eficiência energética. A Figura 44 e o Quadro 20 exemplificam com mais detalhes o relatado.

Figura 44 – Cargas térmicas anuais para as UH inseridas na cidade de Brasília.



Quadro 20 – Critérios de avaliação quanto a RedCgTT das UH inseridas na cidade de Brasília.

Classe da etiqueta	Critério de redução mínima CgTT _{UH,REAL} [%]	Wood frame		Alvenaria	
		RedCgTTmín UH (%)	Atende ao critério avaliativo	RedCgTTmín UH (%)	Atende ao critério avaliativo
D	RedCgTT \geq -17	55,64	SIM	48,35	SIM
C	RedCgTT \geq 0		SIM		SIM
B	RedCgTT \geq 17		SIM		SIM
A	RedCgTT \geq 35		SIM		SIM

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Com base nos resultados dos parâmetros avaliativos aplicados e expostos acima, verifica-se que os níveis gerais de eficiência energética das envoltórias dos modelos reais simulados para a cidade de Brasília atendem a etiqueta nível A de desempenho energético. O Quadro 21 discrimina a classificação obtida para cada um destes critérios e o nível geral da eficiência energética obtida para as UH.

Quadro 21 – Classificação da etiqueta de eficiência energética das envoltórias das UH inseridas em Brasília.

Classe da etiqueta	Critério	Atendimento	
		Wood frame	Alvenaria
Etiqueta D	Tomáx UH	SIM	SIM
	Tomín UH	SIM	SIM
	PHFT	SIM	SIM
	RedCgTTmín _D UH	SIM	SIM
Etiqueta C	PHFT	SIM	SIM
	RedCgTTmín _C UH	SIM	SIM
Etiqueta B	ΔPHFTmín	SIM	SIM
	RedCgTTmín _B UH	SIM	SIM
Etiqueta A	ΔPHFTmín	SIM	SIM
	RedCgTTmín _A UH	SIM	SIM
Etiqueta da Envoltória da Edificação	Atende a classe D?	SIM	SIM
	Atende a classe C?	SIM	SIM
	Atende a classe B?	SIM	SIM
	Atende a classe A?	SIM	SIM
		A	A

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Desta forma, observa-se que para ambos os casos dos modelos reais avaliados foi obtida a etiqueta máxima de eficiência energética. Entretanto, é importante destacar que, apesar da equidade dos níveis, a análise dos resultados dos parâmetros PHFT e RedCgTT revela que a UH simulada com o sistema *wood frame* apresenta um potencial de uso superior ao da UH de alvenaria. Especificamente, o modelo com estrutura de madeira serrada foi capaz de proporcionar mais horas dentro da faixa de temperatura operativa, além de contribuir para uma redução mais significativa no consumo total de carga térmica, oferecendo assim, maiores vantagens em termos de eficiência energética frente ao modelo de alvenaria convencional.

4.1.5 Zona Bioclimática 5

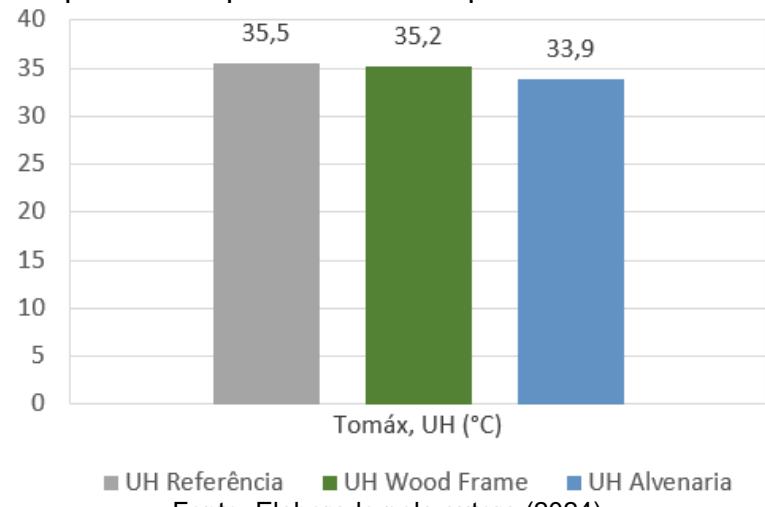
Nas simulações termoenergéticas realizadas para a ZB5, representada nesta pesquisa pela cidade de Joinville (Intervalo 1), os resultados gerais de desempenho energético apresentaram-se mais satisfatórios para a UH de *wood frame* em relação

aos obtidos para os modelos de referência e de alvenaria. Entretanto, tais resultados não foram suficientes para atingir a classe A em nível de eficiência energética.

Por se tratar da ZB 5, de acordo com a NBR 15.575 (ABNT, 2024), a avaliação do critério das temperaturas operativas analisa apenas a variação da Tomáx. Sendo assim, conforme é possível visualizar na Figura 45, a Tomáx obtida no interior da UH de *wood frame*, que foi equivalente a 35,2 °C, apresenta valor ligeiramente inferior à Tomáx do modelo de referência, com Tomáx correspondente a 35,5 °C. Já o modelo de alvenaria, com Tomáx igual a 33,9 °C, possui uma variação de mais de 1,6 °C em relação a referência.

Desta forma, por obterem valores inferiores de Tomáx quando comparadas ao modelo de referência, tanto a UH de *wood frame* quanto a UH de alvenaria, mostram-se aptas a serem classificadas com etiqueta superior ao nível E de eficiência energética, conforme indicado no Quadro 22.

Figura 45 – Temperaturas operativas anuais para as UH inseridas em Joinville.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

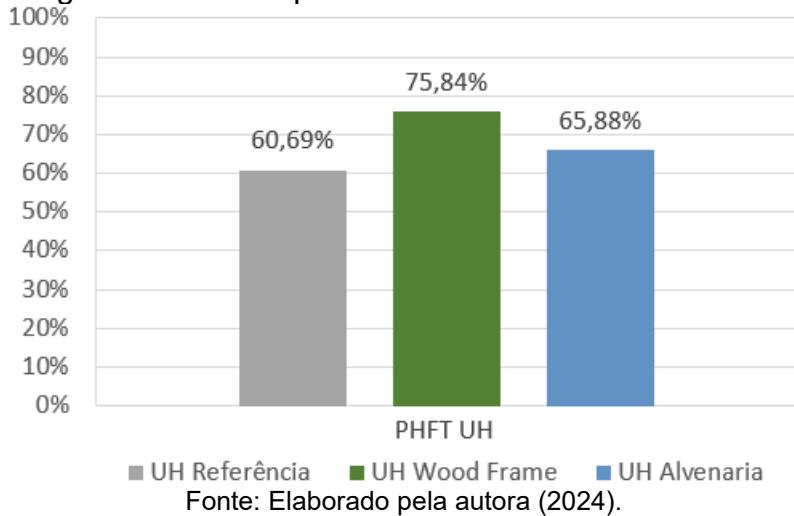
Quadro 22 – Critérios de avaliação da Tomáx para as UH inseridas em Joinville.

Classe da etiqueta	Critério de avaliação para Tomáx e Tomín (°C)	<i>Wood frame</i>		Alvenaria	
		Tomáx da UH (°C)	Atende ao critério avaliativo	Tomáx da UH (°C)	Atende ao critério avaliativo
Entre A e D	$\text{Tomáx}_{\text{UH,real}} \leq 37,5$	35,2	SIM	33,9	SIM

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Quanto ao critério do PHFT, o modelo em *wood frame* obteve um valor substancialmente superior ao do modelo de referência e de alvenaria. Consoante ao apresentado na Figura 46, o valor do PHFT_{UH} do *wood frame* atingiu 75,84%, representando um incremento de 15,15% em relação ao PHFT_{UH} do modelo de referência, que correspondeu a 60,69%.

Figura 46 – PHFT para as UH inseridas em Joinville.



Enquanto o modelo de alvenaria, com PHFT de 65,88%, alcançou um incremento de 5,19% ao ser comparado com a UH de referência. Diante do exposto, o valor do PHFT da UH de *wood frame* foi suficiente para atender ao nível de etiquetagem C-D e A-B, diferente do ocorrido no caso do PHFT da UH de alvenaria, que alcançou apenas o nível C-D neste parâmetro avaliativo. No Quadro 23 é apresentada a avaliação conforme os critérios do PHFT.

Quadro 23 – Critérios de avaliação do PHFT e ΔPHFT das UH inseridas em Joinville.

Classe da etiqueta	Critério de avaliação para PHFT e ΔPHFT	<i>Wood frame</i>		Alvenaria	
		PHFT e $\Delta\text{PHFT}_{\text{mín}} (%)$	Atende ao critério avaliativo	PHFT e $\Delta\text{PHFT}_{\text{mín}} (%)$	Atende ao critério avaliativo
Entre C e D	$\text{PHFT}_{\text{UH,real}} > 54,62$	75,84	SIM	65,88	SIM
Entre A e B	$\Delta\text{PHFT}_{\text{mín}} (%) \geq 9,80$	15,15	SIM	5,19	NAO

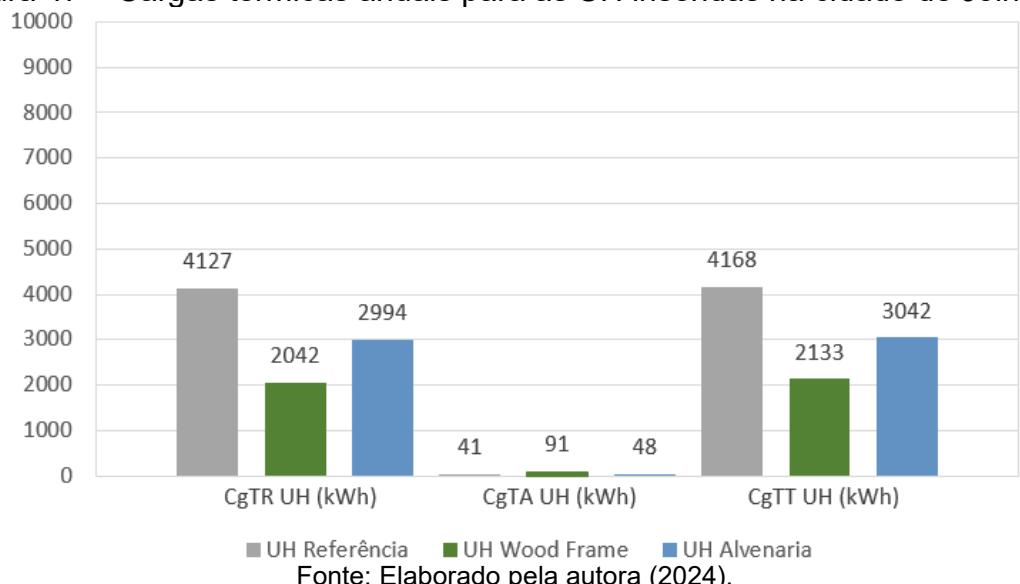
Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Para o critério das cargas térmicas, ambos os modelos reais alcançaram nível B de desempenho energético quando comparados ao modelo de referência. Enquanto a envoltória da referência consumiu uma CgTT_{UH} de 4.168 kWh/ano, a de *wood frame* consumiu apenas 2.133 kWh/ano e a de alvenaria, 3042 kWh/ano. De acordo com

estes valores, calculou-se que as RedCgTT foram de 48,82% para o *wood frame* e 27,01% para a alvenaria, sendo apresentado na Figura 47 o gráfico do consumo das CgTT_{UH}.

Em sequência, o Quadro 24 apresenta os critérios de avaliação e de atendimento às classes das etiquetas de eficiência energética das envoltórias quanto à RedCgTT_{UH} para a cidade de Joinville. Neste caso, devido à relação entre o consumo da CgTT_{UH} da referência e a área dos APP ser maior do que 100, a redução mínima das CgTT_{UH} para obter o nível A deve ser igual ou maior à 55%, conforme a Tabela 8.7 da INI-R.

Figura 47 – Cargas térmicas anuais para as UH inseridas na cidade de Joinville.



Quadro 24 – Critérios de avaliação quanto a RedCgTT das UH inseridas na cidade de Joinville.

Classe da etiqueta	Critério de redução mínima CgTT _{UH,REAL} [%]	Wood frame		Alvenaria	
		RedCgTTmín UH (%)	Atende ao critério avaliativo	RedCgTTmín UH (%)	Atende ao critério avaliativo
D	RedCgTT \geq -17	48,82	SIM	27,01	SIM
C	RedCgTT \geq 0		SIM		SIM
B	RedCgTT \geq 0		SIM		SIM
A	RedCgTT \geq 55		NÃO		NÃO

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Ao compilar os resultados de todos os parâmetros avaliativos, é possível verificar que quando comparadas a edificação de referência, a UH com sistema construtivo em *wood frame* atende ao nível B de desempenho termoenergético, enquanto a

UH de alvenaria convencional atende apenas o nível C. No Quadro 25 pode-se analisar com maior precisão a classificação dos critérios e do nível de desempenho energético geral das UH.

Quadro 25 – Classificação da etiqueta de eficiência energética das envoltórias das UH inseridas em Joinville.

Classe da etiqueta	Critério	Atendimento	
		Wood frame	Alvenaria
Etiqueta D	Tomáx UH	SIM	SIM
	PHFT	SIM	SIM
	RedCgTTmín _D UH	SIM	SIM
Etiqueta C	PHFT	SIM	SIM
	RedCgTTmín _C UH	SIM	SIM
Etiqueta B	ΔPHFTmín	SIM	NÃO
	RedCgTTmín _B UH	SIM	SIM
Etiqueta A	ΔPHFTmín	SIM	NÃO
	RedCgTTmín _A UH	NÃO	NÃO
Etiqueta da Envoltória da Edificação	Atende a classe D?	SIM	SIM
	Atende a classe C?	SIM	SIM
	Atende a classe B?	SIM	NÃO
	Atende a classe A?	NÃO	NÃO
		B	C

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Conclui-se, portanto, que mesmo não alcançando a classe mais alta de etiquetagem, a UH de *wood frame* quando comparada a de alvenaria proporcionou quase 10% a mais de horas dentro da faixa de temperatura operativa estabelecida pelo Intervalo 1. Além disso, a redução do consumo total de carga térmica para o modelo em estrutura de madeira serrada foi de 21,81% frente ao modelo de alvenaria. Desta forma, evidencia-se que a adoção dos painéis de *wood frame* na envoltória da UH é capaz de oferecer uma notável vantagem em termos de eficiência energética em relação ao uso da alvenaria convencional.

4.1.6 Zona Bioclimática 6

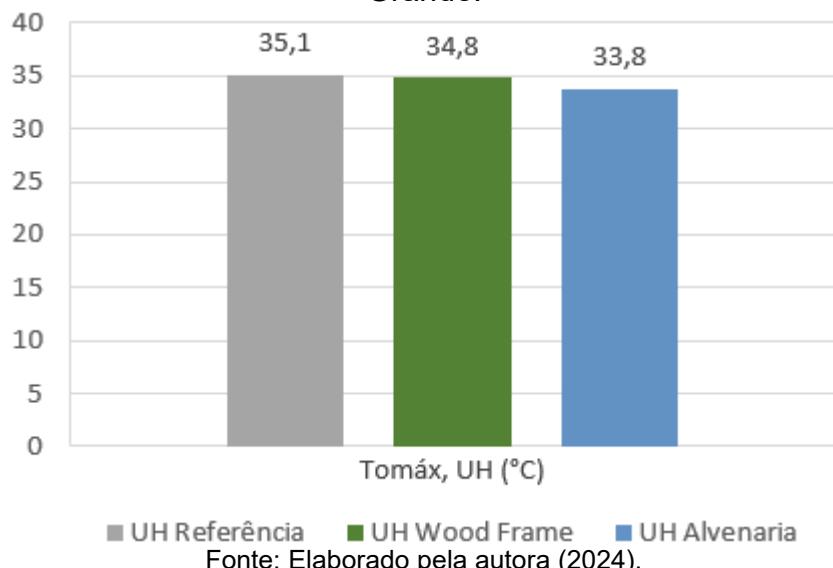
Para a ZB6, caracterizada nas simulações por meio do arquivo climático da cidade de Campo Grande (Intervalo 1), o modelo em *wood frame* novamente apresentou resultados mais satisfatórios de eficiência energética frente as UH de alvenaria convencional e de referência.

Igualmente ao mencionado no item anterior, por se tratar da ZB6, a avaliação do critério das temperaturas operativas foi analisada somente para a variação da Tomáx. Deste modo, de forma congruente ao apresentado na Figura 48 e no Quadro 26,

a Tomáx obtida para o modelo real em *wood frame* revelou-se inferior a Tomáx atingida pela UH de referência. A Tomáx verificada no modelo real foi igual a 34,8 °C contra 35,1 °C do modelo de referência. Desta forma, em virtude da Tomáx do modelo em *wood frame* apresentar-se com diferença de 0,3 °C a menos que a referência, comprova-se que o modelo em *wood frame* pode ser classificado com nível superior ao E de eficiência energética.

Quanto ao modelo de alvenaria, que apresenta Tomáx de 33,8 °C e 1,3 °C a menos do que a referência, este se enquadrou no mesmo caso do modelo em *wood frame*, ou seja, a UH de alvenaria também se mostrou apta a receber o nível de eficiência energética superior ao do último nível da escala definida pela INI-R.

Figura 48 – Temperaturas operativas anuais para as UH inseridas em Campo Grande.



Quadro 26 – Critérios de avaliação da Tomáx para as UH inseridas em Campo Grande.

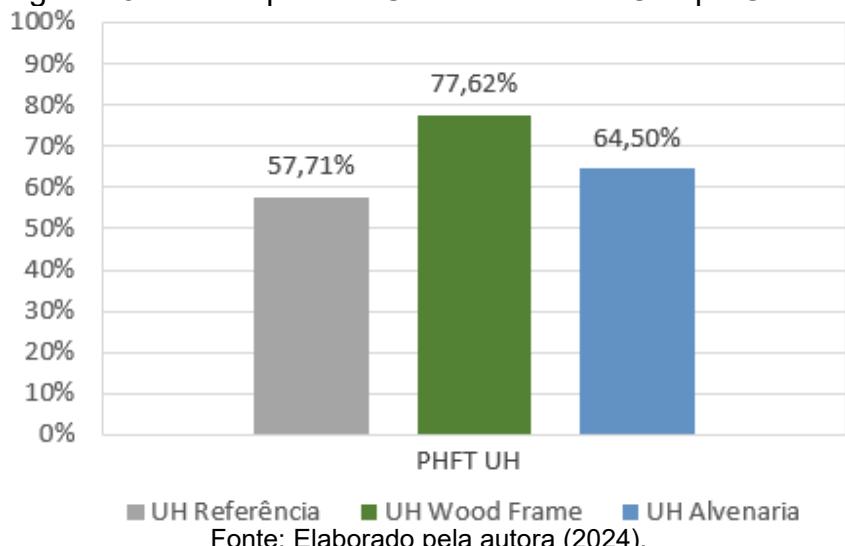
Classe da etiqueta	Critério de avaliação para Tomáx e Tomín (°C)	<i>Wood frame</i>		Alvenaria	
		Tomáx da UH (°C)	Atende ao critério avaliativo	Tomáx da UH (°C)	Atende ao critério avaliativo
Entre A e D	$\text{Tomáx}_{\text{UH,real}} \leq 37,1$	34,8	SIM	33,8	SIM

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Na avaliação do critério do PHFT, a UH de *wood frame* obteve um valor significativamente superior em desempenho quando comparado a UH de referência e a de alvenaria, proporcionando assim, mais horas dentro da faixa de temperatura operativa de 18 °C a 26 °C, conforme determinado pelo Intervalo 1.

Como pode ser observado na Figura 49, o valor do PHFT do *wood frame* atingiu 77,62%, o que representou um incremento de quase 20% em relação ao PHFT do modelo de referência, que correspondeu a 57,71%. O modelo de alvenaria também obteve um pequeno incremento no PHFT quando comparado ao modelo de referência, equivalendo a 4,79%. Estes valores de PHFT dos modelos reais foram suficientes para atender ao nível de eficiência C-D, contudo, somente o PHFT obtido pela UH de *wood frame* foi suficiente para atingir a níveis mais altos na escala classificatória das etiquetas, uma vez que, ao superar o valor de 11,53% de incremento no PHFT em relação ao modelo de referência, a UH em madeira serrada conseguiu atender ao nível de eficiência A-B. No Quadro 27 é exposta a avaliação conforme os critérios do PHFT.

Figura 49 – PHFT para as UH inseridas em Campo Grande.



Quadro 27 – Critérios de avaliação do PHFT e ΔPHFT das UH inseridas em Campo Grande.

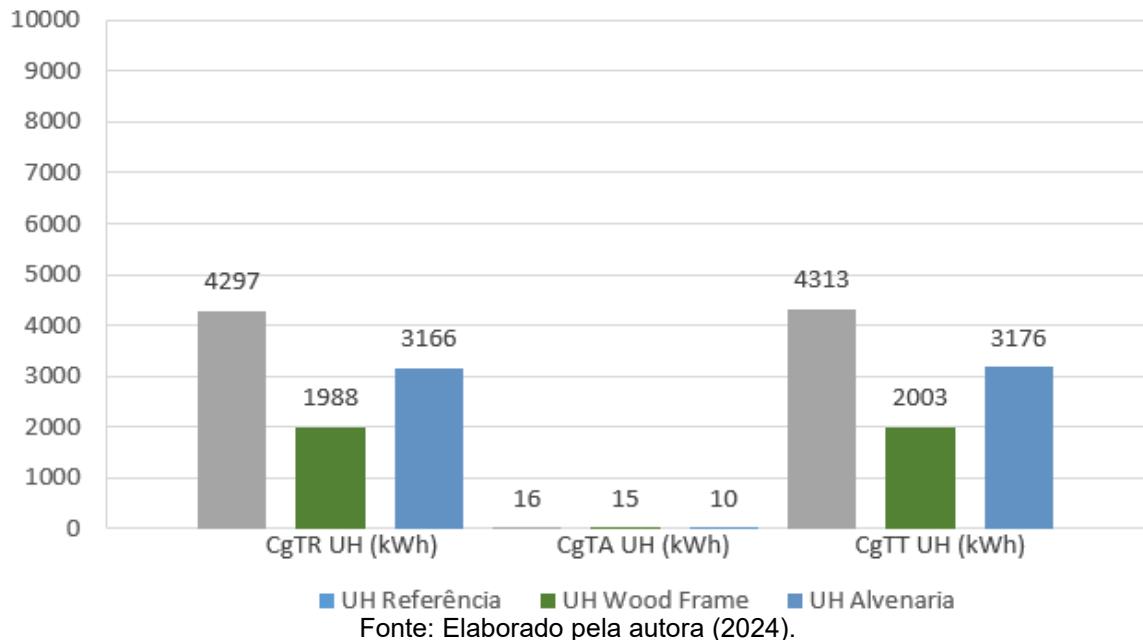
Classe da etiqueta	Critério de avaliação para PHFT e ΔPHFT	<i>Wood frame</i>		Alvenaria	
		PHFT e $\Delta\text{PHFTmín}$ (%)	Atende ao critério avaliativo	PHFT e $\Delta\text{PHFTmín}$ (%)	Atende ao critério avaliativo
Entre C e D	$\text{PHFT}_{\text{UH,real}} > 51,94$	77,62	SIM	64,50	SIM
Entre A e B	$\Delta\text{PHFTmín} (\%) \geq 11,53$	19,91	SIM	4,79	NÃO

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Referente ao critério das cargas térmicas, tanto o modelo de *wood frame*, quanto o de alvenaria alcançaram resultados que os classificaram com o nível B de eficiência energética. Enquanto o modelo de referência consumiu uma CgTT_{UH} de 4.313 kWh/ano, a envoltória em *wood frame* consumiu apenas 2.003 kWh/ano, e a de

alvenaria 3.176 kWh/ano. As reduções da CgTT_{UH}, portanto, corresponderam a 53,55% e 26,36% para os casos de *wood frame* e de alvenaria, respectivamente, apresentando-se abaixo do valor mínimo de 55% exigido pela INI-R para o atendimento da etiqueta A de eficiência energética da envoltória. A Figura 50 e Quadro 28 evidenciam o enunciado.

Figura 50 – Cargas térmicas anuais para as UH inseridas na cidade de Campo Grande.



Quadro 28 – Critérios de avaliação quanto a RedCgTT das UH inseridas na cidade de Campo Grande.

Classe da etiqueta	Critério de redução mínima CgTT _{UH,REAL} [%]	Wood frame		Alvenaria	
		RedCgTTmín UH (%)	Atende ao critério avaliativo	RedCgTTmín UH (%)	Atende ao critério avaliativo
D	RedCgTT \geq -17	53,55	SIM	26,36	SIM
C	RedCgTT \geq 0		SIM		SIM
B	RedCgTT \geq 0		SIM		SIM
A	RedCgTT \geq 55		NÃO		NÃO

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Ao observar os resultados de todos os parâmetros avaliativos, constata-se que devido a UH de *wood frame* atender aos dois critérios do PHFT, esta pode receber o nível B de desempenho energético, já a UH de alvenaria convencional, por não atender ao incremento mínimo de PHFT em relação ao modelo de referência, foi classificada com etiqueta C de eficiência energética. No Quadro 29 pode ser visualizada a

classificação para cada um dos critérios, bem como o nível de desempenho energético geral obtida pelas UH.

Quadro 29 – Classificação da etiqueta de eficiência energética das envoltórias das UH inseridas em Campo Grande.

Classe da etiqueta	Critério	Atendimento	
		Wood frame	Alvenaria
Etiqueta D	Tomáx UH	SIM	SIM
	PHFT	SIM	SIM
	RedCgTTmín _D UH	SIM	SIM
Etiqueta C	PHFT	SIM	SIM
	RedCgTTmín _C UH	SIM	SIM
Etiqueta B	ΔPHFTmín	SIM	NÃO
	RedCgTTmín _B UH	SIM	SIM
Etiqueta A	ΔPHFTmín	SIM	NÃO
	RedCgTTmín _A UH	NÃO	NÃO
Etiqueta da Envoltória da Edificação	Atende a classe D?	SIM	SIM
	Atende a classe C?	SIM	SIM
	Atende a classe B?	SIM	NÃO
	Atende a classe A?	NÃO	NÃO
		B	C

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Mediante aos resultados obtidos, observa-se que mesmo não atingindo o nível A de performance energética, a UH de *wood frame* quando comparada a de alvenaria obteve resultados significativamente superior, sendo que, embora os níveis de etiqueta tenham se repetido em relação a ZB5, os índices alcançados pelo modelo de *wood frame* foram ainda mais expressivos aos do item anterior.

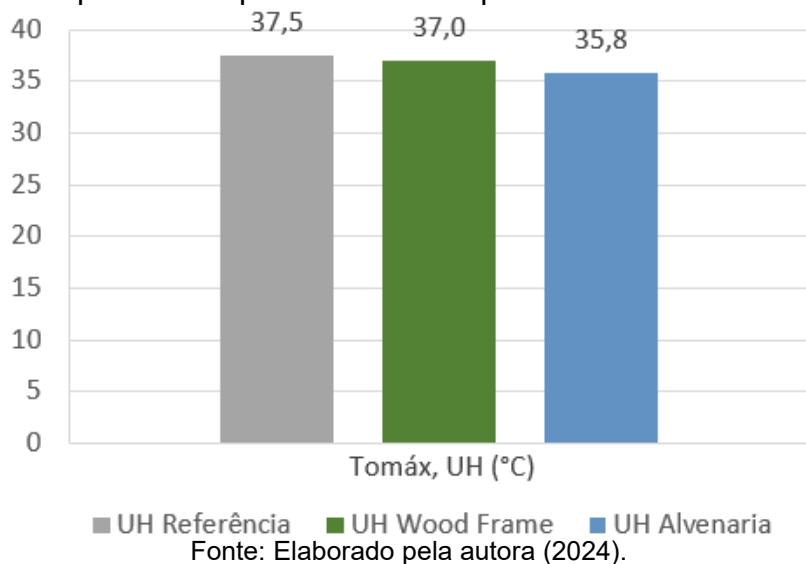
Neste contexto, o PHFT da UH de *wood frame* correspondeu 13,12% de horas a mais em relação a UH de alvenaria, enquanto a redução da CgTT_{UH} do modelo em estrutura de madeira foi 27,2% maior que o de alvenaria. Assim, é possível dizer que para a cidade de Campo Grande, a aplicação do sistema construtivo *wood frame* é mais eficaz quanto ao desempenho energético do que a alvenaria convencional.

4.1.7 Zona Bioclimática 7

Nas simulações termoenergéticas realizadas para a ZB7, as quais foram baseadas no clima da cidade de Teresina (Intervalo 3), os resultados obtidos para a envoltória do modelo em *wood frame* foram bastante satisfatórios, pois a UH real atingiu o nível A de eficiência energética. Quando comparada à UH de alvenaria, o modelo de *wood frame* também apresentou valores superiores de desempenho energético.

Inicialmente, verificou-se na análise o quesito da Tomáx, sendo que para ambos os modelos reais foram obtidos valores inferiores em relação ao modelo de referência. As Tomáx verificadas para os modelos de *wood frame* e de alvenaria foram equivalentes a 37,0 °C e 35,8 °C, respectivamente, contra 37,5 °C do modelo de referência. A Figura 51 apresenta os valores de Tomáx alcançados pelas UH reais e a de referência enquanto o Quadro 30 demonstra a designação para o atendimento aos critérios de desempenho desta avaliação.

Figura 51 – Temperaturas operativas anuais para as UH inseridas em Teresina.



Desta forma, em virtude da Tomáx do modelo em *wood frame* apresentar-se com diferença de 0,40 °C a menos do que a da UH de referência e, no modelo de alvenaria esta diferença corresponder a 1,65 °C a menos em relação a respectiva, comprova-se que os dois modelos reais analisados podem ser classificados com nível D de eficiência energética.

Quadro 30 – Critérios de avaliação da Tomáx para as UH inseridas em Teresina.

Classe da etiqueta	Critério de avaliação para Tomáx e Tomín (°C)	<i>Wood frame</i>		Alvenaria	
		Tomáx da UH (°C)	Atende ao critério avaliativo	Tomáx da UH (°C)	Atende ao critério avaliativo
Entre A e D	$\text{Tomáx}_{\text{UH,real}} \leq 39,5$	37,0	SIM	35,8	SIM

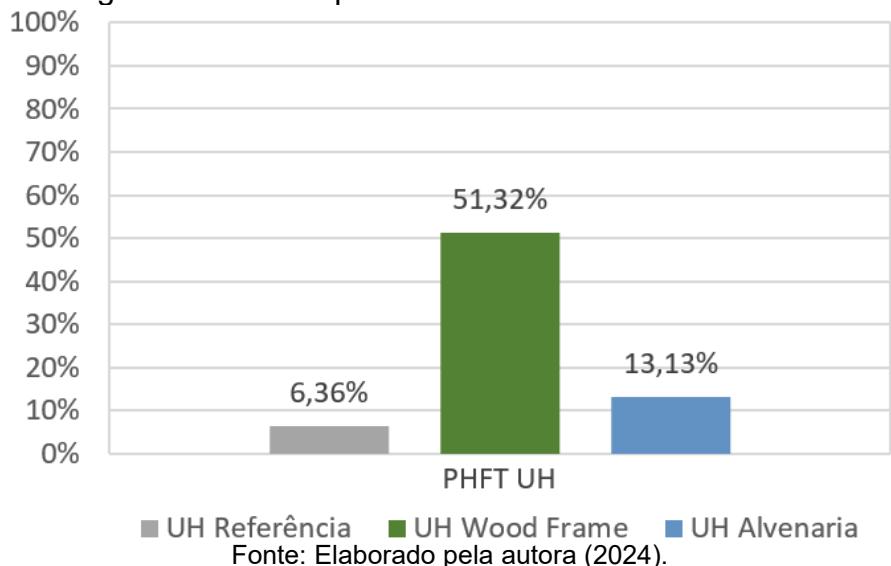
Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Com relação ao critério do PHFT, a UH de *wood frame* obteve um valor excepcionalmente superior em desempenho quando comparada a UH de referência e a de

alvenaria. Em conformidade ao evidenciado na Figura 52, o valor do PHFT_{UH} do *wood frame* atingiu 51,32%, o que representou um incremento de 44,96% em relação ao PHFT do modelo de referência, que correspondeu a meramente 6,36%.

O modelo de alvenaria obteve um PHFT de 13,13%, sendo o referido equivalente a um incremento de 6,77% quando comparado ao modelo de referência. Desta forma, somente o PHFT obtido pela UH de *wood frame* foi suficiente para atingir a níveis mais altos de eficiência energética, uma vez que, ao superar o valor de 44,96% de incremento no PHFT, a UH em estrutura de madeira serrada conseguiu atender ao nível de etiquetagem A-B, enquanto a UH de alvenaria atingiu apenas as classes C-D. No Quadro 31 é apresentada a avaliação segundo os parâmetros do PHFT.

Figura 52 – PHFT para as UH inseridas em Teresina.



Quadro 31 – Critérios de avaliação do PHFT e ΔPHFT das UH inseridas em Teresina.

Classe da etiqueta	Critério de avaliação para PHFT e ΔPHFT	Wood frame		Alvenaria	
		PHFT e ΔPHFTmín (%)	Atende ao critério avaliativo	PHFT e ΔPHFTmín (%)	Atende ao critério avaliativo
Entre C e D	PHFT _{UH,real} > 5,72	51,32	SIM	13,13	SIM
Entre A e B	ΔPHFTmín (%) ≥ 41,31	44,96	SIM	6,77	NAO

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

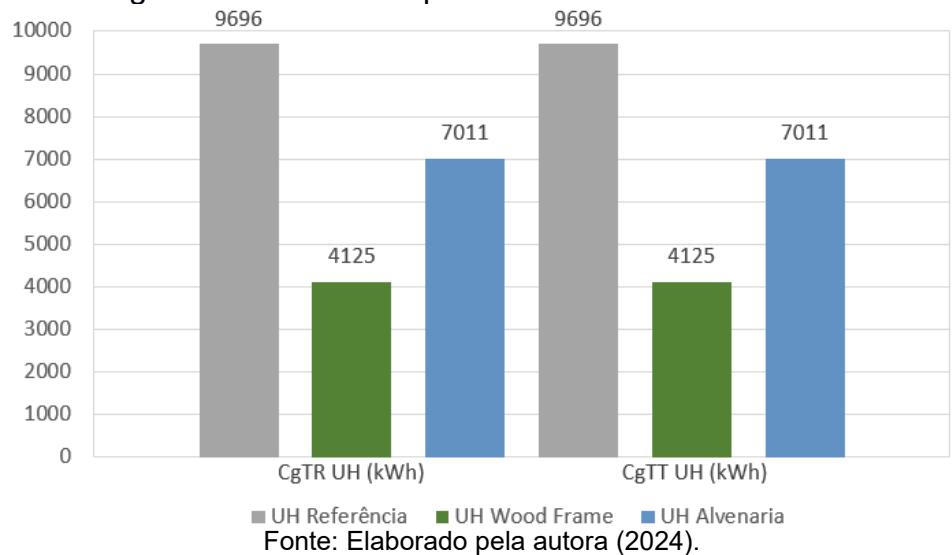
Referente ao critério das cargas térmicas, a UH de *wood frame* apresentou resultados que o classificaram com nível A de eficiência energética, tendo alcançado uma redução equivalente a 57,46% das cargas térmicas totais. Neste contexto, enquanto o modelo de referência consumiu uma CgTT_{UH} de 9.696 kWh/ano, a envoltória

em *wood frame* consumiu apenas 4.125 kWh/ano. Como a RedCgTT da UH de *wood frame* foi superior ao valor de 55% especificado como exigência mínima pela INI-R, o modelo de *wood frame* obteve o nível mais alto na escala das etiquetas.

Com relação ao modelo de alvenaria, verificou-se que para esse critério a edificação real atendeu ao nível B de eficiência energética, pois apresentou uma RedCgTT_{UH} em comparação ao modelo de referência de 26,36%, sendo tal valor insuficiente para alcançar o nível superior na escala das etiquetas de desempenho energético.

Cabe salientar que, em virtude dos resultados da CgTA_{UH} serem nulos, a CgTT_{UH} foi equivalente a CgTR_{UH} em todas as envoltórias analisadas. A Figura 53 e Quadro 32 evidenciam o relatado.

Figura 53 – Cargas térmicas anuais para as UH inseridas na cidade de Teresina.



Quadro 32 – Critérios de avaliação quanto a RedCgTT das UH inseridas na cidade de Teresina.

Classe da etiqueta	Critério de redução mínima CgTT _{UH,REAL} [%]	Wood frame		Alvenaria	
		RedCgTTmín UH (%)	Atende ao critério avaliativo	RedCgTTmín UH (%)	Atende ao critério avaliativo
D	RedCgTT \geq -17	57,46	SIM	27,69	SIM
C	RedCgTT \geq 0		SIM		SIM
B	RedCgTT \geq 0		SIM		SIM
A	RedCgTT \geq 55		SIM		NÃO

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Realizando a compilação dos resultados é possível verificar que a edificação de *wood frame* pode ser classificada com etiqueta nível A, pois atendeu a todos os critérios avaliados. O modelo de alvenaria, porém, em virtude de não atender a todos

os parâmetros do PHFT e da RedCgTT, obteve o nível C de desempenho energético. O Quadro 33 apresenta em detalhes o exposto.

Quadro 33 – Classificação da etiqueta de eficiência energética das envoltórias das UH inseridas em Teresina.

Classe da etiqueta	Critério	Atendimento	
		Wood frame	Alvenaria
Etiqueta D	Tomáx UH	SIM	SIM
	PHFT	SIM	SIM
	RedCgTTmín _D UH	SIM	SIM
Etiqueta C	PHFT	SIM	SIM
	RedCgTTmín _C UH	SIM	SIM
Etiqueta B	ΔPHFTmín	SIM	NÃO
	RedCgTTmín _B UH	SIM	SIM
Etiqueta A	ΔPHFTmín	SIM	NÃO
	RedCgTTmín _A UH	SIM	NÃO
Etiqueta da Envoltória da Edificação	Atende a classe D?	SIM	SIM
	Atende a classe C?	SIM	SIM
	Atende a classe B?	SIM	NÃO
	Atende a classe A?	SIM	NÃO
		A	C

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Com base nos resultados, infere-se um grande potencial de uso do sistema construtivo de *wood frame* na cidade de Teresina (ZB7), tendo em vista o desempenho energético bastante superior da UH de estrutura de madeira serrada, que quando comparada a de alvenaria obteve 38,19% de PHFT a mais e uma redução de carga térmica total consumida de quase 30%.

4.1.8 Zona Bioclimática 8

Nas cidades selecionadas para representar a ZB8, os resultados do modelo em *wood frame* se mostraram com melhor performance energética do que os modelos de referência e de alvenaria. Apesar disso, em nenhuma das cidades avaliadas a UH de *wood frame* atingiu nível máximo de eficiência energética. A seguir são apresentados os resultados para cada cidade representante da ZB8.

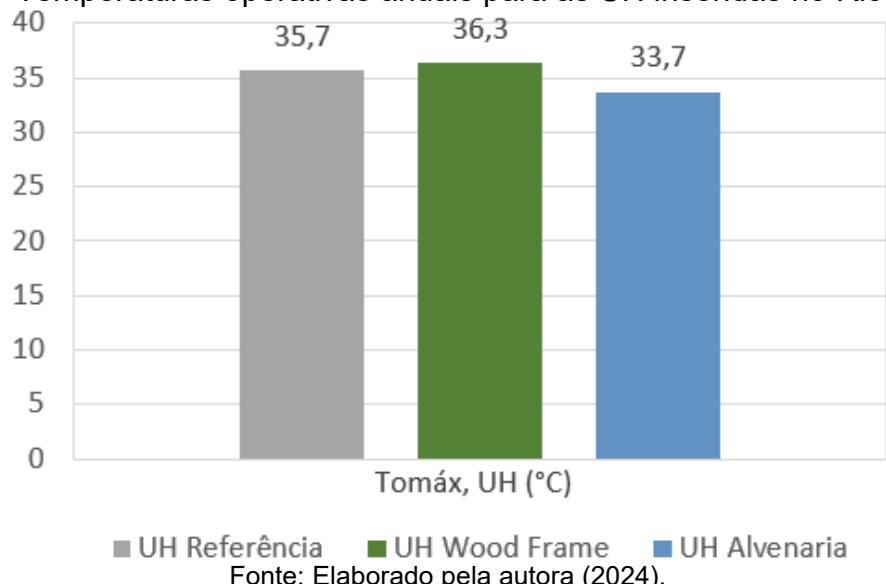
4.1.8.1 Rio de Janeiro

Para a cidade do Rio de Janeiro (Intervalo 1), a Tomáx do modelo real em *wood frame* foi superior em 0,6 °C quando comparada a Tomáx da UH de referência, sendo verificado 36,3 °C no modelo real contra 35,7 °C da referência. Mesmo diante destes

valores, devido a Tomáx do modelo em *wood frame* apresentar-se com uma diferença inferior a 2 °C em relação a UH de referência, foi possível enquadrar o modelo em estrutura de madeira serrada com etiqueta superior ao nível E de eficiência energética.

Quanto ao modelo de alvenaria, que apresenta Tomáx de 33,7 °C e 2,0 °C a menos do que a referência, este também pode ser enquadrado com nível de eficiência energética superior ao do último nível da escala definida na INI-R. Na Figura 54 é exposto o gráfico com os valores das Tomáx obtidas para cada modelo analisado e, o Quadro 34 demonstra os critérios para o atendimento de desempenho desta avaliação.

Figura 54 – Temperaturas operativas anuais para as UH inseridas no Rio de Janeiro.



Quadro 34 – Critérios de avaliação da Tomáx e Tomín para as UH inseridas no Rio de Janeiro.

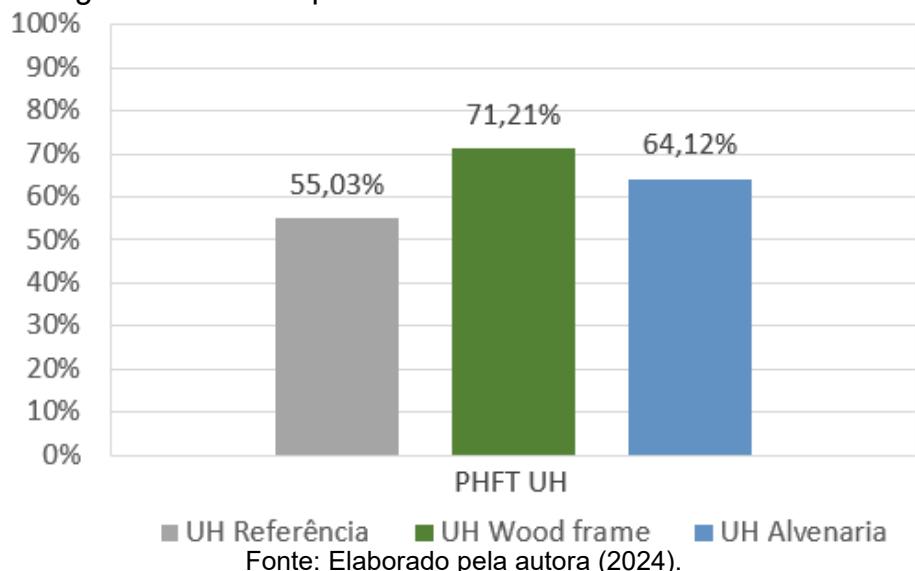
Classe da etiqueta	Critério de avaliação para Tomáx e Tomín (°C)	Wood frame		Alvenaria	
		Tomáx da UH (°C)	Atende ao critério avaliativo	Tomáx da UH (°C)	Atende ao critério avaliativo
Entre A e D	$\text{Tomáx}_{\text{UH,real}} \leq 37,7$	36,3	SIM	33,7	SIM

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Na avaliação do critério do PHFT, a UH de *wood frame* obteve um valor superior em desempenho quando comparado a UH de referência e a de alvenaria, promovendo desta forma mais horas dentro da faixa de temperatura operativa de 18 °C a 26 °C, conforme determinado pelo Intervalo 1.

Como pode ser visualizado na Figura 55, o valor do PHFT_{UH} do *wood frame* atingiu 71,21%, o que representou um incremento de 16,19% em relação ao PHFT_{UH} do modelo de referência, que correspondeu a 55,03%. O modelo de alvenaria também obteve um incremento no PHFT quando comparado ao modelo de referência, igual a 9,09%. Estes valores de PHFT dos modelos reais foram suficientes para atender as classes C-D de eficiência energética, no entanto, somente a UH de *wood frame* conseguiu atingir níveis mais altos na escala classificatória, visto que excedeu o valor de 13,08% de incremento no PHFT quando comparada ao modelo de referência, conforme a delimitação exigida pela INI-R para os níveis A-B. No Quadro 35 é exposta a avaliação dos critérios do PHFT .

Figura 55 – PHFT para as UH inseridas no Rio de Janeiro.



Quadro 35 – Critérios de avaliação do PHFT e ΔPHFT das UH inseridas no Rio de Janeiro.

Classe da etiqueta	Critério de avaliação para PHFT e ΔPHFT	<i>Wood frame</i>		Alvenaria	
		PHFT e $\Delta\text{PHFT}_{\text{mín}}$ (%)	Atende ao critério avaliativo	PHFT e $\Delta\text{PHFT}_{\text{mín}}$ (%)	Atende ao critério avaliativo
Entre C e D	$\text{PHFT}_{\text{UH,real}} > 49,53$	71,21	SIM	64,12	SIM
Entre A e B	$\Delta\text{PHFT}_{\text{mín}} (\%) \geq 13,08$	16,19	SIM	9,09	NAO

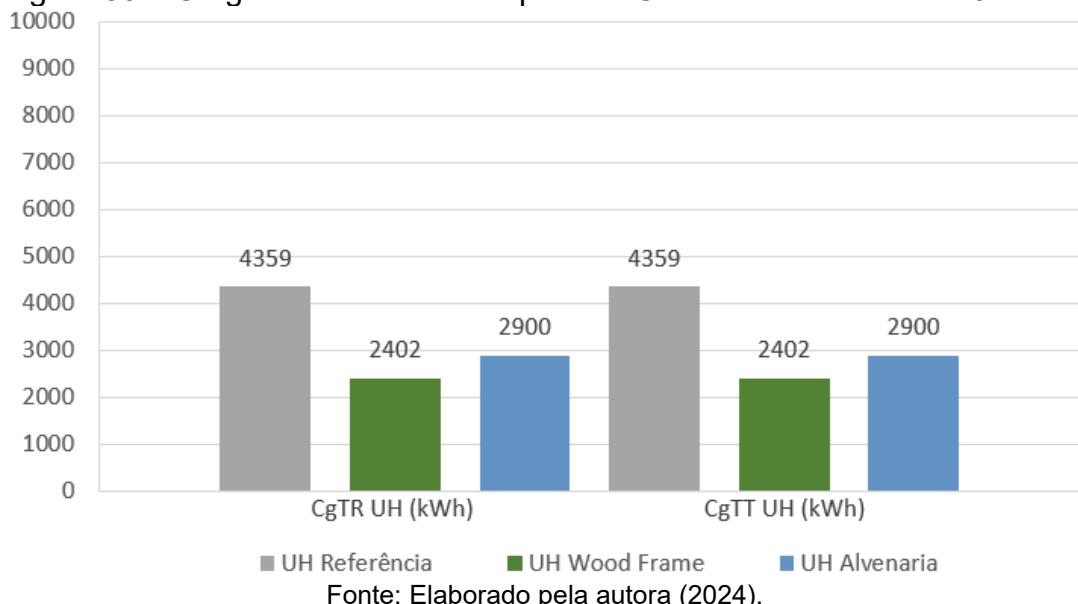
Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Para o critério das cargas térmicas, ambos os modelos reais alcançaram o nível B de eficiência energética. Enquanto a envoltória da referência consumiu uma CgTT_{UH} de 4.359 kWh/ano, a de *wood frame* consumiu apenas 2.402 kWh/ano e a de alvenaria, 2.900 kWh/ano. De acordo com estes valores, calculou-se que as RedCgTT foram de

44,88% para o *wood frame* e 33,47% para a alvenaria, sendo apresentado na Figura 56 o gráfico do consumo das CgTT_{UH}.

Em sequência, o Quadro 36 apresenta os critérios de avaliação e de atendimento às classes das etiquetas de eficiência energética das envoltórias quanto à RedCgTT_{UH} para a cidade do Rio de Janeiro. Neste caso, devido à relação entre a CgTT_{UH} da referência e a área dos APP ser maior do que 100, a redução mínima das CgTT_{UH} para obter o nível A deve ser igual ou maior à 55%, conforme a Tabela 8.7 da INI-R.

Figura 56 – Cargas térmicas anuais para as UH inseridas no Rio de Janeiro.



Quadro 36 – Critérios de avaliação quanto a RedCgTT das UH inseridas no Rio de Janeiro.

Classe da etiqueta	Critério de redução mínima CgTT _{UH,REAL} [%]	Wood frame		Alvenaria	
		RedCgTTmín UH (%)	Atende ao critério avaliativo	RedCgTTmín UH (%)	Atende ao critério avaliativo
D	RedCgTT \geq -17		SIM		SIM
C	RedCgTT \geq 0		SIM		SIM
B	RedCgTT \geq 0		SIM		SIM
A	RedCgTT \geq 55		NÃO		NÃO

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Referente ao nível geral de eficiência termoenergética das envoltórias, é possível verificar que, embora a UH em *wood frame* tenha obtido resultados mais satisfatórios que a UH de alvenaria e de referência quanto a quantidade de PHFT e a redução da carga térmica total, estes valores não foram suficientes para alcançar o nível mais

alto de eficiência energética. Entretanto, tais resultados foram o bastante para classificar o modelo de *wood frame* com um nível superior de desempenho termoenergético quando comparada a UH de alvenaria.

Desta forma, enquanto a UH de *wood frame* atingiu o nível B de eficiência energética, a UH de alvenaria obteve o nível C. No Quadro 37 é possível analisar com maior precisão a classificação dos critérios e o nível de eficiência energética alcançada pelas UH avaliadas.

Quadro 37 – Classificação da etiqueta de eficiência energética das envoltórias das UH inseridas no Rio de Janeiro.

Classe da etiqueta	Critério	Atendimento	
		<i>Wood frame</i>	Alvenaria
Etiqueta D	Tomáx UH	SIM	SIM
	PHFT	SIM	SIM
	RedCgTTmín _D UH	SIM	SIM
Etiqueta C	PHFT	SIM	SIM
	RedCgTTmín _C UH	SIM	SIM
Etiqueta B	ΔPHFTmín	SIM	NÃO
	RedCgTTmín _B UH	SIM	SIM
Etiqueta A	ΔPHFTmín	SIM	NÃO
	RedCgTTmín _A UH	NÃO	NÃO
Etiqueta da Envoltória da Edificação	Atende a classe D?	SIM	SIM
	Atende a classe C?	SIM	SIM
	Atende a classe B?	SIM	NÃO
	Atende a classe A?	NÃO	NÃO
		B	C

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Conclui-se, portanto, que mesmo não alcançando a classe mais alta de etiquetagem, a UH de *wood frame* quando comparada a de alvenaria é capaz de oferecer uma notável vantagem em termos de eficiência energética, visto que, alcançou um percentual superior a 7,00% de horas a mais de PHFT, obteve uma redução no consumo de CgTT_{UH} maior que 10% em relação ao modelo de alvenaria. Logo, percebe-se um grande potencial de implantação do sistema construtivo em estrutura leve de madeira na cidade do Rio de Janeiro.

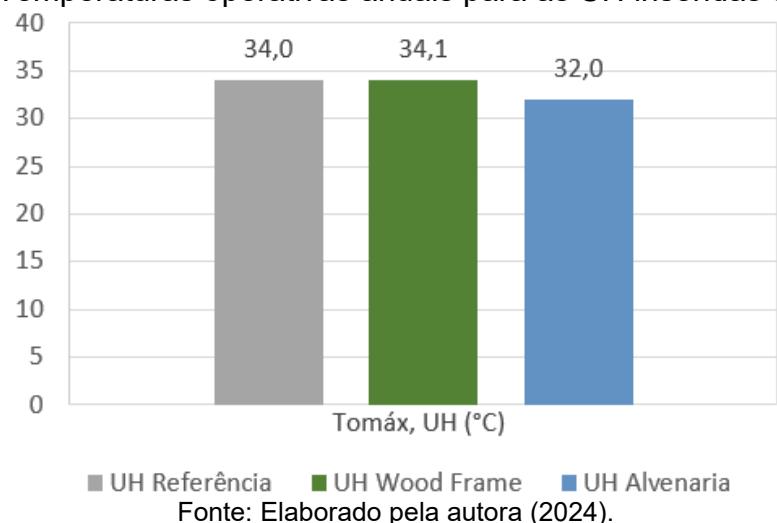
4.1.8.2 Fortaleza

Igualmente ao ocorrido na cidade do Rio de Janeiro, a Tomáx do modelo real em *wood frame* obtida para a cidade de Fortaleza foi superior em relação a Tomáx da UH de referência, contudo, neste caso a diferença verificada foi mínima, correspondendo a apenas 0,1 °C. Consoante ao apresentado na Figura 57, a Tomáx da UH de

wood frame foi equivalente a 34,1 °C contra 34,0 °C do modelo de referência. Contudo, em virtude da Tomáx do modelo em *wood frame* apresentar-se com uma diferença inferior a 2 °C em relação a UH de referência, foi possível enquadrar este modelo real dentre os níveis A e D de eficiência energética da INI-R.

De maneira oposta a UH em estrutura de madeira, o modelo de alvenaria apresentou Tomáx inferior à de referência, com uma diferença de 2,0 °C a menos em relação a respectiva. Com isso, concluiu-se que o modelo de alvenaria também pode ser classificado dentre os níveis A e D de eficiência energética da INI-R. O Quadro 38 demonstra os critérios de desempenho para o atendimento desta avaliação.

Figura 57 – Temperaturas operativas anuais para as UH inseridas em Fortaleza.



Quadro 38 – Critérios de avaliação da Tomáx para as UH inseridas em Fortaleza.

Classe da etiqueta	Critério de avaliação para Tomáx e Tomín (°C)	<i>Wood frame</i>		Alvenaria	
		Tomáx da UH (°C)	Atende ao critério avaliativo	Tomáx da UH (°C)	Atende ao critério avaliativo
Entre A e D	$\text{Tomáx}_{\text{UH,real}} \leq 36,0$	34,1	SIM	32,0	SIM

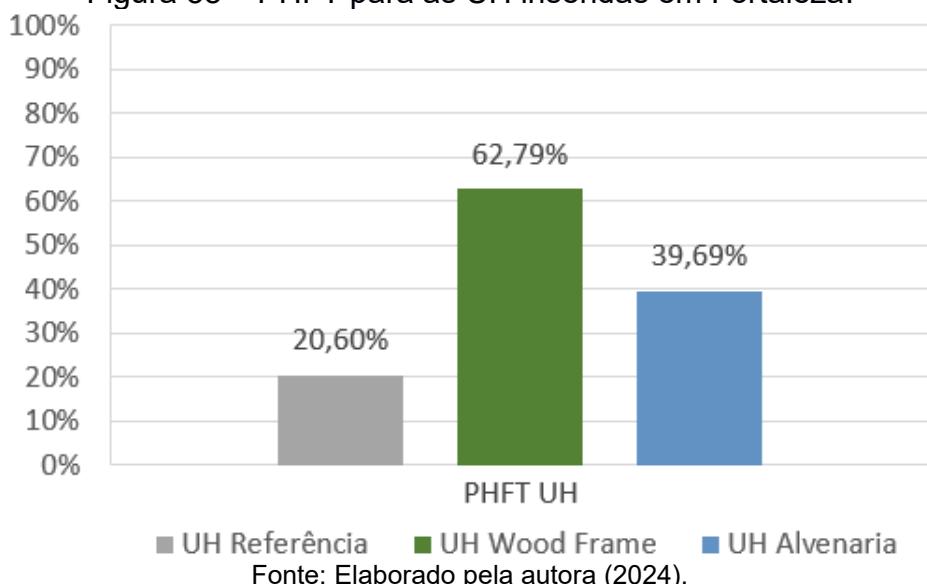
Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Com relação ao critério do PHFT, a UH de *wood frame* obteve um valor excepcionalmente superior em desempenho quando comparada a UH de referência e a de alvenaria. Em conformidade ao evidenciado na Figura 58, o valor do PHFT_{UH} do *wood frame* atingiu 62,79%, o que representou um incremento de 42,19% em relação ao PHFT do modelo de referência, que correspondeu a apenas 20,60%. O modelo de alvenaria também obteve um PHFT acima do modelo de referência, sendo igual a

39,69%, o que equivale a incremento de 19,09% quando comparado ao modelo de referência.

Desta forma, somente o valor obtido pela UH de *wood frame* foi suficiente para atingir a níveis mais altos na escala classificatória, uma vez que, ao superar o valor de 33,05% de incremento no PHFT, a UH em estrutura de madeira serrada conseguiu atender ao nível A-B, enquanto a UH de alvenaria atingiu apenas as classes C-D. No Quadro 39 é apresentada a avaliação segundo os parâmetros do PHFT.

Figura 58 – PHFT para as UH inseridas em Fortaleza.



Quadro 39 – Critérios de avaliação do PHFT e ΔPHFT das UH inseridas em Fortaleza.

Classe da etiqueta	Critério de avaliação para PHFT e ΔPHFT	<i>Wood frame</i>		Alvenaria	
		PHFT e $\Delta\text{PHFTmín}$ (%)	Atende ao critério avaliativo	PHFT e $\Delta\text{PHFTmín}$ (%)	Atende ao critério avaliativo
Entre C e D	$\text{PHFT}_{\text{UH,real}} > 18,54$	62,79	SIM	39,69	SIM
Entre A e B	$\Delta\text{PHFTmín} (\%) \geq 33,05$	42,19	SIM	19,09	NÃO

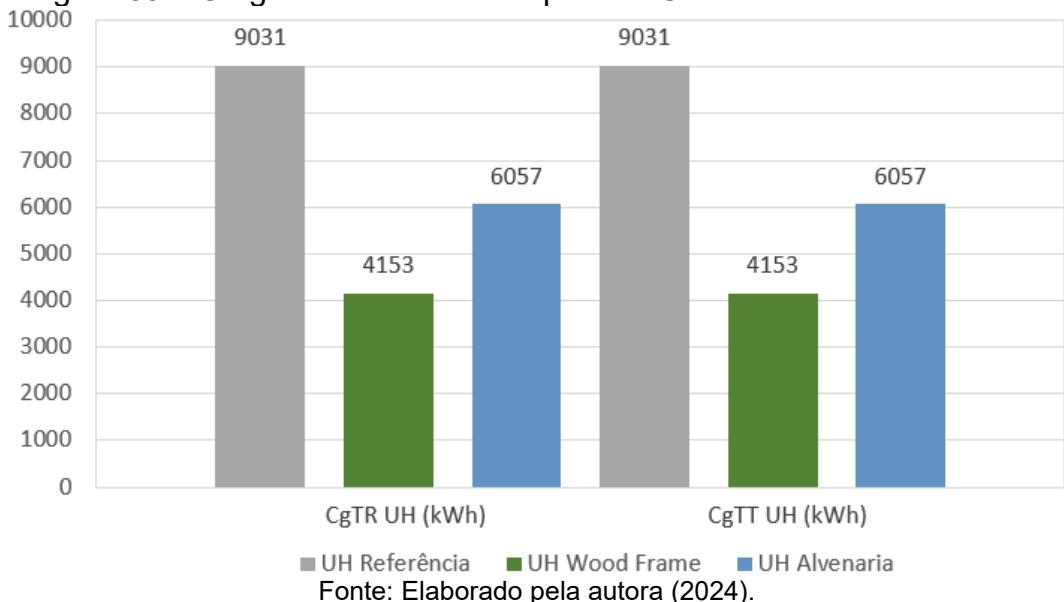
Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Referente ao critério das cargas térmicas, apesar da UH de *wood frame* apresentar excelentes resultados neste quesito, estes não foram suficientes para classificá-la com a etiqueta nível A de eficiência energética. Neste contexto, enquanto o modelo de referência consumiu uma CgTT_{UH} de 9.031 kWh/ano, a envoltória em *wood frame* consumiu apenas 4.153 kWh/ano. Como a RedCgTT da UH de *wood frame*

neste caso foi de 54,01%, esta não foi o bastante para alcançar o valor de 55% especificado como exigência mínima pela INI-R, recebendo assim a etiqueta nível B de eficiência energética.

Com relação ao modelo de alvenaria, verificou-se que para esse critério a edificação real também atendeu ao nível B, pois apresentou uma $RedCgTT_{UH}$ em comparação ao modelo de referência de 26,36%. Cabe salientar que, em virtude dos resultados da $CgTA_{UH}$ serem nulos, a $CgTT_{UH}$ foi equivalente a $CgTR_{UH}$ em todas as envoltórias analisadas. A Figura 59 e Quadro 40 evidenciam o relatado.

Figura 59 – Cargas térmicas anuais para as UH inseridas em Fortaleza.



Quadro 40 – Critérios de avaliação quanto a $RedCgTT$ das UH inseridas em Fortaleza.

Classe da etiqueta	Critério de redução mínima $CgTT_{UH,REAL}$ [%]	Wood frame		Alvenaria	
		$RedCgTT_{UH}$ (%)	Atende ao critério avaliativo	$RedCgTT_{UH}$ (%)	Atende ao critério avaliativo
D	$RedCgTT \geq -17$		SIM		SIM
C	$RedCgTT \geq 0$		SIM		SIM
B	$RedCgTT \geq 0$		SIM		SIM
A	$RedCgTT \geq 55$	54,01	NÃO	32,93	NÃO

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Ao observar os resultados de todos os parâmetros avaliativos, constata-se que em virtude do modelo em *wood frame* atender aos dois critérios do PHFT, este pode atingir nível B de desempenho energético, já a UH de alvenaria convencional, por não

atender ao incremento mínimo de PHFT em relação ao modelo de referência, foi classificada com etiqueta C de eficiência energética da envoltória. No Quadro 41 pode ser visualizada a classificação para cada um dos critérios, bem como a etiqueta de desempenho energético geral obtida para as envoltórias analisadas.

Quadro 41 – Classificação da etiqueta de eficiência energética das envoltórias das UH inseridas em Fortaleza.

Classe da etiqueta	Critério	Atendimento	
		Wood frame	Alvenaria
Etiqueta D	Tomáx UH	SIM	SIM
	PHFT	SIM	SIM
	RedCgTTmín _D UH	SIM	SIM
Etiqueta C	PHFT	SIM	SIM
	RedCgTTmín _C UH	SIM	SIM
Etiqueta B	ΔPHFTmín	SIM	NÃO
	RedCgTTmín _B UH	SIM	SIM
Etiqueta A	ΔPHFTmín	SIM	NÃO
	RedCgTTmín _A UH	NÃO	NÃO
Etiqueta da Envoltória da Edificação	Atende a classe D?	SIM	SIM
	Atende a classe C?	SIM	SIM
	Atende a classe B?	SIM	NÃO
	Atende a classe A?	NÃO	NÃO
		B	C

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Mediante aos resultados expostos, pode-se concluir que assim como na cidade do Rio de Janeiro, o sistema construtivo em *wood frame* apresentou um potencial de uso superior ao da alvenaria convencional quando considerado o clima da cidade de Fortaleza e o desempenho energético das envoltórias.

Ainda sobre os resultados obtidos, convém destacar que, apesar de receber o mesmo nível de eficiência energética do item anterior, a UH de *wood frame* quando comparada a de alvenaria obteve uma diferença nos valores do PHFT e da redução da CgTT_{UH} mais expressiva que as obtidas para a cidade do Rio de Janeiro, sendo que, alcançou um PHFT 23,1% maior que o modelo de alvenaria.

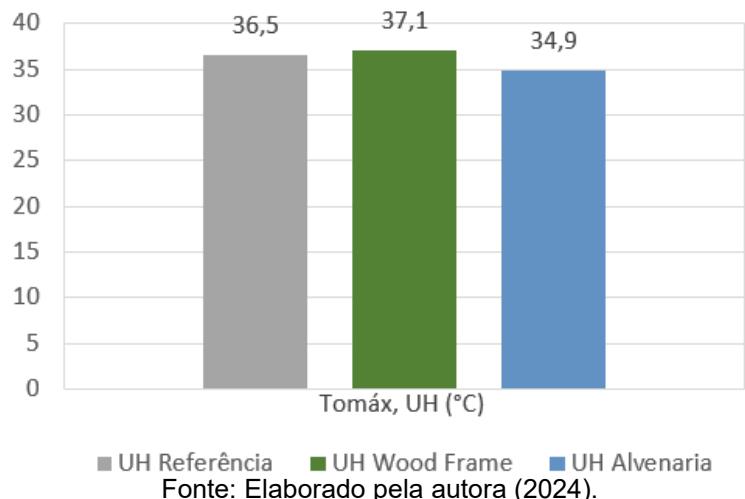
Além disso, devido a uma diferença exígua de aproximadamente 1% na redução da CgTT_{UH}, o modelo de *wood frame* deixou de atingir o nível A de eficiência energética para a cidade de Fortaleza.

4.1.8.3 Manaus

Para a cidade de Manaus (Intervalo 3), os resultados da UH de *wood frame* apresentaram valores satisfatórios de desempenho termoenergético quando comparados a UH de alvenaria e de referência. Contudo, tais resultados não foram suficientes para atingir os níveis A e B de eficiência energética.

Conforme é possível visualizar na Figura 60 e no Quadro 42, a Tomáx obtida no modelo real em *wood frame* foi superior ao da referência, correspondendo a 37,1 °C contra 34,9 °C do modelo de referência. Entretanto, devido a Tomáx do modelo em *wood frame* apresentar-se com uma diferença inferior a 2 °C em relação a UH de referência, foi possível classificá-la com nível D de eficiência energética. Em contrapartida, o modelo de alvenaria apresentou Tomáx inferior à de referência, com uma diferença de 1,6 °C a menos em relação a respectiva. Sendo assim, a UH de alvenaria também se mostrou apta a receber o nível de eficiência energética superior ao do último nível da escala definida pela INI-R.

Figura 60 – Temperaturas operativas anuais para as UH inseridas em Manaus.



Quadro 42 – Critérios de avaliação da Tomáx para as UH inseridas em Manaus.

Classe da etiqueta	Critério de avaliação para Tomáx e Tomín (°C)	<i>Wood frame</i>		Alvenaria	
		Tomáx da UH (°C)	Atende ao critério avaliativo	Tomáx da UH (°C)	Atende ao critério avaliativo
Entre A e D	$\text{Tomáx}_{\text{UH,real}} \leq 38,5$	37,1	SIM	34,9	SIM

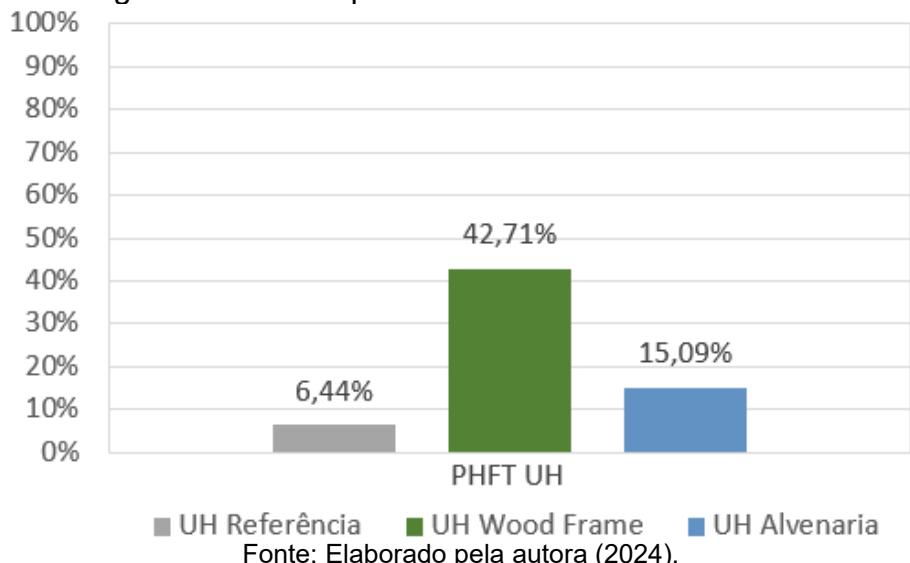
Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Na avaliação do critério do PHFT, a UH de *wood frame* obteve um valor significativamente superior em desempenho quando comparado a UH de referência e a de alvenaria, porém, este não foi suficiente para atender os níveis mais elevados na escala das etiquetas.

Como pode ser observado na Figura 61, o valor do PHFT_{UH} do *wood frame* atingiu 42,71%, o que representou um incremento de 36,26% em relação ao PHFT_{UH} do modelo de referência, que correspondeu a 6,44%. Já o modelo de alvenaria obteve um menor incremento no PHFT quando comparado ao modelo de referência, correspondendo a 8,65%.

Estes valores de PHFT dos modelos reais foram suficientes para atender ao nível de eficiência C-D, no entanto, os mesmos não foram suficientes para atingir os níveis A-B na escala classificatória das etiquetas, visto que não superaram o valor de 41,26% de incremento no PHFT quando comparados ao modelo de referência, conforme a grandeza delimitada pela INI-R. No Quadro 43 está detalhada a avaliação conforme os critérios do PHFT.

Figura 61 – PHFT para as UH inseridas em Manaus.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Quadro 43 – Critérios de avaliação do PHFT e ΔPHFT das UH inseridas em Manaus.

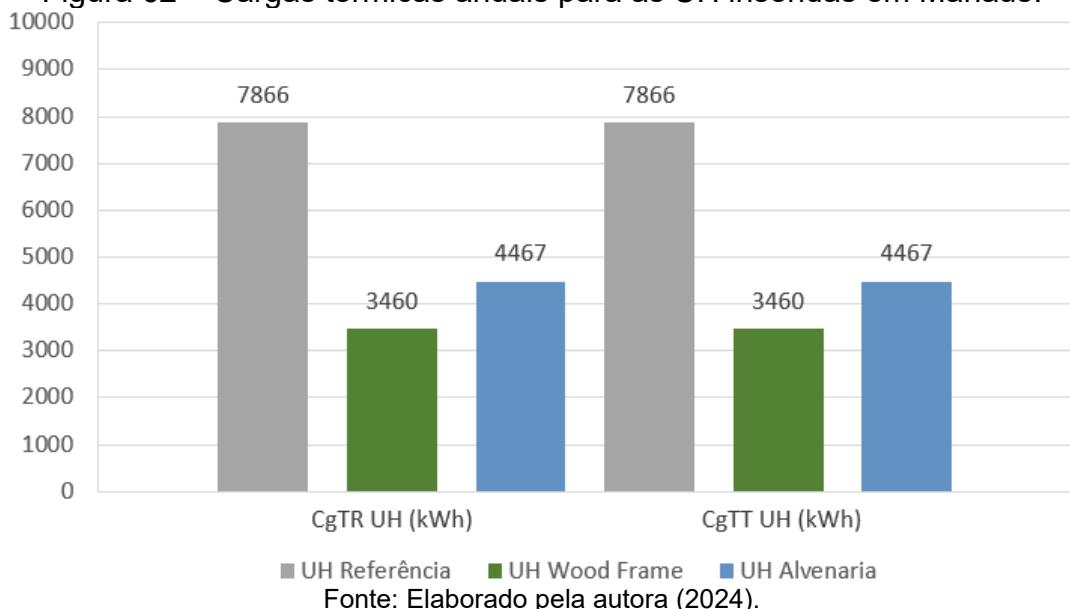
Classe da etiqueta	Critério de avaliação para PHFT e ΔPHFT	<i>Wood frame</i>		Alvenaria	
		PHFT e $\Delta\text{PHFTmín}$ (%)	Atende ao critério avaliativo	PHFT e $\Delta\text{PHFTmín}$ (%)	Atende ao critério avaliativo
Entre C e D	$\text{PHFT}_{\text{UH,real}} > 5,80$	42,71	SIM	15,09	SIM
Entre A e B	$\Delta\text{PHFTmín} (\%) \geq 41,26$	36,26	NAO	8,65	NAO

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Quanto ao atendimento ao critério de avaliação das cargas térmicas, o modelo real em *wood frame* alcançou nível superior de desempenho térmico para a cidade de Manaus, pois a redução da $CgTT$ da UH real em comparação com a de referência foi de 56,02%, superando o valor de 55% de redução necessário para o atendimento do nível A. Enquanto o modelo de referência consumiu uma $CgTT_{UH}$ de 7.866 kWh/ano, a envoltória em *wood frame* consumiu 3.460 kWh/ano.

O modelo de alvenaria, porém, não foi capaz de atingir o nível A para este critério, obtendo o nível B de eficiência energética. A $CgTT_{UH}$ consumida pela envoltória real de alvenaria foi de 4.467 kWh/ano, o que representou uma redução de 43,21%, sendo insuficiente para obter o nível mais alto para o desempenho da envoltória estabelecido na INI-R. A Figura 62 apresenta o gráfico das cargas térmicas das três UH analisadas e o Quadro 44, em sequência, apresenta os critérios de avaliação e atendimento as etiquetas das envoltórias quanto à $RedCgTT_{UH}$ dos modelos reais.

Figura 62 – Cargas térmicas anuais para as UH inseridas em Manaus.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Quadro 44 – Critérios de avaliação quanto a $RedCgTT$ das UH inseridas em Manaus.

Classe da etiqueta	Critério de redução mínima $CgTT_{UH,REAL}$ [%]	<i>Wood frame</i>		Alvenaria	
		$RedCgTTmín UH$ (%)	Atende ao critério avaliativo	$RedCgTTmín UH$ (%)	Atende ao critério avaliativo
D	$RedCgTT \geq -17$	56,02	SIM	43,21	SIM
C	$RedCgTT \geq 0$		SIM		SIM
B	$RedCgTT \geq 0$		SIM		SIM
A	$RedCgTT \geq 55$		SIM		NÃO

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Referente ao nível geral de eficiência termoenergética das envoltórias, foi possível verificar que, embora a UH em *wood frame* tenha obtido resultados mais satisfatórios que a de alvenaria em termos do PHFT e da redução da carga térmica total, ambos os modelos reais não conseguiram alcançar o percentual necessário de incremento de horas dentro de uma faixa de temperatura operativa para o Intervalo 3. Assim, tanto a UH de *wood frame* quanto a de alvenaria atingiram o nível C de eficiência energética. No Quadro 45 é possível analisar com maior precisão a classificação dos critérios e a etiqueta de eficiência energética alcançada pelas UH avaliadas.

Quadro 45 – Classificação da etiqueta de eficiência energética das envoltórias das UH inseridas em Manaus.

Classe da etiqueta	Critério	Atendimento	
		Wood frame	Alvenaria
Etiqueta D	Tomáx UH	SIM	SIM
	PHFT	SIM	SIM
	RedCgTTmínD UH	SIM	SIM
Etiqueta C	PHFT	SIM	SIM
	RedCgTTmínC UH	SIM	SIM
Etiqueta B	ΔPHFTmín	NÃO	NÃO
	RedCgTTmínB UH	SIM	SIM
Etiqueta A	ΔPHFTmín	NÃO	NÃO
	RedCgTTmínA UH	SIM	NÃO
Etiqueta da Envoltória da Edificação	Atende a classe D?	SIM	SIM
	Atende a classe C?	SIM	SIM
	Atende a classe B?	NÃO	NÃO
	Atende a classe A?	NÃO	NÃO
		C	C

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Desta forma, ao verificar os resultados dos parâmetros analisados é possível observar que, embora os modelos dos casos reais tenham obtido o mesmo selo de eficiência energética, a UH em *wood frame* quando comparada a de alvenaria apresentou 27,62% mais de PHFT e obteve uma redução da CgTT_{UH} consumida de 22,54%.

Assim, evidencia-se um maior potencial de uso da UH em estrutura de madeira serrada em relação ao sistema construtivo de alvenaria convencional quando considerado o clima da cidade de Manaus e o desempenho termoenergético obtido pelas envoltórias.

4.2 MODELOS DE PAINÉIS EM WOOD FRAME CONFIGURADOS PARA ANÁLISE TERMOENERGÉTICA

Da mesma forma que no capítulo anterior, este capítulo apresenta de maneira detalhada os resultados das simulações termoenergéticas realizadas com diferentes painéis em *wood frame* aplicados na envoltória da HIS, sendo discriminados para cada zona bioclimática analisada. A fim de facilitar a comparação entre os novos modelos propostos e os casos bases estudados, os resultados já apresentados no capítulo 4.1 também são indicados nesta seção.

4.2.1 Zona Bioclimática 1

Os resultados das novas simulações termoenergéticas conduzidas para o clima de Curitiba (ZB1 e Intervalo 1) revelaram um desempenho energético superior ao do caso base (CB) em *wood frame* e ao modelo de referência para todas as novas configurações propostas. Para os casos em que a composição dos painéis incluiu isolantes térmicos, verificou-se uma performance energética significativamente superior ao do caso base (CB) de alvenaria, sendo alcançado o nível máximo de eficiência energética para estes arranjos.

Em conformidade ao enunciado acima e ao apresentado no Quadro 46, os casos C2, C4, C6 e C7 obtiveram os melhores valores para os parâmetros avaliativos, sobretudo os dois últimos modelos mencionados, os quais contam com uma maior camada de isolamento térmico e atingiram uma Tomín_{UH} acima dos 15 °C e um $\Delta\text{PHFT}_{\text{UH}}$ superior a 80%.

Quanto aos casos C1, C3 e C5, embora estes não tenham superado os valores da Tomín_{UH} obtida pela referência e pelo modelo de alvenaria, suas grandezas foram suficientes para conquistar uma melhor classificação em comparação ao CB de *wood frame* e a referência, elevando da classe E para a C de eficiência energética.

Quadro 46 – Resultados do desempenho energético dos diferentes painéis de *wood frame* para a cidade de Curitiba.

(continua)

Casos	Tomáx_{UH} (°C)	Tomín_{UH} (°C)	PHFT_{UH} (%)	CgTT_{UH} (kWh)	Etiqueta da Envoltória
Referência	30,5	13,7	73,66	1161	D
CB alvenaria	29,2	14,0	73,05%	906	C
CB <i>wood frame</i>	29,5	12,3	67,25%	888	E
C1	29,8	12,8	69,35%	799	C
C2	29,1	14,5	77,57%	474	A
C3	29,3	13,6	73,29%	621	C

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

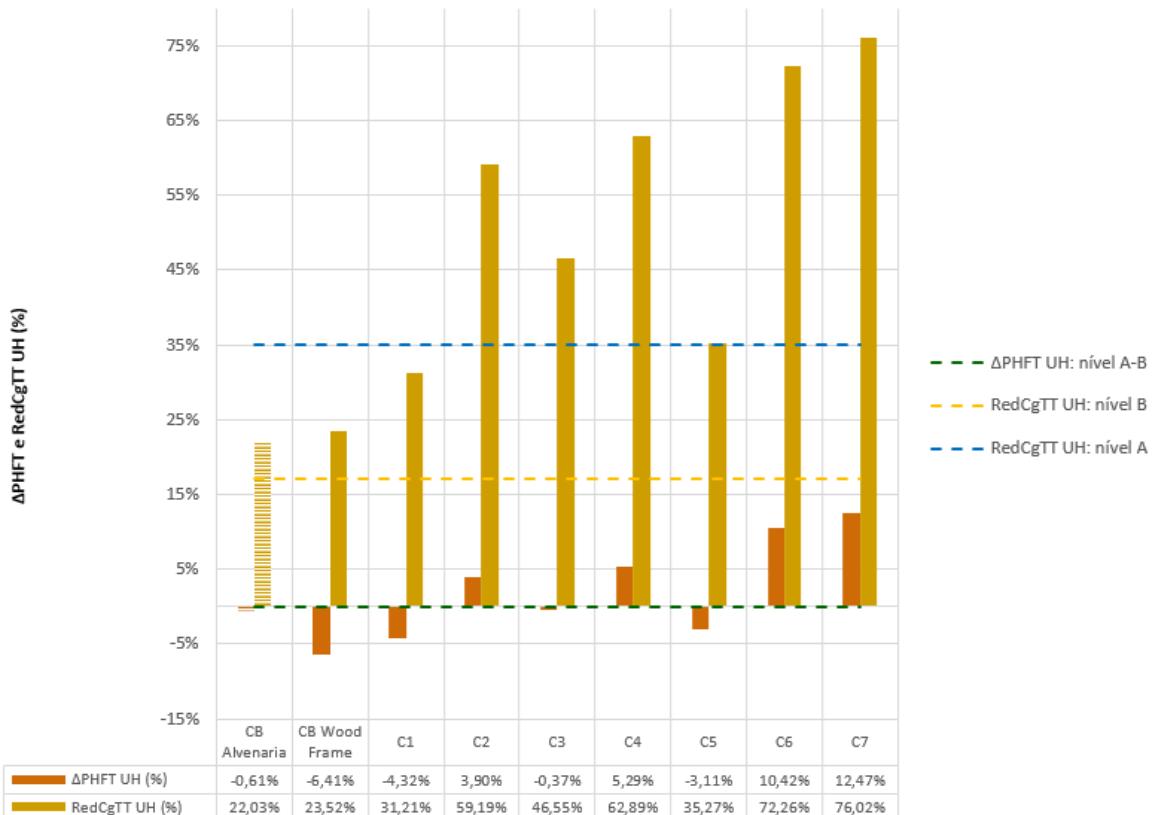
Quadro 46 – Resultados do desempenho energético dos diferentes painéis de *wood frame* para a cidade de Curitiba.

(conclusão)					
C4	29,3	14,7	78,95%	431	A
C5	29,3	13,0	70,56%	752	C
C6	29,0	15,5	84,08%	322	A
C7	28,9	15,8	86,13%	278	A

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Apesar de conquistarem resultados gerais mais satisfatórios quando comparados a referência, observou-se que os casos C1, C3 e C5 não alcançaram valores mais elevados de PHFT em relação a respectiva, porém, notou-se que os mesmos tiveram seus PHFT superiores ao do CB em *wood frame*. Especificamente para o caso C3 - composto por revestimento externo em *sidings* de madeira e com maior resistência térmica que os outros dois casos mencionados -, percebeu-se um percentual de horas dentro das faixas das temperaturas operativas ligeiramente superior ao do modelo de alvenaria. A Figura 63 mostra os resultados do $\Delta\text{PHFT}_{\text{UH}}$ e da $\text{RedCgTT}_{\text{UH}}$ para cada novo caso simulado e os compara com os valores que foram obtidos anteriormente para os casos bases.

Figura 63 – Desempenho energético dos modelos construtivos analisados para o clima de Curitiba.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Através do gráfico ilustrado na referida figura, é possível verificar que diferente do observado para o parâmetro avaliativo do PHFT, todas as configurações de painéis em estrutura leve de madeira atingiram uma maior redução no consumo de CgTT_{UH} quando equiparadas ao modelo de referência e ao de alvenaria convencional. O arranjo C7 foi o que apresentou os valores mais expressivos, contando com um $\Delta\text{PHFT}_{\text{UH}}$ de 12,47% e uma RedCgTT_{UH} de 76,02% em relação a referência e, uma diferença de 15,18% no PHFT e RedCgTT_{UH} equivalente a 69,31% quando comparado a UH de alvenaria.

Também é possível perceber que, nos demais casos em que há associação de isolantes térmicos nos painéis das paredes, os resultados do PHFT e da RedCgTT_{UH} foram consideravelmente superiores em relação aos que não contaram com tal tecnologia.

Diante do exposto e de acordo com as opções simuladas, é possível dizer que, para a cidade de Curitiba, a adoção de isolantes térmicos nos painéis de *wood frame* foram fundamentais para compensar a baixa capacidade térmica do sistema de estrutura leve de madeira. Essa melhoria deve-se à redução da transmitância térmica proporcionada pelos isolantes quando introduzidos aos envelopes de *wood frame*, que permitiu retardar a perda de calor do interior da UH durante o inverno e os ganhos de calor durante os períodos do verão.

4.2.2 Zona Bioclimática 2

Para a ZB2, representada pela cidade de Pelotas (Intervalo 1), todos os casos de *wood frame* apresentaram melhor desempenho energético geral quando comparados aos modelos de referência e de alvenaria, porém, somente os casos C6 e C7 alcançaram melhor classificação em suas etiquetas do que as atingidas anteriormente pelos CBs.

Neste contexto, conforme apresentado no Quadro 47, observa-se que os modelos com maior camada isolante conseguiram atingir novamente uma melhor performance termoenergética, sobretudo quando comparados aos modelos desprovidos de tais elementos.

Para o caso C7, as Tomáx_{UH} e Tomín_{UH} foram de 33,2 °C e 13,7 °C, respectivamente, enquanto o PHFT_{UH} equivaleu a 72,74% e a RedCgTT_{UH} foi de 1559 kWh. Esta configuração apresentou os melhores resultados em termos de eficiência energética. Em sequência, o caso C6 registrou Tomáx_{UH} e Tomín_{UH} de 33,4 °C e 13,5 °C,

respectivamente, com PHFT_{UH} de 71,95% e $\text{RedCgTT}_{\text{UH}}$ de 1602 kWh, sendo o segundo melhor arranjo em desempenho energético. Estes casos foram os únicos a obter nível B na performance termoenergética da envoltória.

Quadro 47 – Resultados do desempenho energético dos diferentes painéis de *wood frame* para a cidade de Pelotas.

Casos	Tomáx_{UH} (°C)	Tomín_{UH} (°C)	PHFT_{UH} (%)	CgTT_{UH} (kWh)	Etiqueta da Envoltória
Referência	34,8	10,3	61,11%	3324	D
CB alvenaria	33,3	10,4	61,47%	2578	C
CB <i>wood frame</i>	34,5	10,1	63,26%	2070	C
C1	34,2	10,5	64,38%	1998	C
C2	33,5	12,3	68,56%	1711	C
C3	33,9	11,5	66,42%	1856	C
C4	33,8	12,7	69,35%	1672	C
C5	33,9	10,8	64,89%	1959	C
C6	33,4	13,5	71,95%	1602	B
C7	33,2	13,7	72,74%	1559	B

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

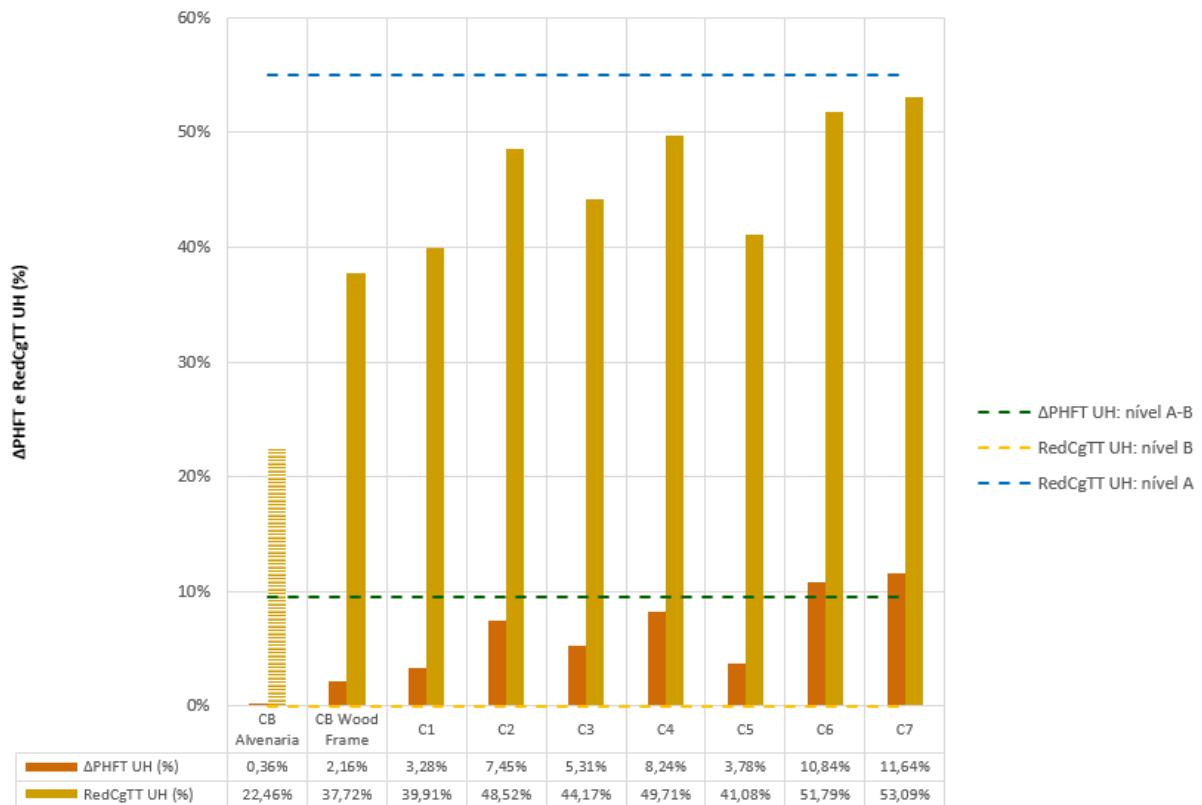
Comparando os resultados obtidos para os parâmetros avaliativos mostrados na Figura 64, nota-se que os valores da RedCgTT e do PHFT nas UH de *wood frame*, em relação a de alvenaria, apresentaram uma variação mínima de 15,26% e 1,80%, respectivamente.

Estas diferenças referem-se aos valores obtidos para o arranjo do CB de estrutura leve de madeira, o qual demonstrou os menores índices de eficiência energética dentre as configurações de *wood frame* avaliadas. Em particular, o PHFT do respectivo CB alcançou uma diferença de 9,48% em comparação ao caso C7, que registrou uma redução no consumo de CgTT_{UH} equivalente a 15,37% quando equiparado ao CB de *wood frame*.

Ademais, assim como o verificado para a ZB1, dentre os novos casos propostos o C1, C3 e C5 foram os que apresentaram os piores resultados na variação do PHFT_{UH} e na $\text{RedCgTT}_{\text{UH}}$ para o clima de Pelotas. Entretanto, desta vez todos os casos de *wood frame* alcançaram um PHFT_{UH} superior ao da alvenaria e da referência, embora somente os casos 6 e 7 tenham atingidos níveis mais altos na escala classificatória das etiquetas, pois seus incrementos em quantidade de horas operativas dentro das faixas de temperaturas estabelecidas para o Intervalo 1 superaram em mais de 9,56% o PHFT da UH de referência.

Quanto a RedCgTT_{UH}, apesar dos modelos C2, C4, C6 e C7 terem novamente obtido melhores resultados em comparação aos arranjos sem isolantes térmicos, percebeu-se uma menor diferença na redução da CgTT_{UH} entre os casos de *wood frame* analisados. Enquanto a RedCgTT_{UH} dos casos CB, C1, C3 e C5 foi maior em relação a observada anteriormente para a cidade de Curitiba, houve um maior consumo de CgTT_{UH} nos arranjos com isolantes térmicos para o clima de Pelotas, o que impediu que os modelos C6 e C7 sejam classificados com o nível A de eficiência energética.

Figura 64 – Desempenho energético dos modelos construtivos analisados para o clima de Pelotas.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Desta forma, nota-se que os resultados dos parâmetros avaliativos apresentaram valores menos discrepantes entre os casos analisados. Isso pode ser atribuído à elevada amplitude térmica de Pelotas, que registra temperatura máxima quase 6 °C superior à de Curitiba, enquanto as temperaturas mínimas são bastante semelhantes entre as duas cidades, conforme já indicado na Tabela 3 do capítulo anterior.

Essa condição resultou em um aumento geral no consumo da CgTR_{UH}, com valores desse índice mostrando-se muito similares entre os envelopes de *wood frame*, que apresentaram uma variação máxima de apenas 63,21 kWh. Em contrapartida, também houve um aumento geral no consumo de CgTA_{UH}, o qual, apesar de menos

expressivo do que o aumento do CgTR, exibiu diferenças relevantes entre os casos analisados. Comparando os modelos de *wood frame*, a variação máxima de CgTA_{UH} foi de 554,95 kWh, sendo que os envelopes com isolantes térmicos tiveram um desempenho superior nesse parâmetro. Quando equiparados ao caso de alvenaria a diferença foi ainda mais expressiva, atingindo um consumo da CgTA_{UH} de 674,93 kWh a mais que o caso C7.

Este desempenho superior dos modelos de *wood frame* também se estendeu ao PHFT_{UH}, sendo que, novamente os casos que tiveram isolantes térmicos associados em sua estrutura obtiveram melhores resultados, visto que, foram capazes de conservar por um maior período as temperaturas internas da UH, dificultando a entrada de calor durante o verão e mitigando suas perdas no inverno.

Assim, o sistema em estrutura leve de madeira revelou-se mais vantajoso que o de alvenaria para o clima de Pelotas (ZB2), principalmente nos casos em que foi adicionado isolantes térmicos nos painéis da envoltória da UH.

4.2.3 Zona Bioclimática 3

Os resultados das novas simulações termoenergéticas realizadas para o clima da cidade de São Paulo (ZB3 e Intervalo 1) mantiveram em sua totalidade a classificação máxima de desempenho energético. Os valores dos parâmetros avaliativos apresentaram-se sempre superiores aos da edificação de referência e, em geral, os melhores casos analisados para esta cidade foram o C7 e o C2, os quais incorporaram paredes com isolamento térmico.

Para o primeiro caso mencionado, as Tomáx e Tomín, bem como a CgTT_{UH} foram os parâmetros que atingiram melhores resultados, sendo estes, respectivamente, 29,9 °C e 17,6 °C, e 355 kWh. Já o C2 apresentou um PHFT_{UH} de 91,34 %, superior ao caso C7 em 0,75%.

O Quadro 48 demonstra os resultados obtidos para a cidade de São Paulo, sendo possível verificar mais uma vez valores mais satisfatórios para os arranjos que incluíram isolantes térmicos em suas composições.

Quadro 48 – Resultados do desempenho energético dos diferentes painéis de *wood frame* para a cidade de São Paulo.

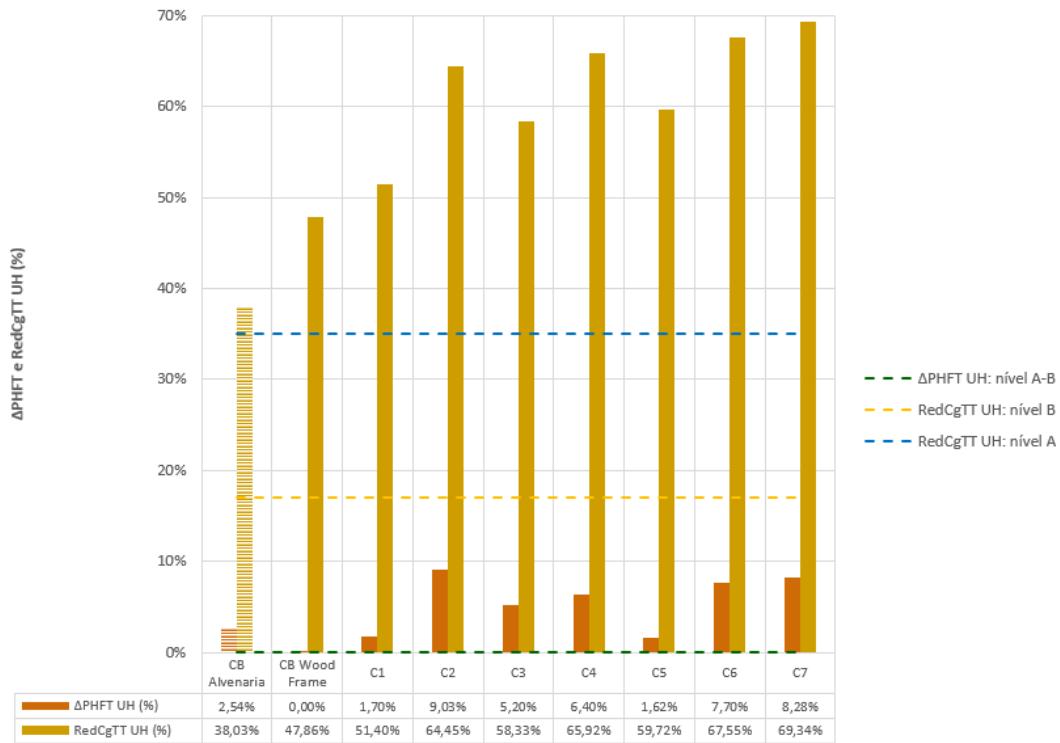
Casos	Tomáx _{UH} (°C)	Tomín _{UH} (°C)	PHFT _{UH} (%)	CgTT _{UH} (kWh)	Etiqueta da Envoltória
Referência	31,7	14,9	82,31%	1158	D
CB alvenaria	30,2	15,0	84,85%	717	A
CB <i>wood frame</i>	30,9	14,9	82,31%	604	A
C1	30,7	15,2	84,01%	563	A
C2	30,3	16,6	91,34%	412	A
C3	30,6	15,9	87,51%	482	A
C4	30,6	16,9	88,71%	395	A
C5	30,6	15,5	83,93%	466	A
C6	30,1	17,5	90,01%	376	A
C7	29,9	17,6	90,59%	355	A

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Quando analisado o gráfico comparativo da Figura 65, pode-se observar que os valores do critério do $\Delta\text{PHFT}_{\text{UH}}$ apresentam-se inferiores em alguns casos quando comparados à alvenaria, devido, principalmente, a baixa capacidade térmica de alguns envelopes de *wood frame*, como nos casos C1, C5 e CB.

O melhor caso analisado neste critério (C2) apresentou um incremento no PHFT da UH de 9,03% em relação à referência. Ao verificar as reduções das cargas térmicas, nota-se que mesmo todos os casos avaliados alcançando a classe A de eficiência energética, os modelos em *wood frame* continuam apresentando resultados mais expressivos que o caso de alvenaria.

Figura 65 – Desempenho energético dos modelos construtivos analisados para o clima de São Paulo.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Como pode ser verificado no gráfico acima, a maior RedCgTT_{UH} foi observada para o C7, cujo valor foi de 69,37%. O C6 fica na segunda posição neste quesito, com valor de 67,55%, e o C4 na terceira posição, com 65,92% de redução na CgTT_{UH}, justificando que os melhores resultados se mantêm relacionados à menor transmitância térmica nos painéis de vedação verticais.

Portanto, é possível constatar que o sistema construtivo em *wood frame* apresenta um excelente potencial em termos de eficiência energética para o clima da cidade de São Paulo (ZB3), se sobressaindo ao desempenho da alvenaria convencional quando incluído isolantes térmicos nos painéis das paredes em estrutura leve de madeira.

4.2.4 Zona Bioclimática 4

Para a ZB4, representada pela cidade de Brasília, todos os novos casos simulados atingiram selo nível A de desempenho energético, igualmente ao verificado para a cidade de São Paulo (ZB3). No entanto, percebeu-se uma maior uniformidade nos resultados dos diferentes casos avaliados, sendo que o caso C7 obteve melhores resultados quanto as Tomáx e Tomín, com 31,1 °C e 18,7 °C, respectivamente, enquanto o caso C5 destacou-se com o maior PHFT_{UH}, equivalente a 91,42%, e menor

$CgTT_{UH}$, igual a 667 kWh. O Quadro 49 apresenta os resultados obtidos para os novos casos simulados.

Quadro 49 – Resultados do desempenho energético dos diferentes painéis de *wood frame* para a cidade de Brasília.

Casos	$Tomá_{UH}$ (°C)	$Tomí_{UH}$ (°C)	$PHFT_{UH}$ (%)	$CgTT_{UH}$ (kWh)	Etiqueta da Envoltória
Referência	31,9	18,3	84,80%	1494	D
CB alvenaria	30,5	18,3	90,63%	772	A
CB <i>wood frame</i>	31,6	17,4	91,26%	663	A
C1	31,4	17,7	91,39%	671	A
C2	31,3	18,2	91,11%	683	A
C3	31,5	18,2	91,19%	690	A
C4	31,6	18,3	90,98%	704	A
C5	31,3	17,9	91,42%	667	A
C6	31,2	18,5	90,83%	710	A
C7	31,1	18,7	90,95%	689	A

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

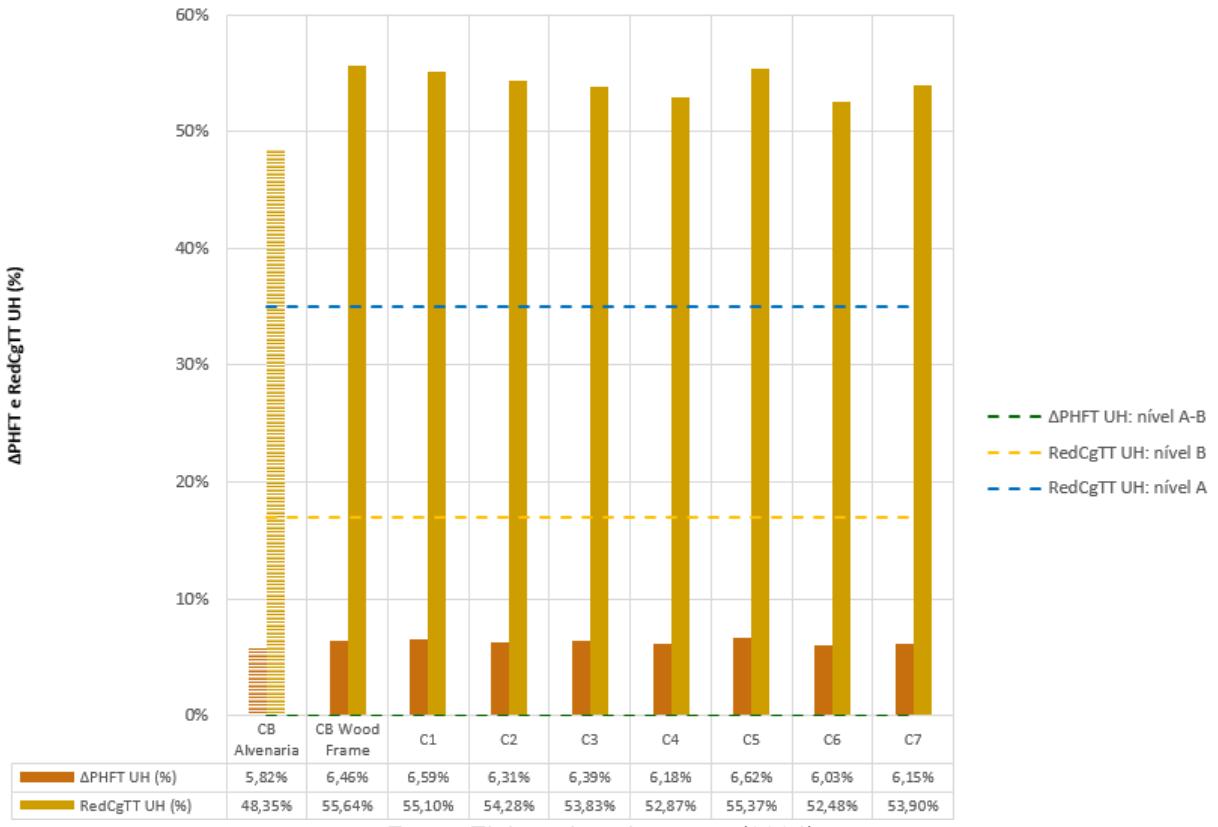
A menor variação nos resultados também pode ser notada entre os valores obtidos para os diferentes envelopes de *wood frame* e o modelo de alvenaria convencional. Apesar disso, para o clima da cidade de Brasília, todos os arranjos em *wood frame* apresentaram resultados do $\Delta PHFT_{UH}$ ligeiramente superiores ao da UH de alvenaria, como pode ser observado na Figura 66.

Para o parâmetro avaliativo referente ao $PHFT_{UH}$, o caso C5 obteve os melhores resultados, com uma diferença de 6,62% em relação a referência e 0,80% em comparação com a alvenaria, seguido do caso C1, que obteve 6,59% e 0,77% de $PHFT$ a mais que a referência e a alvenaria, respectivamente.

Quanto a $RedCgTT_{UH}$, o CB em *wood frame* apresentou o menor consumo, com uma redução na $CgTT_{UH}$ de 55,64% quando equiparado a referência e, de 7,29% em relação a alvenaria. O C5 fica logo atrás nos resultados devido a apresentar valores muito semelhantes, correspondendo a 55,37% e 7,02%, respectivamente.

Deste modo, é possível perceber de maneira geral que, os painéis de *wood frame* que não contam com isolantes térmicos em sua estrutura apresentaram resultados levemente superiores aos que possuem tais elementos em suas configurações.

Figura 66 – Desempenho energético dos modelos construtivos analisados para o clima de Brasília.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Com base nos resultados expostos, pode-se notar que os valores obtidos para os arranjos em *wood frame* se apresentam mais vantajosos em desempenho energético quando equiparados ao modelo de alvenaria.

Entretanto, diferente do verificado para as ZB 1 a 3, os modelos de estrutura leve de madeira que não dispõem de isolantes térmicos em suas envoltórias apresentaram resultados gerais um pouco mais satisfatórios para a ZB4, representada pela cidade de Brasília.

Isso pode ser relacionado ao clima mais ameno registrado na cidade, a qual teve temperatura mínima equivalente a 11,2 °C, reduzindo assim a frequência com que é necessário conservar o calor no interior da UH.

Em contrapartida, com temperatura máxima de 32,7 °C, esse clima por vezes torna vantajosa a maior taxa de transferência de calor do interior para o exterior da UH, o que é proporcionado de forma mais eficaz pelos arranjos em *wood frame* com maior transmitância térmica nas paredes da envoltória, ou seja, aqueles que não contam com isolantes térmicos.

4.2.5 Zona Bioclimática 5

Na ZB5, caracterizada nas simulações por meio do arquivo climático da cidade de Joinville (Intervalo 1), todos os modelos de *wood frame* analisados apresentaram resultados mais satisfatórios de eficiência energética quando comparados a UH de alvenaria e a de referência, superando as etiquetas obtidas pelas mesmas. Em geral, os valores dos parâmetros avaliativos dos novos casos analisados demonstraram pouca diferença entre si, sendo que, o modelo C7 - com maior espessura de isolante -, atingiu a melhor temperatura para a Tomáx_{UH}, com 34,3 °C.

Entretanto, para os índices do PHFT_{UH} e do consumo de CgTT_{UH} os arranjos C1 e C5, ambos sem isolamento térmico e com menor resistência térmica, ofereceram os melhores resultados. Para o primeiro caso, o PHFT_{UH} foi de 75,68% e a CgTT_{UH} de 2155 kWh, já o C5 apresentou pouca variação quanto aos dois parâmetros citados, contando com um PHFT_{UH} de 75,39% e uma CgTT_{UH} de 2169 kWh. O Quadro 50 indica os resultados obtidos para a cidade de Joinville.

Quadro 50 – Resultados do desempenho energético dos diferentes painéis de *wood frame* para a cidade de Joinville.

Casos	Tomáx _{UH} (°C)	PHFT _{UH} (%)	CgTT _{UH} (kWh)	Etiqueta da Envoltória
Referência	35,5	60,69%	4168	D
CB alvenaria	33,9	65,88%	3042	C
CB <i>wood frame</i>	35,2	75,84%	2133	B
C1	35,0	75,68%	2155	B
C2	34,7	74,26%	2234	B
C3	34,9	74,90%	2212	B
C4	35,0	74,03%	2255	B
C5	34,8	75,39%	2169	B
C6	34,5	71,94%	2360	B
C7	34,3	71,32%	2370	B

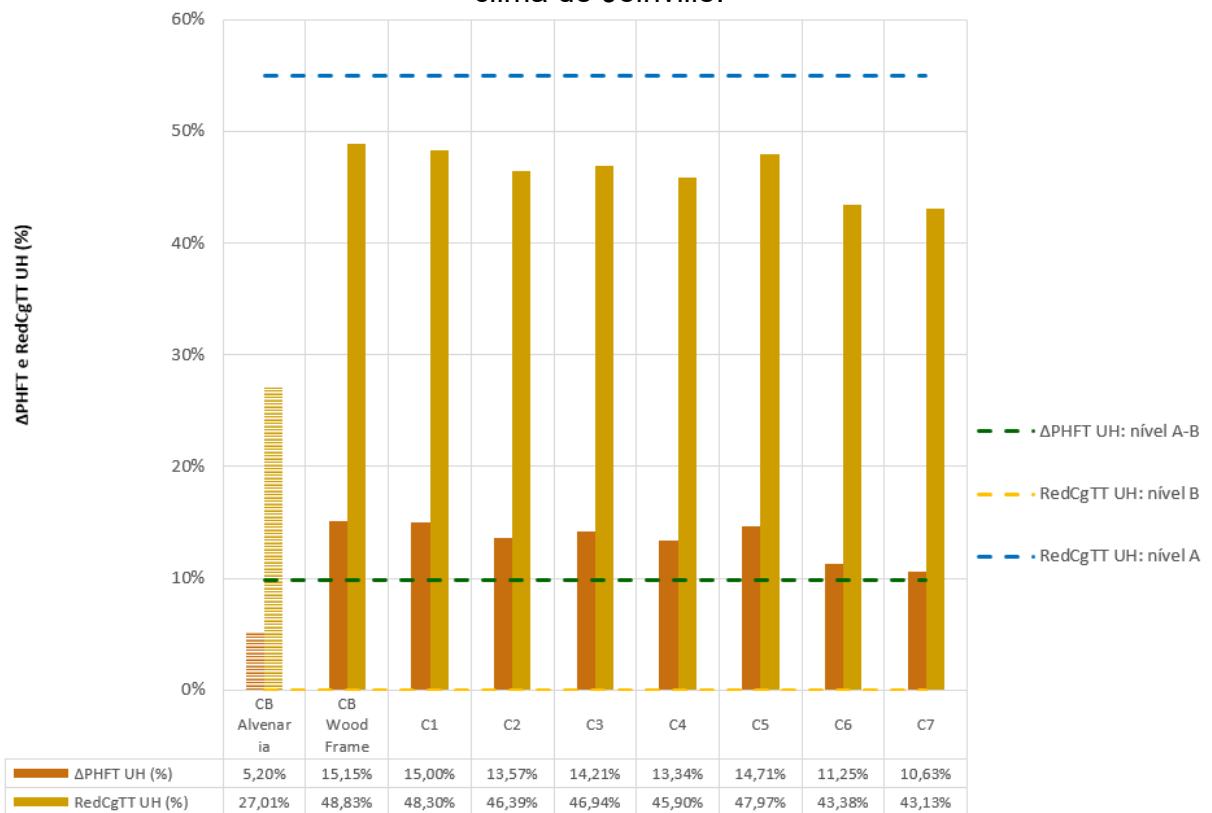
Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Quando comparados os resultados do $\Delta\text{PHFT}_{\text{UH}}$ e da $\text{RedCgTT}_{\text{UH}}$ entre os novos casos propostos e os casos bases, nota-se que os modelos em estrutura leve de madeira apresentam significativas diferenças em relação ao CB de alvenaria. Conforme pode ser visualizado na Figura 67, o CB de *wood frame* e o caso C1 foram os que obtiveram os maiores valores para estes parâmetros avaliativos, contando com um incremento no PHFT_{UH} de 15,15% e 15,00%, respectivamente, contra 5,20% do modelo de alvenaria.

Com relação a CgTT_{UH}, o CB de *wood frame* obteve uma redução no consumo equivalente a 48,83% quando comparado a referência e de quase 22% a mais do que

a alvenaria. O caso C1 alcançou percentuais muito semelhantes, com uma RedCgTT_{UH} de 48,30% em relação a referência e de 21,29% a mais que a UH de alvenaria. No entanto, mesmo apresentando melhores resultados, nenhum dos modelos em *wood frame* alcançou o percentual de 55% na redução da CgTT_{UH}, necessário para obter o nível A de eficiência energética. Assim, todos os arranjos em estrutura leve de madeira foram classificados com nível B de desempenho energético da envoltória.

Figura 67 – Desempenho energético dos modelos construtivos analisados para o clima de Joinville.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Desta forma, evidencia-se o melhor desempenho energético do sistema em *wood frame* em relação ao de alvenaria convencional no clima de Joinville (ZB5), sendo novamente observada uma leve vantagem nos resultados dos arranjos com menor resistência térmica, os quais favorecem as trocas térmicas entre o ambiente interno e externo da UH.

4.2.6 Zona Bioclimática 6

Igualmente a Joinville, os resultados das novas simulações termoenergéticas realizadas para cidade de Campo Grande (ZB6 e Intervalo 1), revelaram resultados

bastante satisfatórios para os envelopes em *wood frame*. Contudo, estes novamente não foram suficientes para obter o nível máximo de eficiência energética da envoltória, recebendo em sua totalidade a etiqueta nível B de desempenho termoenergético da envoltória.

Consoante ao verificado na ZB5, os casos que apresentaram os melhores valores para a Tomáx_{UH} foram os casos C7 e C6, respectivamente, ambos com maior camada isolante. Para o primeiro caso a Tomáx_{UH} foi igual a 33,5 °C, enquanto para o caso C6 foi de 33,7 °C. Os parâmetros avaliativos referentes ao PHFT_{UH} e a CgTT_{UH} também repetiram ao observado na ZB5, com os melhores valores sendo obtidos pelos casos C1 e C5. A diferença entre os dois últimos casos citados novamente foi ínfima, com PHFT_{UH} de 77,38% e CgTT_{UH} de 2042 kWh para o C1 contra um PHFT_{UH} 77,11% e CgTT_{UH} de 2068 kWh para o caso C5. No Quadro 51 pode ser visualizado os resultados dos novos casos simulados.

Quadro 51 – Resultados do desempenho energético dos diferentes painéis de *wood frame* para a cidade de Campo Grande.

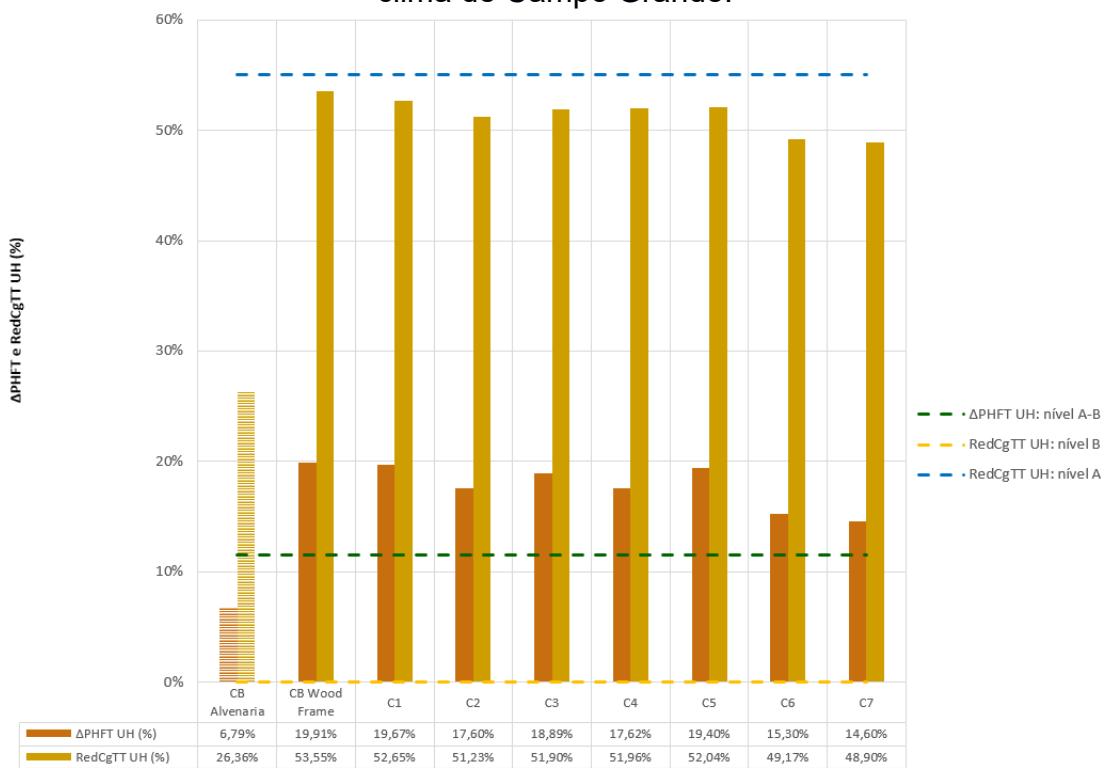
Casos	Tomáx _{UH} (°C)	PHFT _{UH} (%)	CgTT _{UH} (kWh)	Etiqueta da Envoltória
Referência	35,1	57,71%	4313	D
CB alvenaria	33,8	64,50%	3176	C
CB <i>wood frame</i>	34,8	77,62%	2003	B
C1	34,5	77,38%	2042	B
C2	34,0	75,31%	2103	B
C3	34,3	76,60%	2075	B
C4	34,3	75,33%	2072	B
C5	34,3	77,11%	2068	B
C6	33,7	73,01%	2192	B
C7	33,5	72,31%	2204	B

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Comparando-se os valores dos resultados obtidos para os parâmetros avaliativos da Figura 68, nota-se que nas UH de *wood frame* os valores da redução de carga térmica e do incremento no PHFT sempre se mantêm acima da UH de alvenaria, apresentando uma significativa vantagem em relação a mesma. Neste sentido, o CB de *wood frame* seguido do C1 foram os que alcançaram a maior diferença, correspondendo, respectivamente, a um incremento de 27,19% e 26,29% na redução do consumo de CgTT_{UH} quando equiparados ao modelo de alvenaria. Estes dois casos também apresentaram melhor performance quanto ao incremento no PHFT_{UH}, com uma diferença em relação a alvenaria de 13,12% para o CB de *wood frame* e de 12,88% para o caso C1.

As configurações C7 e C6 foram as que obtiveram os piores resultados no $\Delta\text{PHFT}_{\text{UH}}$ e na $\text{RedCgTT}_{\text{UH}}$ dentre os arranjos em estrutura leve de madeira. Para os casos com maior camada isolante e menor transmitância térmica o incremento no PHFT_{UH} , quando comparado a UH de alvenaria, foi de 7,81% para o C7 e de 8,51% para o C6, já a redução da CgTT_{UH} chegou a uma variação de 22,54% e 22,81%, respectivamente.

Figura 68 – Desempenho energético dos modelos construtivos analisados para o clima de Campo Grande.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Portanto, observa-se que em comparação ao caso de alvenaria convencional, todos os modelos em *wood frame* apresentam resultados mais satisfatórios quanto a performance energética da envoltória da UH, o que reforça o potencial de uso deste sistema construtivo para o clima da cidade de Campo Grande.

4.2.7 Zona Bioclimática 7

As novas simulações termoenergéticas conduzidas para o clima de Teresina (ZB7 e Intervalo 3) revelaram resultados mais heterogêneos entre os envelopes de *wood frame* analisados. No entanto, todos os arranjos em estrutura leve de madeira apresentaram valores superiores ao modelo de alvenaria e ao de referência.

Dentre os novos casos propostos, o arranjo C1 foi o único a obter a classe A de desempenho energético, atingindo o melhor resultado quanto ao PHFT, sendo equivalente a 48,41%. Para a quesito da CgTT_{UH} o caso 4 se destacou com o menor consumo, totalizando 4193 kWh. Já o envelope C7 alcançou o melhor resultado para a Tomáx_{UH}, que correspondeu a 35,9 °C, por outro lado, os valores de seu PHFT e da sua CgTT atingiram os valores menos satisfatórios dentre os 7 novos casos avaliados. O Quadro 52 expõe os resultados obtidos.

Quadro 52 – Resultados do desempenho energético dos diferentes painéis de *wood frame* para a cidade de Teresina.

Casos	Tomáx _{UH} (°C)	PHFT _{UH} (%)	CgTT _{UH} (kWh)	Etiqueta da Envoltória
Referência	37,5	6,36%	9696	D
CB alvenaria	35,8	13,13%	7011	C
CB <i>wood frame</i>	37,0	51,32%	4125	A
C1	36,7	48,41%	4243	A
C2	36,3	35,60%	4310	C
C3	36,6	42,87%	4242	C
C4	36,7	34,96%	4193	C
C5	36,6	46,50%	4305	C
C6	36,1	25,64%	4475	C
C7	35,9	22,52%	4509	C

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

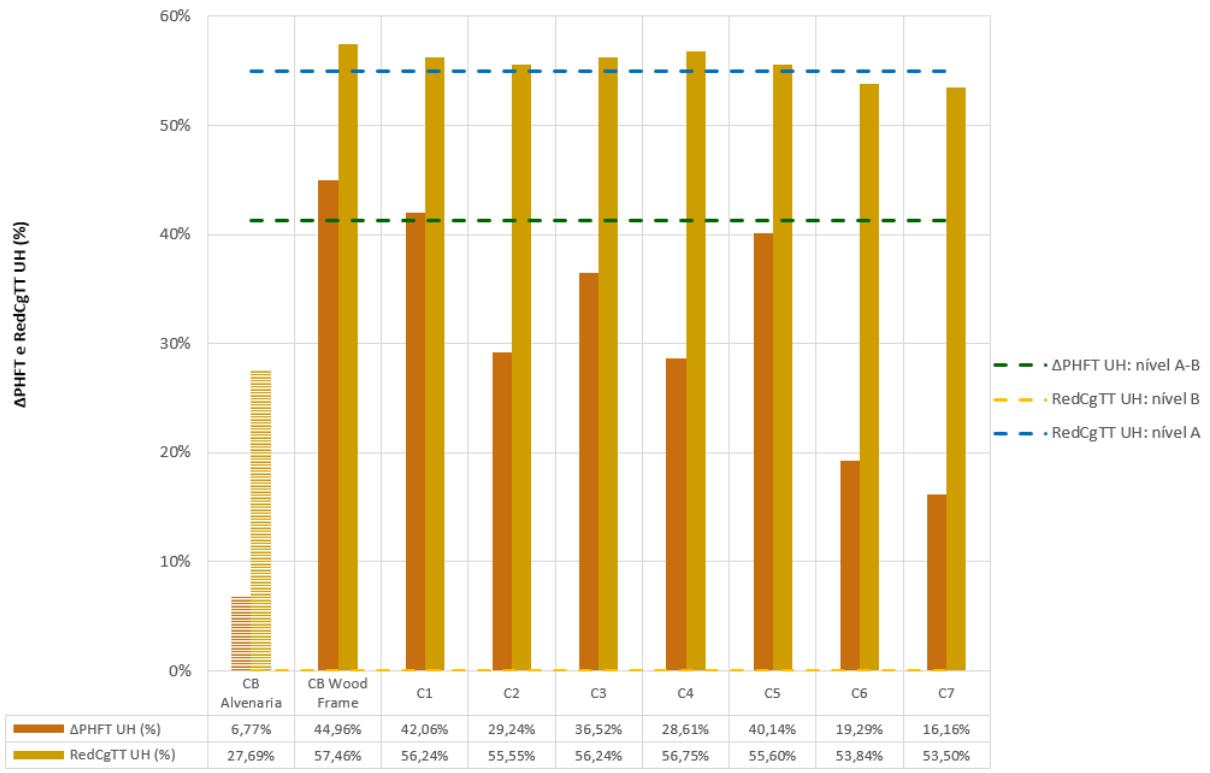
Na Figura 69 é possível identificar os valores dos incrementos do PHFT_{UH} e as reduções de carga térmica total de todos os casos estudados. Percebe-se que todos os arranjos em *wood frame* apresentam valores superiores em relação a RedCgTT_{UH}, sendo que os casos C1 a C5, bem como o CB alcançaram uma redução da CgTT_{UH} superior a 55% em comparação a referência, obtendo etiqueta nível A para este parâmetro avaliativo.

Ao verificar o desempenho dos envelopes quanto ao Δ PHFT_{UH}, observa-se que novamente os casos em estrutura leve de madeira se sobressaem ao modelo de alvenaria. Contudo, para este índice de avaliação, somente o CB em *wood frame* e o arranjo C1 foram capazes de atingir as classes mais altas de eficiência energética. Nota-se ainda que, dentre os envelopes de *wood frame* analisados os casos C7, C6, C4 e C2 foram os que obtiveram os valores mais baixos do PHFT_{UH}, respectivamente.

Este cenário indica que, embora de maneira geral as configurações que associaram isolantes térmicos em suas composições tenham promovido uma temperatura máxima menos elevada na UH, a redução na taxa de transferência de calor também diminuiu os períodos com temperaturas operativas dentro do intervalo 3. Isso pode

ser justificado devido a menor taxa de transferência de calor manter por um maior tempo as elevadas temperaturas nos APPs, visto que, a maior resistência térmica oferecida pelos isolantes serve de barreira para a dissipação do calor para o lado externo da UH.

Figura 69 – Desempenho energético dos modelos construtivos analisados para o clima de Teresina.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Com base nos resultados expostos, verifica-se que no tocante ao desempenho energético os envelopes em estrutura leve de madeira se destacam pela sua melhor performance em relação a alvenaria convencional, sobretudo os casos que contam com maior transmitância térmica envolvendo os seus arranjos.

4.2.8 Zona Bioclimática 8

Para as cidades selecionadas para representar a ZB8, os novos casos simulados mostraram de modo geral melhor desempenho energético para os envelopes em *wood frame* sem isolantes térmicos em suas configurações. No Rio de Janeiro e em Fortaleza, os referidos modelos alcançaram classificações de eficiência energética superiores às da UH de alvenaria. A seguir são detalhados os resultados da ZB8.

4.2.8.1 Rio de Janeiro

Semelhante ao observado na ZB7, para o clima da cidade do Rio de Janeiro (Intervalo 1), o envelope C7 alcançou a melhor performance para a Tomáx_{UH} e valores menos satisfatórios para o PHFT_{UH} e para o consumo da CgTT_{UH}, com resultados de 35,4 °C, 61,98% e 2757 kWh, respectivamente. Os arranjos C1 e C5 foram os que apresentaram maior eficiência para os parâmetros do PHFT_{UH} e da CgTT_{UH}. Para o primeiro caso, foi atingido um PHFT de 70,12% e demandada uma CgTT de 2466 kWh, enquanto o caso C5, com valores bastante similares ao C1, obteve um PHFT equivalente a 69,52% e um consumo de carga térmica total de 2500 kWh. O Quadro 53 apresenta os resultados obtidos para os novos casos simulados.

Quadro 53 – Resultados do desempenho energético dos diferentes painéis de *wood frame* para a cidade do Rio de Janeiro.

Casos	Tomáx _{UH} (°C)	PHFT _{UH} (%)	CgTT _{UH} (kWh)	Etiqueta da Envoltória
Referência	35,7	55,03%	4359	D
CB alvenaria	33,7	71,21%	2900	C
CB wood frame	36,3	64,12%	2402	B
C1	36,1	70,12%	2466	B
C2	35,8	66,11%	2599	C
C3	36,0	68,29%	2535	B
C4	36,0	65,61%	2589	C
C5	36,0	69,52%	2500	B
C6	35,5	62,79%	2736	C
C7	35,4	61,98%	2757	C

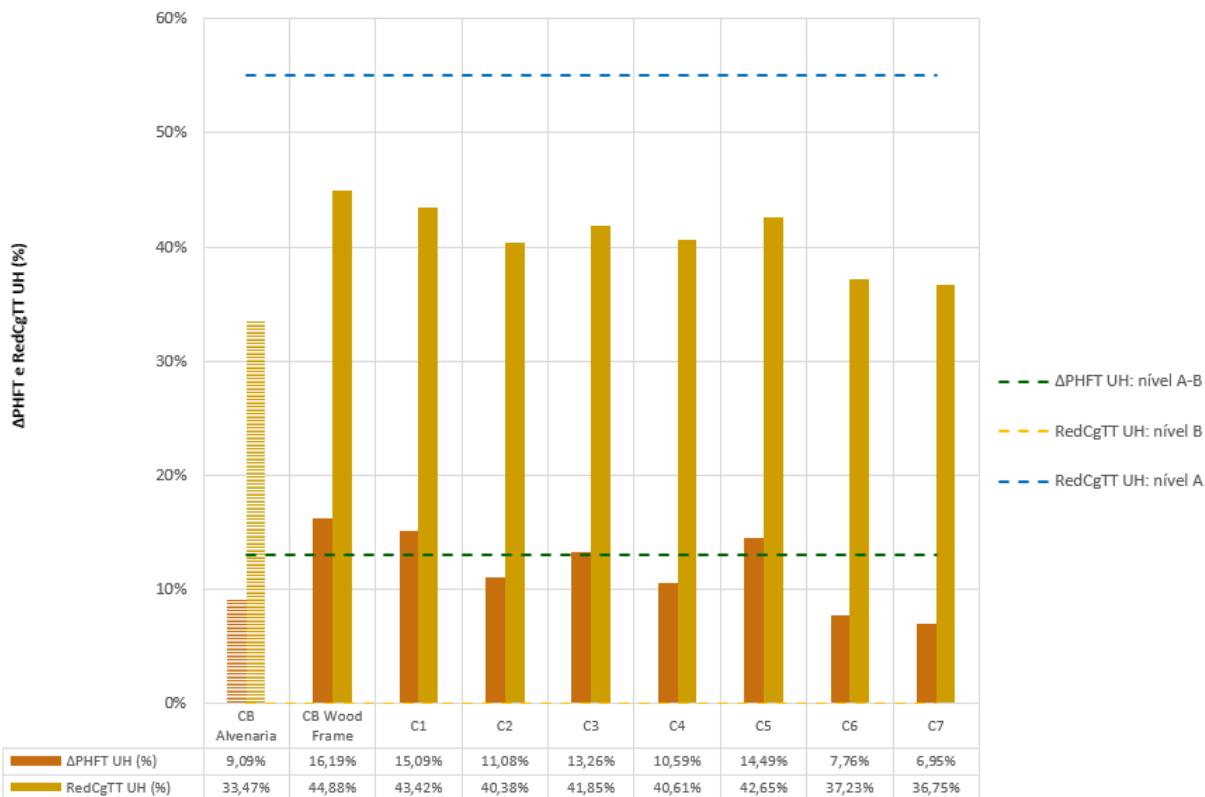
Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Quando analisado o gráfico comparativo da Figura 70, pode-se observar que os valores do critério do $\Delta\text{PHFT}_{\text{UH}}$ apresentam-se inferiores para os casos C6 e C7 quando comparados à alvenaria, o que pode ser justificado pela menor transmitância térmica destes arranjos, conforme já explanado anteriormente. O CB de *wood frame*, seguido dos casos C1, C5 e C3 foram os melhores avaliados neste critério, atingindo um incremento suficiente para classifica-los em etiquetas superiores de eficiência energética.

Com relação a CgTT_{UH}, o CB de *wood frame* obteve uma redução no consumo equivalente a 44,88% quando comparado a referência e de 11,41% a mais do que a alvenaria. O caso C1 alcançou percentuais muito semelhantes, com uma RedCgTT_{UH} de 43,42% em relação a referência e de 9,95% a mais que a UH de alvenaria, sendo

os dois arranjos com melhores resultados para este quesito. No entanto, mesmo apresentando valores superiores, nenhum dos modelos em *wood frame* alcançou o percentual de 55% na redução da $CgTT_{UH}$, necessário para obter o nível A de eficiência energética. Com isso, os arranjos C1, C3 e C5, além do CB de *wood frame* foram classificados com etiqueta B de desempenho energético da envoltória.

Figura 70 – Desempenho energético dos modelos construtivos analisados para o clima do Rio de Janeiro.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Deste modo, para a cidade do Rio de Janeiro (ZB8), constata-se que as UH em *wood frame* apresentam de forma geral resultados termoenergéticos superiores ao do modelo de alvenaria. Especificamente para os casos com maior camada isolante (C6 e C7), observou-se uma performance energética mais semelhante ao da alvenaria, revelando mais uma vez vantagens em termos de eficiência energética para os modelos em estrutura leve de madeira providos de menor resistência térmica em seus arranjos.

4.2.8.2 Fortaleza

Na cidade de Fortaleza (Intervalo 2), os resultados das UH de *wood frame* demonstraram um melhor desempenho energético em relação aos da UH de alvenaria

e a de referência. Entretanto, embora tenha sido verificada uma maior disparidade dos parâmetros avaliativos entre os modelos reais, os valores obtidos pelos novos casos propostos não foram suficientes para atingir a etiqueta máxima de eficiência energética.

Para o presente clima analisado, observou-se que o caso C7 alcançou novamente a melhor Tomáx_{UH} e repetiu resultados inferiores para o PHFT_{UH} e para o consumo da CgTT_{UH}. Referente a temperatura máxima no interior da UH, o referido caso atingiu 33,8 °C, enquanto para os outros dois quesitos foi obtido valores de 39,44% e 5341 kWh, respectivamente. Igualmente, os arranjos C1 e C5 foram os que apresentaram melhor desempenho para os parâmetros do PHFT_{UH} e da CgTT_{UH} dentre os novos casos propostos. Para o C1, verificou-se um PHFT de 61,11% e um consumo da CgTT de 4295 kWh, já o caso C5, obteve um PHFT igual a 59,81% e um consumo de carga térmica total de 4394 kWh. No Quadro 54 pode ser visualizado os resultados alcançados para os novos casos simulados.

Quadro 54 – Resultados do desempenho energético dos diferentes painéis de *wood frame* para a cidade de Fortaleza.

Casos	Tomáx _{UH} (°C)	PHFT _{UH} (%)	CgTT _{UH} (kWh)	Etiqueta da Envoltória
Referência	34,0	20,60%	9031	D
CB alvenaria	32,0	39,69%	6057	C
CB <i>wood frame</i>	34,1	62,79%	4153	B
C1	33,9	61,11%	4292	B
C2	33,9	50,61%	4813	C
C3	34,0	55,73%	4581	B
C4	34,1	49,22%	4789	C
C5	33,9	59,81%	4394	B
C6	33,9	42,00%	5223	C
C7	33,8	39,44%	5341	C

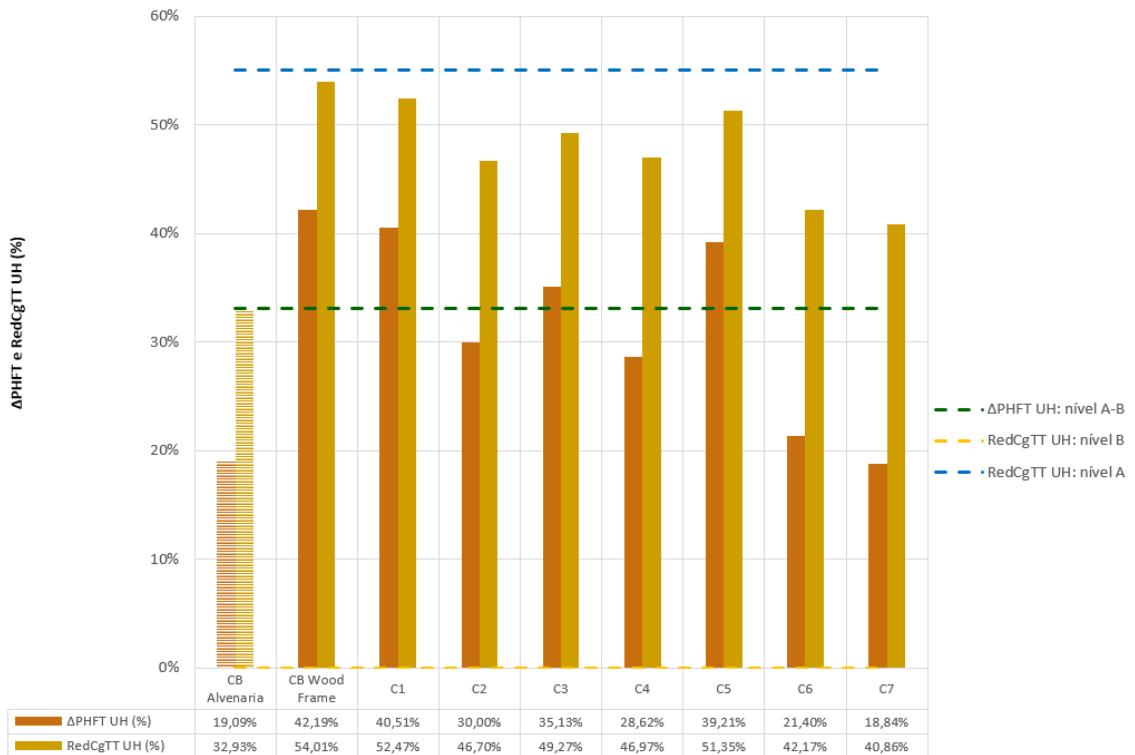
Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Conforme indicado na Figura 71, para o $\Delta\text{PHFT}_{\text{UH}}$ somente o caso C7 atingiu um incremento inferior ao do modelo de alvenaria, com uma variação de apenas 0,25% a menos para o arranjo em *wood frame*. Por outro lado, os casos C1, C3 e C5, juntamente ao CB de *wood frame*, demonstraram diferenças expressivas, com variação de pelo menos 16,04% em relação à UH de alvenaria, resultando em classificações de eficiência energética superiores para os arranjos mencionados.

Quanto à RedCgTT_{UH}, todos os casos em estrutura leve de madeira superaram com ampla diferença a redução da CgTT_{UH} obtida pelo modelo de alvenaria, porém, nenhuma das configurações conseguiu alcançar o nível máximo de desempenho para

este parâmetro avaliativo. Assim, os arranjos C1, C3 e C5, além do CB de *wood frame*, foram classificados com selo nível B.

Figura 71 – Desempenho energético dos modelos construtivos analisados para o clima de Fortaleza.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Com base no exposto, pode-se verificar que os casos em *wood frame* apresentam melhor desempenho energético geral do que a UH de alvenaria, reforçando o potencial de uso do sistema em estrutura leve de madeira para o clima da cidade de Fortaleza. Além disso, convém salientar que, as configurações com maior transmitância térmica em seus arranjos novamente se destacaram em termos energéticos diante dos demais casos.

4.2.8.3 Manaus

As novas simulações realizadas para o clima da cidade de Manaus (Intervalo 3) revelaram um desempenho menos satisfatório dos envelopes em *wood frame*, obtendo em sua totalidade o nível C de eficiência energética. Apesar de alcançaram a mesma etiqueta que a UH de alvenaria, os arranjos em estrutura leve de madeira apresentaram uma melhor performance energética em comparação a mesma, exceto o caso C7, conforme exposto a seguir.

Referente ao sétimo caso analisado, o mesmo seguiu obtendo um resultado superior para a Tomáx_{UH} e valores inferiores para os outros dois parâmetros avaliativos. O caso com maior camada isolante atingiu uma temperatura interna máxima de 36,7 °C, com um PHFT_{UH} de 13,29% e uma CgTT_{UH} de 4176 kWh. Os melhores valores para o PHFT_{UH} e a CgTT_{UH} voltaram a ser alcançados pelos casos C1 e C5 dentre os novos casos analisados, ambos contando com maior transmitância térmica nos painéis da envoltória da UH. O primeiro caso apresentou um PHFT_{UH} de 39,40% e uma CgTT_{UH} de 3622 kWh, enquanto o caso C5 obteve um PHFT_{UH} de 37,22% e uma CgTT_{UH} de 3706 kWh, conforme indicado no Quadro 55.

Quadro 55 – Resultados do desempenho energético dos diferentes painéis de *wood frame* para a cidade de Manaus.

Casos	Tomáx _{UH} (°C)	PHFT _{UH} (%)	CgTT _{UH} (kWh)	Etiqueta da Envoltória
Referência	36,5	6,44%	7866	D
CB alvenaria	34,9	15,09%	4467	C
CB <i>wood frame</i>	37,1	42,71%	3460	C
C1	36,9	39,40%	3622	C
C2	36,8	24,72%	3821	C
C3	36,9	32,09%	3742	C
C4	37,1	23,16%	3761	C
C5	36,8	37,22%	3706	C
C6	36,8	15,44%	4110	C
C7	36,7	13,29%	4176	C

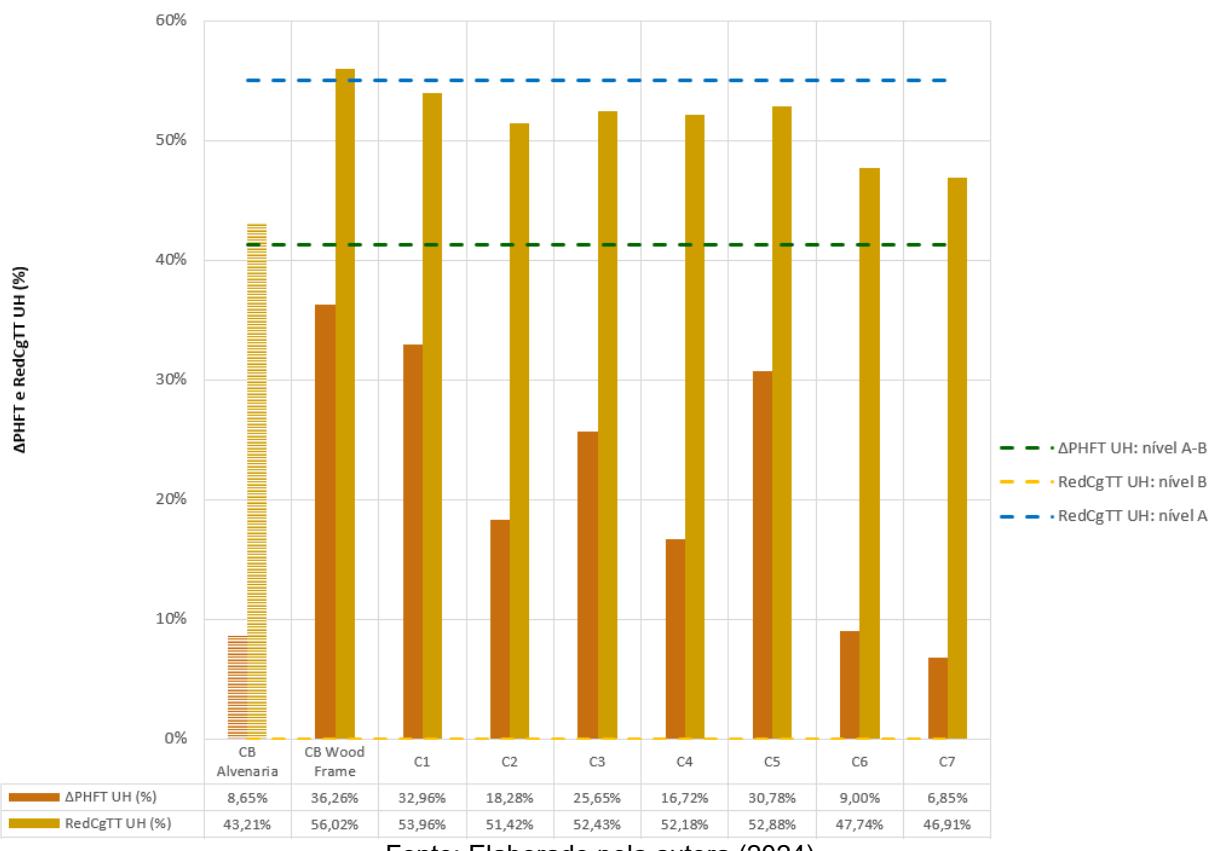
Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Na Figura 72 é possível identificar os valores dos incrementos do PHFT_{UH} e as reduções da carga térmica total de todos os casos. Nota-se que os arranjos em *wood frame* apresentam valores superiores em relação a RedCgTT_{UH}, os quais atingem o nível B de desempenho energético para este parâmetro avaliativo, salvo o CB, que consegue obter o nível mais alto de eficiência energética.

Ao analisar os valores dos incrementos no PHFT_{UH}, pode-se observar que somente o caso C7 não alcançou um percentual superior a UH de alvenaria, obtendo 1,8% a menos de horas dentro das faixas de temperaturas operativas do Intervalo 3 em relação a esta. Os demais arranjos em *wood frame*, embora tenham alcançado resultados mais satisfatórios que o modelo de alvenaria, não atingiram o percentual necessário para serem enquadrados nas etiquetas A-B de desempenho energético da envoltória. Assim, todos os casos analisados receberam a etiqueta nível C de eficiência energética.

De acordo com o verificado, os piores resultados relacionam-se, portanto, com a redução da transmitância térmica nos elementos das paredes externas, manifestando-se de maneira mais evidente na redução da quantidade de horas dentro das faixas de temperaturas operativas estabelecidas para o Intervalo 3. Isso é justificado devido a adição de isolantes nos painéis de *wood frame* dificultar as trocas de calor entre o meio externo e interno, mantendo o calor excessivo por um maior tempo nos APPs.

Figura 72 – Desempenho energético dos modelos construtivos analisados para o clima de Manaus.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Logo, para o clima de Manaus, recomenda-se o uso de paredes em estrutura leve de madeira com menor resistência térmica em sua composição. Além disso, para melhorar os níveis de eficiência energética da UH, é essencial a adoção de outras estratégias construtivas de condicionamento térmico passivo, como por exemplo, o sombreamento das aberturas da edificação.

4.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE A METODOLOGIA APLICADA

As alterações implementadas na NBR 15575 aprimoraram significativamente a análise da eficiência energética nas habitações. Essas mudanças permitiram simular condições de uso e ocupação das UH de maneira a refletir de forma mais precisa o modo como são operadas pelos usuários. Além disso, ao avaliar o desempenho energético das habitações ao longo de um ano completo, a norma possibilitou uma avaliação mais equilibrada e representativa da performance energética das edificações.

Outro aspecto positivo verificado em sua nova metodologia, refere-se a divisão dos climas em intervalos de acordo com a média anual da temperatura externa de bulbo seco (TBSm). Através destes intervalos, é estabelecida a faixa de temperatura operativa nos APPs, a qual aproxima a avaliação termoenergética de condições relacionadas a percepção térmica dos ocupantes das habitações.

A definição dessas faixas operativas ajustadas às temperaturas médias locais encontra-se em conformidade com numerosas pesquisas, que evidenciam a relevância das características do clima local na percepção de conforto térmico dos usuários das edificações, interferindo também na quantidade de vezes que os sistemas de climatização são acionados e no tempo que estes permanecem em operação. Assim, pode-se dizer que metodologia não apenas aumentou a precisão da análise da temperatura dos ambientes, mas também promoveu uma simulação do uso de sistemas de climatização mais próximo das necessidades reais de cada ambiente.

Contudo, apesar das notáveis melhorias nas análises da performance energética das habitações, observou-se que o padrão de uso empregado nas avaliações permanece uniforme em todos os locais analisados. Essa abordagem pode não refletir adequadamente a realidade, especialmente considerando as vastas dimensões do Brasil, onde as variações nos horários das atividades diárias, influenciadas pelos horários de nascer e pôr do sol, podem diferir significativamente entre as regiões do país. Esta situação revela a necessidade de estudos sobre os horários de uso e ocupação dos APPs nas diversas localidades do Brasil e a sua possível influência no consumo energético das habitações.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho investigou o desempenho termoenergético de diferentes configurações de envelopes em *wood frame* aplicados a uma tipologia habitacional unifamiliar térrea, inserida em distintos climas brasileiros. Para isso, foram realizadas simulações computacionais utilizando o *software EnergyPlus*, considerando as determinações da norma brasileira de desempenho de habitações residenciais, a NBR 15.575-1 e, posteriormente, sendo aplicada a metodologia da Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (INI-R).

As simulações foram realizadas sob duas condições, uma com ventilação natural e outra com condicionamento artificial, sendo comparados os valores de temperaturas operativas máxima (Tom_áx) e mínima (Tom_{ín}) nos APPs, o percentual de horas de ocupação dentro de uma faixa de temperatura operativa (PHFT) e as cargas térmicas totais (CgTT) de cada modelo. Os climas avaliados abrangearam as 8 ZB brasileiras, com 10 cidades selecionadas, sendo elas: Curitiba (ZB1); Pelotas (ZB2); São Paulo (ZB3); Brasília (ZB4); Joinville (ZB5); Campo Grande (ZB6); Teresina (ZB7) e, Rio de Janeiro, Fortaleza e Manaus (ZB8).

Após delimitar estas variáveis e as condições de operação e de contorno da UH, foram configurados os modelos geométricos para realizar as avaliações de desempenho termoenergético. Inicialmente, simularam-se dois casos base, um em *wood frame* e outro de alvenaria convencional, também denominados como modelos reais, os quais foram comparados entre si e a um modelo de referência (configurado conforme as recomendações da NBR 15.575-1).

Em seguida, com o objetivo de verificar a influência das vedações verticais em *wood frame* no desempenho energético da UH estudada e, identificar qual das configurações propostas oferece a maior eficiência termoenergética em cada ZB brasileira, foram realizadas novas simulações utilizando sete diferentes envelopes de estrutura leve de madeira. Os novos casos avaliados tiveram seus arranjos baseados nas composições mais utilizadas no Brasil, de acordo com o estudo de Espíndola (2017), também sendo usada como referência a estrutura apresentada no estudo de Pasztori *et al.* (2012) e no DATec nº 20-E, bem como, a configuração exposta no catálogo da empresa *RockWool* como solução para paredes em *wood frame*. Os casos C1, C3 e C5 não incluíram isolantes térmicos em suas composições, enquanto os outros 4 casos tiveram tais elementos incorporados as suas estruturas.

Com base nos resultados obtidos, verificou-se um grande potencial de uso do sistema construtivo em estrutura leve de madeira nos diferentes climas brasileiros, sendo que, nas cidades analisadas, pelos menos duas das composições em *wood frame* aplicadas à envoltória da HIS apresentaram um desempenho energético geral superior ao do modelo de referência e ao de alvenaria convencional. Neste viés, por meio das adaptações realizadas em seus arranjos, foi possível observar um comportamento energético bastante satisfatório da UH em *wood frame* sob variadas condições climáticas, corroborando o enunciado por Bolsoni (2020).

Neste sentido, notou-se que em climas com temperaturas médias menos elevadas, como em Curitiba (ZB1), Pelotas (ZB2) e São Paulo (ZB3), a baixa massa térmica da estrutura leve em madeira pode ser compensada com a adição de isolantes térmicos em seus envelopes, assim como o verificado no estudo de Casconeia *et al.* (2018). A introdução de tais materiais conferiu aos painéis de *wood frame* uma maior resistência térmica, ampliando também o atraso térmico das vedações verticais opacas, o que permitiu oferecer uma maior barreira à perda de calor do interior da UH durante o inverno e aos ganhos de calor no período do verão. Nestes climas, a referida conjuntura foi essencial por garantir mais horas de conforto térmico no interior da HIS, reduzindo de forma significativa a demanda por carga térmica, sobretudo a destinada ao aquecimento dos APPs, conforme o também observado neste mesmo estudo (Casconeia *et al.*, 2018, p. 88).

No entanto, à medida que as ZB foram analisadas pode-se observar uma inversão neste quadro, com os envelopes em *wood frame* providos de maior transmitância térmica e menor atraso térmico apresentando os melhores resultados termoenergéticos. Esta condição pode ser verificada de forma mais evidente nas cidades de Teresina (ZB7) e nas representantes da ZB8: Rio de Janeiro, Fortaleza e Manaus, onde as temperaturas médias registradas tendem a ser mais elevadas. Nestes casos, os arranjos em estrutura leve de madeira sem isolantes em suas composições propiciaram uma maior taxa de transferência de calor entre o interior e o exterior da HIS, mitigando a retenção de elevadas temperaturas dentro da UH por longos períodos, sendo consoante ao indicado no estudo de Stazi *et al.* (2017) para climas com temperaturas quentes mais extremas. Isso promoveu um maior percentual de horas dentro da faixa de temperatura operativa na UH, refletindo também em um menor consumo de carga térmica para refrigeração.

Quanto às Tomáx e Tomín atingidas nas UH, como já esperado, verificou-se que em todas as cidades analisadas os envelopes com menor transmitância e maior

atraso térmico obtiveram os melhores resultados, visto que, garantiram uma menor variação de temperatura no interior da HIS. Em termos energéticos, alinhado com as pesquisas desenvolvidas por Zhu *et al* (2009) e Stazi *et al.* (2017), a maior resistência a transferência de calor foi vantajosa somente em climas que demandam CgTA para manter o conforto térmico da UH, conforme relatado acima.

Na cidade de Brasília (ZB4), as variações dos resultados entre os painéis de *wood frame* e o modelo em alvenaria convencional foram menos notórias, sendo que todos os casos avaliados atingiram selo máximo de eficiência energética. Isso pode ser justificado devido ao clima mais ameno da capital do país, o qual favorece naturalmente melhores condições para a manutenção da temperatura interna da UH. Apesar de obterem resultados semelhantes, deve-se evidenciar que todos os casos em estrutura leve de madeira apresentaram valores de RedCgTT e de incremento no PHFT ligeiramente mais elevados do que UH de alvenaria. Nas cidades de Joinville (ZB5) e Campo Grande (ZB6), notou-se que embora os arranjos em *wood frame* com maior transmitância térmica tenham alcançado resultados relativamente mais satisfatórios do que os envelopes associados a isolantes térmicos, não houve grandes contrastes entre os valores obtidos para os casos de estrutura leve de madeira. No entanto, quando comparados ao modelo de alvenaria convencional, verificou-se expressivas diferenças no desempenho energético dos dois sistemas construtivos analisados. Esta situação indicou uma maior influência da configuração adotada para a cobertura da edificação na performance energética da envoltória para os respectivos climas, visto que, todos os arranjos em *wood frame* incorporaram o mesmo modelo de cobertura, sendo este diferente do adotado para o caso de alvenaria, que contou com uma composição com maior atraso térmico.

Assim, ao sondar o comportamento termoenergético dos envelopes em *wood frame* sob diferentes zonas bioclimáticas brasileiras, esta pesquisa contribui significativamente no campo da eficiência energética das habitações, sobretudo ao investigar o desempenho da estrutura leve de madeira em climas tropicais e subtropicais. Através dos resultados gerais obtidos, pode-se constatar a capacidade do sistema construtivo avaliado em propiciar um ambiente construído com melhores condições de conforto térmico e, consequentemente, um uso mais eficiente da energia dispendida para a climatização residencial. Estes resultados tornam-se ainda mais relevantes ao serem reproduzidos em habitações voltadas para um grupo social particularmente mais vulnerável, o qual em grande parte das vezes é direcionado a residir em moradias de

qualidade questionável e, onde os custos de energia elétrica tem um peso mais representativo no orçamento familiar.

Adicionalmente, é importante destacar que os benefícios relacionados a maior sustentabilidade da tipologia *wood frame* se estendem além da fase operacional abordada neste estudo. Neste aspecto, por ter a sua estrutura proveniente de recursos naturais, a produção de painéis constituídos por estrutura *wood frame* ocasiona uma significativa redução nos impactos ambientais, com um menor consumo de energia demandada para o beneficiamento da madeira, além da redução na geração de resíduos sólidos e na emissão de dióxido de carbono produzidos pelo setor da construção civil.

5.1 LIMITAÇÕES DO TRABALHO

As limitações encontradas no desenvolvimento da pesquisa foram:

- Consideração de apenas um modelo representativo de habitação residencial brasileira;
- Condicionamento da mesma orientação solar para todas as simulações;
- Adoção de um único valor para as variáveis relacionadas a absorvividade e emissividade nas faces externas das vedações da envolvente;
- Simulação da habitação como uma unidade habitacional isolada no terreno, sem considerar possíveis sombreamentos e desvios ou canalizações do vento em decorrência de elementos do entorno urbano;
- Emprego de arquivos climáticos com dados metereológicos registrados em anos anteriores;
- Consideração de um mesmo padrão de uso e ocupação da habitação, sugeridas pela normativa, o que pode não refletir a realidade reproduzida em todas as ZBs brasileiras e em outros tipos de habitações;
- Aplicação dos valores dos parâmetros termofísicos dos materiais conforme o consultado em catálogos de fornecedores ou em normativas;
- Existência de limitações dos algoritmos do programa de simulação, correspondentes a elementos específicos de transferência de calor, condução, convecção e radiação térmica, por exemplo;

- Validez dos resultados apenas para as configurações das envoltórias e tipologia de habitação escolhida, assim como para os climas brasileiros utilizados.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros a autora sugere:

- Realizar análises higrotérmicas para verificar a difusão da umidade no interior dos elementos de vedação ao longo do tempo, avaliando a sua influência no conforto térmico e na eficácia dos sistemas de aquecimento e resfriamento;
- Alterar os padrões de uso e ocupação;
- Realizar testes em laboratório de amostras de painéis em *wood frame* para obter valores de parâmetros termofísicos mais precisos;
- Considerar outras tipologias habitacionais, bem como diferentes orientações solares;
- Estabelecer a associação de estratégias passivas de desempenho térmico e eficiência energética, sobretudo para climas quentes e superúmidos;
- Alterar a absorvidade da envolvente, especialmente do telhado;
- Considerar projeções climáticas futuras para a avaliação da eficiência energética dos envelopes investigados.
- Avaliar a sustentabilidade do *wood frame* quando comparado a outros sistemas construtivos considerando todo o ciclo de vida da edificação.

6. REFERÊNCIAS

ALLEN, E.; THALLON, R. **Fundamentals of Residential Construction**. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2011.

ADEKUNLE, T. O.; NIKOLOPOULOU, M. **Winter performance, occupants' comfort and cold stress in prefabricated timber buildings**. Building and Environment, v. 149, p. 220–240, 2019.

ALMEIDA, L. S. S.; SILVA, A. S.; SCHNEIDER, K.; GHISI, E. Avaliação da envoltória de habitações de interesse social de Florianópolis de acordo com o método prescritivo do RTQ-R. In: Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído - ENCAC, XII, 2013, Brasília. **Anais...** Brasília: ANTAC, p. 1-10, 2013.

AMANCIO, R. C. A.; FABRICIO, M. M.; MITIDIERI FILHO, C. V.; ONO, R. O sistema brasileiro de avaliação técnica de produtos inovadores para a construção civil. In: FABRICIO, Márcio Minto; ONO, Rosária. **Avaliação de desempenho de tecnologias construtivas inovadoras: manutenção e percepção dos usuários**. Porto Alegre: ANTAC, 1v, p.5 – 12, 2015.

AMERICAN FOREST & PAPER ASSOCIATION - AFPA. **Details for Conventional Wood Frame Construction**, Washington, DC, 2001.

AMERICAN WOOD COUNCIL'S - AWC. **Wood Frame Construction Manual (WFCM) for One- and Two-Family Dwellings**, Washington, DC, 2015.

ARAUJO, V. A. **Casas de madeira e o potencial de produção no Brasil**. Tese (Doutorado em Ciências). Programa: Recursos Florestais, Universidade de São Paulo – Piracicaba, 2017.

ARAUJO, V. A.; BARBOSA, J.C.; GARCIA, J. N.; GAVA, M.; LAROCA, C.; CÉSAR, S. F. **Woodframe: light framing houses for developing countries**. Revista de la Construcción, v. 15, n. 2, p. 78-87, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 7190 – Projeto de Estruturas de Madeira**. Rio de Janeiro, 2022.

_____. **NBR 7190**: Projeto de Estruturas de Madeira. Rio de Janeiro, 1997.

_____. **NBR 16143**: Preservação de madeiras - Sistema de categorias de uso. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 6232**: Penetração e retenção de preservativos em madeira tratada sob pressão. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 15498**: Chapas cimentícias reforçadas com fios, fibras, filamentos ou telas - Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2020.

_____. **NBR 14715**: Chapas de gesso para drywall – Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2021.

_____ . **NBR 15758**: Sistemas construtivos em chapas de gesso para drywall - Projeto e procedimentos executivos para montagem - Parte 1: Requisitos para sistemas usados como paredes. Rio de Janeiro, 2009.

_____ . **NBR 15575**: Edificações habitacionais – Desempenho Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2024.

_____ . **NBR 15575**: Edificações habitacionais – Desempenho Parte 4: Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas - SVVIE. Rio de Janeiro, 2021.

_____ . **NBR 15220**: Desempenho térmico de edificações Parte 2 – Componentes e elementos construtivos das edificações – Resistência e transmitância térmica – Métodos de cálculo (ISO 6946:2017 MOD). Rio de Janeiro, 2022.

_____ . **NBR 15220**: Desempenho térmico de edificações Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro, 2005.

_____ . **NBR 16936**: Edificações em *light wood frame*. Rio de Janeiro, 2023.

BARATA, T. Q. F. **Propostas de painéis leves de madeira para vedação externa adequados ao zoneamento bioclimático brasileiro**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil, na área de concentração em Arquitetura e Construção). Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

BENSON, T. **The Timber-Frame Home: Design, Construction, Finishing**. Taunton Press. Connecticut, 1997.

BOLSONI, F. **Introdução ao sistema wood frame**. 1º. ed. Florianópolis: Editora Escrita Criativa, 2020.

BORTONE, H.; NUNES, G. H.; GIGLIO, T. G. F. Desempenho termoenergético de edificações multifamiliares em *wood frame*. In: Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído – ELACAC, XI, 2019, João Pessoa. **Anais...** p. 1815-1824, 2019.

BRASIL. Ministério das Cidades. **Diretriz SINAT nº 5**: Sistemas construtivos estruturados em peças de madeira maciça serrada, com fechamentos em chapas delgadas (Sistemas leves tipo “Light Wood Framing”). Brasília: SNH, PBQP-H, SINAT, 2011.

_____ . **DATec nº 20**: Sistema Construtivo TECVERDE: sistema leve em madeira. Brasília: SNH, PBQP-H, SINAT, 2013.

_____ . **DATec nº 20 - E**: Sistema Construtivo TECVERDE: sistema leve em madeira. Brasília: SNH, PBQP-H, SINAT, 2023.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Portaria Inmetro nº 309, de 06 de setembro de 2022**. Aprova as Instruções Normativas e os Requisitos de Avaliação da Conformidade para a Eficiência Energética das Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas e Residenciais (INI-R). Rio de Janeiro, 2022.

BRASIL. Lei nº 10.295, de 17 de outubro de 2001. **Dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia e dá outras Providências**. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 18 out. 2001. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/leis_2001/l10295.htm>. Acesso em: 14 de abril de 2022.

BRASIL. **Portaria Inmetro nº 449, de 25 de novembro de 2010**. Aprova o Regulamento Técnico da Qualidade para a Eficiência Energética de Edificações Residenciais (RTQ-R). Rio de Janeiro, 2010.

BRASIL. **Portaria Inmetro nº 18, de 16 de janeiro de 2012**. Aprova a revisão do Regulamento Técnico da Qualidade para a Eficiência Energética de Edificações Residenciais (RTQ-R). Rio de Janeiro, 2012.

BUSI, T. P. **Análise comparativa de edifícios em alvenaria estrutural de blocos cerâmicos: geometria em planta baixa mais recomendada**. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, 2009.

CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO – CBIC. **Energia nas Construções: uma contribuição do setor à redução de emissões e de uso de fontes renováveis de energia**. Brasília, 2017. Disponível em: <https://cbic.org.br/wp-content/uploads/2017/11/Energia_na_Construcao_2017-1.pdf>. Acesso em: 25 de maio de 2024.

CAMPOS, C. I. de. **Painéis portantes de madeira e derivados**. 2000, 137p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos – USP, São Carlos, 2000.

CANADIAN MORTGAGE AND HOUSING CORPORATION – CMHC. **Canadian Wood-Frame House Construction**, Canada Mortgage and Housing Corporation, Ottawa, 2013.

CASCONE, S.; Catânia, F.; GAGLIANO, A.; SCIUTO, G. **Energy performance and environmental and economic assessment of the platform frame system with compressed straw**. Energy and Buildings, v. 166, p. 83–92, 2018.

CARDOSO, L. A. **Estudo do método construtivo wood framing para construção de habitações de interesse social**. 2015, 79 f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

CARVALHO, M. M. Q.; ROVERE, E. L. LA; GONC, A. C. M. **Analysis of variables that influence electric energy consumption in commercial buildings in Brazil**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 14, p. 3199–3205, 2010.

CENTRO DE TECNOLOGIA DE EDIFICAÇÕES – CTE. **Sistema Construtivo Wood Framing**. Disponível em: <<https://cte.com.br/wp-content/uploads/2019/10/Relat%C3%B3rio-de-diferenciais-Tecverde-v1-002.pdf>>. Acesso em: 02 de fevereiro de 2023.

CLIMATE.ONEBUILDING.ORG. Repository of free climate data for building performance simulation. Disponível em: <<https://climate.onebuilding.org/default.html>>. Acesso em: 09 de fevereiro de 2023.

DALY, D. I.; HARADA, T.; TIBBS, M.; COOPER, P.; WAITT, G.; TARTARINI, F. **Indoor temperatures and energy use in NSW social housing**. Energy and Buildings, v. 249, 2021.

DIAS, G. L. **Estudo Experimental de Paredes Estruturais de Sistema Leve em Madeira (Sistema Plataforma) Submetidas a Força Horizontal no seu Plano**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

DOCKENDORFF, S. **Residencial Haragano será entregue na próxima segunda-feira. Prefeitura Municipal de Pelotas** – Notícias, jun. 2014. Disponível em:<<https://estado.rs.gov.br/residencial-em-pelotas-garante-moradia-para-280-familias>>. Acesso em: 05 de março de 2023.

DODOO, A.; GUSTAVSSON, L.; SATHRE, R. **Lifecycle primary energy analysis of low-energy timber building systems for multi-storey residential buildings**. Energy Build: v. 81, p. 84–97, 2014.

DOE – DEPARTMENT OF ENERGY. **Energyplus**. Disponível em: <<http://energyplus.net>>. Acesso em: 17 de agosto de 2023.

ELI, L. G.; Krelling, A. F.; MENDES; L. S.; SILVA, R. M.; 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, Brasil. Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, 2019.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **PNE 2050: Plano Nacional de Energia 2050**. Brasília: MME/ EPE, 2020. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-nacional-de-energia-pne>>. Acesso em: 03 de fevereiro de 2023.

_____. **Balanço Energético Nacional 2023**: Ano Base 2022. Rio de Janeiro, Brasil. 2022a. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-748/topicos-687/BEN2023.pdf>>. Acesso em: 20 de maio de 2024.

ESPÍNDOLA, L. R.; INO, A. **Inserção e financiamento do sistema wood frame no programa habitacional Minha Casa Minha Vida**. XV Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. ANTAC, 2014.

ESPÍNDOLA, L. R. **O wood frame na produção de habitação social no Brasil**. Tese (Doutorado em Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). **Eurocode 5: Design of timber structures – Part 1-1: General – Common rules and rules for buildings**. Bruxelas, 2004.

_____ **EN 300 - OSB: definitions, classification and specifications.** Bruxelas, 2006.

EVOLA, G.; COSTANZO, V.; URSO, A. TARDO, C.; MARGANI, G. **Energy performance of a prefabricated timber-based retrofit solution applied to a pilot building in Southern Europe.** Building and Environment, v. 222, p. 109442, 2022.

FOSSATI, M.; SCALCO, V. A.; LINCZUCK, V. C. C.; LAMBERTS, R. **Building energy efficiency: an over view of the Brazilian residential labeling scheme.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 65, p. 1216-1231, 2016.

FRANZEN, F. P. **Análise do Desempenho Térmico e Acústico de Vedações Verticais Externas Executadas em Light Steel Framing.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO - FJP. **Déficit habitacional no Brasil.** Disponível em: <<https://fjp.mg.gov.br/deficit-habitacional-no-brasil/>>. Acesso em 20 de maio de 2024.

FUTURENG. **Wood Framing.** Disponível em: <<http://www.futureng.pt/wood-framing>>. Acesso em: 20 de fevereiro de 2023.

GARCIA, J. **Análise do desempenho termoenergético da envoltória em habitações de interesse social de Joinville/SC.** Dissertação (Mestrado). Universidade do Estado de Santa Catarina. Joinville, 115p., 2020.

GONÇALVES, E. da S. **Viagem à casa tradicional japonesa - construção para a contemporaneidade.** Dissertação (Mestrado em Arquitetura) - Universidade do Porto, Porto, 2016.

HILGENBERG NETO, M. F. **Estudo de viabilidade técnico/econômica da casa de madeira popular no Estado do Paraná.** Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.

Indústria Brasileira de Árvores - IBÁ. **Relatório 2019,** 2019. Disponível em :<<https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/iba-relatorioanual2019.pdf>>. Acesso em: 16 de agosto de 2022.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. **Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios - PNAD/IBGE.** 2019.

_____ **Panorama do Censo 2022.** Disponível em: <<https://censo2022.ibge.gov.br/apps/pgi/#/home>>. Acesso em: 05 de fevereiro de 2024.

IMAGUIRE JÚNIOR, K.; IMAGUIRE, M. R. G.; BATISTA, F. D.; BERRIEL, A. **A casa de araucária. Arquitetura da madeira em Curitiba.** Curitiba, Instituto ArquiBrasil, 2011.

INMETRO. Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (INI-R). PBEEEdifica, c2020. Disponível em: <https://pbee-edifica.com.br/sites/default/files/ANEXO%20II_INIR_Portaria%20309_2022_COM%20CAPA.pdf>. Acesso em: 07 de março de 2024.

Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT. **Caderno especial - casa & construção civil.** Revista da Madeira. Curitiba, 2007.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY – IEA. **Buildings.** IEA, Paris, 2022. Disponível em: <<https://origin.iea.org/reports/buildings>>. Acesso em: 29 de setembro de 2022.

_____. **The Future of Cooling: Opportunities for energy-efficient air conditioning.** IEA, Paris, 2018. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/the-future-of-cooling>>. Acesso em: 18 de setembro de 2022.

IWAKIRI, S.; MENDES, L. M.; SALDANHA, L. K. **Produção de chapas de partículas orientadas OSB de Eucalyptus grandis com diferentes teores de resinas, parafina e composição de camadas.** Ciência Florestal, Santa Maria, v. 12, n. 2, p. 135-145, 2003.

JÚNIOR, C. R. C.; SILVA, W. C. R.; SOARES, P. de T. M. L. **Uso da madeira na construção civil.** Projectus, v. 2, p. 79-93, 2017.

LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES – LabEEE. **NBR 15.575-2021 – Desempenho térmico. 2023.** Disponível em: <https://la-beee.ufsc.br/NBR15575-2020>. Acesso em: 10 de outubro de 2023.

LEITE, M. A., **Construção de Edificações Pré-Fabricadas em Wood Frame para Habitação de Interesse Social no Estado do Ceará. Análise da Viabilidade Econômico-Financeira, Técnica e Ambiental.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.

LP BUILDING SOLUTIONS. Produtos. Portal de informações da empresa. Disponível em: <<https://www.lpbrasil.com.br/producto/osb-apa-plus/>>. Acesso em 03 de março de 2023.

LOUSADA, J.; LOPES, D. M.; SILVA, M. E.; NORONHA, M. **Relações entre Peso, Volume e densidade para a Madeira de Pinheiro Bravo (*Pinus pinaster* Ait.) Cultivado em Portugal.** EFN, Lisboa, 2008.

LIU, Y.; GUO, H., SUN, C.; CHANG, W. **Assessing cross laminated timber (CLT) as an alternative material for mid-rise residential buildings in cold regions in China: a life-cycle assessment approach.** Sustainability, v.8, p. 01-13, 2016.

MACIAS, J.; ITURBURU, L.; RODRÍGUEZ, C.; ADDAS, D.; BOERO, A.; SORIANO, G. **Embodied and operational energy assessment of different construction methods employed on social interest dwellings in Ecuador.** Energy and Buildings, v. 151, p. 107–120, 2017.

MARTUCCI, R. **Projeto tecnológico para edificações habitacionais: utopia ou desafio?** Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo). Universidade de São Paulo, São Paulo 1990.

MOLINA, J. C.; JUNIOR, C. C. **Sistema construtivo em wood frame para casas de madeira.** Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas, v. 31, n. 2, p. 143-156, 2010.

MONTEIRO, T. C. **Balanço energético do processamento mecânico de toras de *Eucalypus***. Tese (Doutorado em Ciências). Programa: Recursos Florestais, Universidade Federal de Lavras– Lavras, 2011.

MOULD, R.; BAKER, K. J. **Documenting fuel poverty from the householders' perspective**. Energy Research & Social Science, v. 31, p. 21–31, 2017.

NAHUF, M. A. R.; MIRANDA, M. J. de A. C.; LELO, P. K. Y.; PIGOZZO, R. J. B.; YOJO, T. **Catálogo de Madeiras Brasileiras para Construção Civil**. Laboratório de Madeira e Produtos Derivados. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT. São Paulo, 2013.

NAJI, S.; CELIK, O. C.; ALENGARAM, U. J.; MOHD, Z. J.; SHAMSHIRBAND, S. **Structure, energy and cost efficiency evaluation of three different lightweight construction systems used in low-rise residential buildings**. Energy and Buildings, v. 84, p. 727–739, 2014.

NOUADJE, B. A. M.; KAPEN, P. T. **Three-dimensional numerical simulation of indoor thermal comfort for sleeping environments: A case study of residential buildings in the city of Bandjoun, Cameroon**. Solar Energy, v. 242, p. 56–69, 2022.

NUNES, G.; GIGLIO, T. **Effects of climate change in the thermal and energy performance of low-income housing in Brazil — assessing design variable sensitivity over the 21st century**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 168, p. 112885, 2022.

NUNES, J. M. dos S. A. **Modelo de avaliação de sustentabilidade integrado e global para ecossistemas florestais: bioenergia, produtos derivados de madeira e co-produtos**. Tese (Doutorado em Biociências) – Universidade de Coimbra, Coimbra, 2014.

OLIVEIRA, E. de.; MONICH, C. R.; TAVARES, S. Wood frame, energia embutida e emissão de CO₂: uma análise comparativa ao sistema construtivo convencional. In: ENCONTRO NACIONAL E ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2015, Campinas, SP. **Anais...** Porto Alegre: ANTAC, 2015.

OLIVEIRA, M. N. **Eficiência Energética como atributo da resiliência na habitação de interesse social: avaliação e proposição de estratégias para reformas e intervenções**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2022.

PARSEKIAN, G. A.; HAMID, A. A.; DRYSDALE, R. G. **Comportamento e dimensionamento de alvenaria estrutural**. 2^a ed. São Carlos: EdUFSCar, 625 p., 2013.

PASZTORY, Z.; PERALTA, P. N.; MOLNAR, S.; PESZLEN, I. **Modeling the hygro-thermal performance of selected North American and comparable European wood-frame house walls**. Energy and Buildings, v. 49, p. 142–147, 2012.

PENNSYLVANIA HOUSING RESEARCH CENTER – PHRC. **Rainscreen Gaps in Exterior Walls**. Disponível em: <https://www.phrc.psu.edu/assets/docs/Publications/Rainscreen-Gaps-in-Exterior-Walls-FINAL.pdf>. Acesso em: 18 de maio de 2022.

PEROBELLI, F. S.; OLIVEIRA, C. C. C. **Energy development potential: Na analysis of Brazil.** Energy Policy, v. 59, p. 683-701, 2013.

PINHEIRO, G. S. **Alvenaria estrutural em blocos de concreto: aspectos construtivos e pré-dimensionamento.** Rio de Janeiro, UFRJ/Escola Politécnica, 2018.

PIQUÉ, J. **Manual de Diseño para Maderas del Grupo Andino.** 1 Acuerdo de Cartagena/PADT REFORT, Lima, Peru, 1984.

PIZZONI, C. P. **Vedações verticais externas do sistema plataforma em madeira: medidas para manutenção.** Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

POUEY, J. A.; BRANDALISE, M. P.; SILVA, A. C. S. B. Determinação da eficiência energética da envoltória de projeto residencial unifamiliar comparando os resultados a partir da aplicação dos métodos prescritivo e de simulação do RTQ-R. In: Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído - ENTAC, XIV, 2012, Juiz de Fora. **Anais...** Juiz de Fora: ANTAC, 2012. p. 2849-2857.

PRAZERES, F. da S.; ALBERTI, E. G.; ARAKAWA, F. S. **Sistema construtivo em wood frame como alternativa inovadora para o desenvolvimento sustentável no Brasil.** Brazilian Journal of Development, v. 8, p. 20360-20380, 2020.

PROGRAMA NACIONAL DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA – PROCEL. **PROCEL EDIFICA - Eficiência Energética nas Edificações.** 2006. Disponível em: <http://www.procelinfo.com.br>. Acesso em: 14 de abril de 2022.

RAMALHO, M. A.; CORRÊA, M. R. S. **Projeto de Edifícios de Alvenaria Estrutural.** São Paulo, PINI, 2003.

RAMOS, N. C. S. **Método de avaliação de desempenho técnico construtivo (madtec) do sistema light wood frame (lwf) aplicado em habitações de interesse social no Brasil.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2019.

ROCHA, J. A. **Diagnósticos dos Procedimentos Executivos nos Canteiros de Obras de Alvenaria Estrutural.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade do Estado de São Paulo – UNESP, Ilha Solteira, 2013.

RODRIGUES, H. M. **Influência do teor de argamassa e da granulometria da brita na permeabilidade e nas resistências à compressão e à abrasão de concretos permeáveis.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Goiás, Goiânia. 2014.

SANTOS, A. C. dos; SZUCS, C. A. **Diaphragmas horizontais de piso em madeira, confeccionados com chapas de OSB e vigas I, submetido ao carregamento em seu plano.** Acta Scientiarum. Technology., Maringá, v. 32, n. 4, p. 375-382, 2010.

SANTOS, I. G.; SOUZA, R. V. G. **Proteções solares no regulamento brasileiro de eficiência energética de edifícios comerciais, de serviços e públicos.** Ambiente Construído, v. 12, p. 227–241, 2012.

SENTELHAS, P. C.; ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. **Köppen's climate classification map for Brazil**. Meteorologische Zeitschrift, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2014.

SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO - SFB. **Boletim SNIF 2019**. Brasília, 2019. Disponível em: <https://snif.florestal.gov.br/images/pdf/publicacoes/Boletim-SNIF_Ed1_2019.pdf>. Acesso em: 30 de janeiro de 2024.

SILVA, A. **Comportamento diafragma de paredes de madeira no sistema leve plataforma**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2004.

SILVA, J. C. da. **Parâmetros construtivos para painéis verticais adaptados do sistema wood frame em madeira de eucalipto jovem**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana). Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2018.

SORGATO, M. J. **A influência do comportamento do usuário no desempenho térmico e energético de edificações residenciais**. 2015. 260f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

SOUZA, R. A., **Análise crítica do sistema construtivo wood frame com base na diretriz do SINAT O5 revisão 02**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal, Setor de Ciências Agrárias). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2018.

SOZER, H. **Improving energy efficiency through the design of the building envelope**. Building and Environment, v. 45, n. 12, p. 2581–2593, 2010.

STAZI, F.; TOMASSONI, E.; DI Perna, C. **Super-insulated wooden envelopes in Mediterranean climate: Summer overheating, thermal comfort optimization, environmental impact on an Italian case study**. Energy and Buildings, v. 138, p. 716–732, 2017.

SUIGUE, E. K., **Difusão da Construção em Madeira no Brasil: Agentes, Ações e Produtos**. (Dissertação em Arquitetura e Urbanismo). Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

SUN, C.; GILES, H.; LIAN, Z. **The dynamic impact of window characteristics on shading factor and energy consumption**. Solar Energy, v. 102, p. 1–13, 2014.

TAUIL, C. A.; NESE, F. J. M. **Alvenaria Estrutural**. São Paulo: Editora Pini, 183 p., 2010.

TÉCHNE. (2009). **Light Wood Frame**. Revista Téchne (159), São Paulo: Pini.

TETTEY, U. Y. A.; DODOO, A.; GUSTAVSSON, L. **Effect of different frame materials on the primary energy use of a multi storey residential building in a life cycle perspective**. Energy and Buildings, v. 185, p. 259–271, 2019.

THALLON, R. **Graphic guide to frame construction**. Newtown: The Tauton Press, 2008.

THAPA, S.; RIJAL, H. B.; PASUT, W.; SINGH, R.; INDRAGANTI, M.; BANSAL, A. K.; PANDA, G. K. **Simulation of thermal comfort and energy demand in buildings of sub-Himalayan eastern India - Impact of climate change at mid (2050) and distant (2080) future**. Journal of Building Engineering, v. 68, p. 106068, 2023.

THE ENGINEERED WOOD ASSOCIATION - APA. **Advanced Framing Construction Guide. Form nº M400A**. Washington: APAWood, 2014.

_____. **Panel Handbook and Grade Glossary**. Washington: APAWood, 1997.

_____. **Engineered Wood Construction Guide. Form nº E30W**. Washington: APAWood, 2016.

THERMOWORKS. **Emissivity Table**. Disponível em: <<https://www.thermoworks.com/emissivity-table/>>. Acesso em: 30 de janeiro de 2024.

THOMAS, D.; DING, G. **Comparing the performance of brick and timber in residential buildings – The case of Australia**. Energy and Buildings, v. 159, p. 136-147, 2018.

TOMAZELLO FILHO, M.; LATORRACA, J. V. F.; FISCHER, F. M.; MUNIZ, G. I. B. de. **Avaliação da Dispersão de Sementes de Pinus taeda L. pela Análise dos Anéis de Crescimento de Árvores de Regeneração Natural**. Floresta e Ambiente, ed. 24, Rio de Janeiro, 2017.

TRIANA, M. A.; LAMBERTS, R.; SASSI, P. **Sustainable energy performance in Brazilian social housing: A proposal for a Sustainability Index in the energy life cycle considering climate change**. Energy and Buildings, v. 242, p. 110845, 2021.

TRIANA, M. A.; LAMBERTS, R.; SASSI, P. **Characterisation of representative building typologies for social housing projects in Brazil and its energy performance**. Energy Policy, v. 87, p. 524-541, 2015.

TUBELO, R.; RODRIGUES, L.; MARK, G.; SOARES, J. C. G. **Cost-effective envelope optimisation for social housing in Brazil's moderate climates zones**. Building and Environment, v. 133, p. 213–227, 2018.

URMEE, T.; THOO, S.; KILICK, W. **Energy efficiency status of the community housing in Australia**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 16, p. 1916-1925, 2012.

VELLOSO, J. G. **Diretrizes para construções em madeira no sistema plataforma**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

VIANA, L. D. **Comparativo de custos dos sistemas construtivos wood frame e concreto armado para edifício utilizando BIM 5D**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2020.

WANG, Y.; DONG, Q.; GUO, H.; YIN, L. Y.; GAO, W.; YAO, W. X.; SOL, L. **Indoor thermal comfort evaluation of traditional dwellings in cold region of China: A case study in Guangfu Ancient City**. Energy and Buildings, v. 288, p. 113028, 2023.

WEBER, F. da SILVA; MELO, A. P.; MARINOSKI, D. L.; GUTHS, S.; LAMBERTS, R. **Desenvolvimento de um modelo equivalente de avaliação de propriedades térmicas para a elaboração de uma biblioteca de componentes construtivos brasileiros para o uso no programa EnergyPlus**. Florianópolis: LabEEE, 2017.

ZAPARTE, T. A. **Estudo e adequação dos principais elementos do modelo canadense de construção em wood frame para o Brasil**. Monografia (Graduação em Engenharia Civil), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2014.

ZHU, L., H., R., CORREIA, D., BOEHM, R. **Detailed energy saving performance analyses on thermal mass walls demonstrated in a zero energy house**. Energy and Buildings, v. 41, n. 3, p. 303-310, 2009.

ANEXO A – TABELA PARA INCREMENTO MÍNIMO DO PHFT_{UH}, REAL E REDUÇÃO MÍNIMA DA CGTT_{UH}, REAL PARA O ATENDIMENTO À CLASSE A DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA.

Critério		Tipologia			
		Unifamiliar	Multifamiliar		
		-	Pavimento téreo	Pavimento tipo	Pavimento cobertura
PHFT _{UH,ref} (%)	$CgTT_{UH,ref} / A_{p,UH}$ (kWh/(ano.m ²))	$\Delta PHFT_{min}$ (%)			
PHFT _{UH,ref} < 70%	Todos os valores	Obtido a partir do ábaco ou equações da Figura 8.1			
PHFT _{UH,ref} ≥ 70%	Todos os valores	0	0	0	0
PHFT _{UH,ref} (%)	$CgTT_{UH,ref} / A_{p,UH}$ (kWh/(ano.m ²))	RedCgTT _{minA} (%)			
Todos os valores	$CgTT_{UH,ref} / A_{p,UH} < 100$	35	30	45	30
	$CgTT_{UH,ref} / A_{p,UH} \geq 100$	55	40	50	40

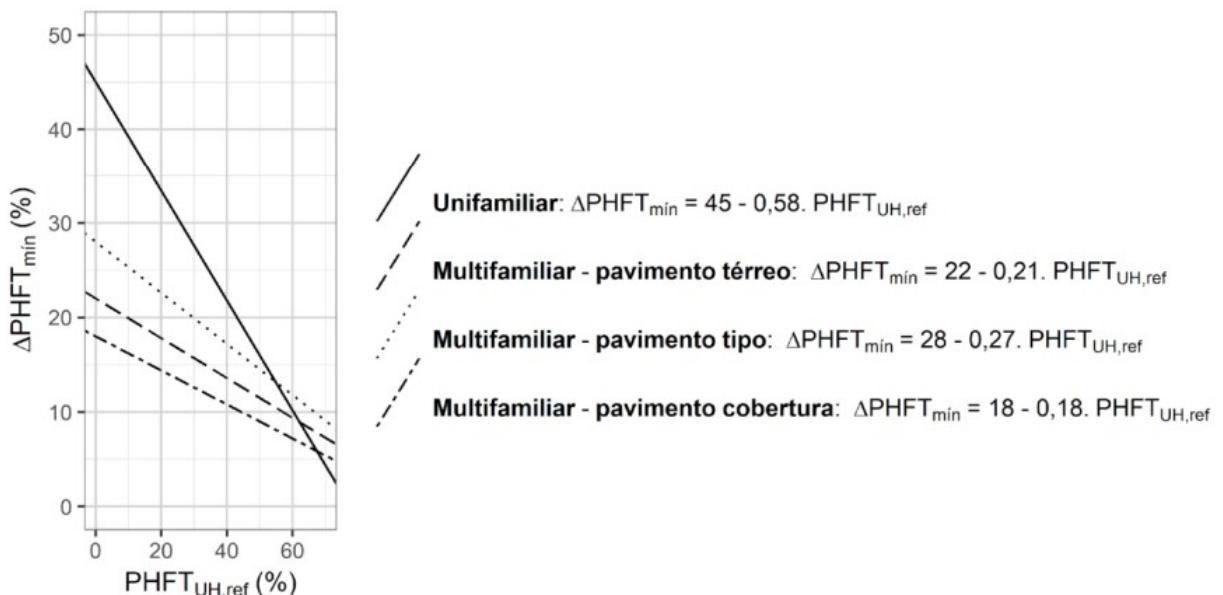
Fonte: INMETRO (2022).

ANEXO B – TABELA PARA INCREMENTO MÍNIMO DO PHFT_{UH}, REAL E REDUÇÃO MÍNIMA DA CGTT_{UH}, REAL PARA O ATENDIMENTO À CLASSE B DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA.

Critério	$\frac{CgTT_{UH,ref}}{A_{p,UH}} \text{ (kWh/(ano.m}^2\text{))}$	Tipologia			
		Unifamiliar	Multifamiliar		
		-	Pavimento téreo	Pavimento tipo	Pavimento cobertura
PHFT _{UH,ref} (%)	$\frac{CgTT_{UH,ref}}{A_{p,UH}} \text{ (kWh/(ano.m}^2\text{))}$	$\Delta PHFT_{\min} \text{ (%)}$			
PHFT _{UH,ref} < 70%	Todos os valores	Obtido a partir do ábaco ou equações da Figura 8.1			
PHFT _{UH,ref} ≥ 70%	Todos os valores	0	0	0	0
PHFT _{UH,ref} (%)	$\frac{CgTT_{UH,ref}}{A_{p,UH}} \text{ (kWh/(ano.m}^2\text{))}$	$RedCgTT_{\min B} \text{ (%)}$			
PHFT _{UH,ref} < 70%	Todos os valores	0	0	0	0
PHFT _{UH,ref} ≥ 70%	$CgTT_{UH,ref}/A_{p,UH} < 100$	17	15	22	15
	$CgTT_{UH,ref}/A_{p,UH} \geq 100$	27	20	25	20

Fonte: INMETRO (2022).

ANEXO C – ÁBACO E EQUAÇÕES PARA A OBTENÇÃO DO $\Delta\text{PHFT}_{\text{MÍN}}$ QUANDO O $\text{PHFT}_{\text{UH,REF}}$ FOR INFERIOR A 70%.



Fonte: INMETRO (2022).



Assinaturas do documento



Código para verificação: **Z7O1P98H**

Este documento foi assinado digitalmente pelos seguintes signatários nas datas indicadas:

 **FERNANDA PERAZZOLO DISCONZI** (CPF: 004.XXX.520-XX) em 26/08/2024 às 19:12:59
Emitido por: "SGP-e", emitido em 30/03/2018 - 12:42:51 e válido até 30/03/2118 - 12:42:51.
(Assinatura do sistema)

Para verificar a autenticidade desta cópia, acesse o link <https://portal.sgpe.sea.sc.gov.br/portal-externo/conferencia-documento/VURFU0NfMTIwMjJfMDAwMzY3ODIfMzY4MzJfMjAyNF9aN08xUDk4SA==> ou o site <https://portal.sgpe.sea.sc.gov.br/portal-externo> e informe o processo **UDESC 00036789/2024** e o código **Z7O1P98H** ou aponte a câmera para o QR Code presente nesta página para realizar a conferência.

ANEXO I

TERMO DE AUTORIZAÇÃO

DADOS DO AUTOR			
Nome: Lilian Marina Milani			
CPF: 074.164.259-05	E-mail: 07416425905@edu.udesc.br		
Vínculo: <input type="checkbox"/> Aluno Graduação <input checked="" type="checkbox"/> Aluno Pós-Graduação		<input type="checkbox"/> Professor <input type="checkbox"/> Técnico	
Centro: Centro de Ciências Tecnológicas	Curso: Mestrado Acadêmico em Engenharia Civil		
DADOS DO TRABALHO			
Título do trabalho: Edificações em Wood Frame para Habitação de Interesse Social: Análise Termoenergética da Envoltória			
Orientador: Fernanda Perazzolo Disconzi	E-mail: fernanda.disconzi@udesc.br		
Tipo de documento: <input type="checkbox"/> Tese <input checked="" type="checkbox"/> Dissertação <input type="checkbox"/> Monografia <input type="checkbox"/> Relatório de Estágio <input type="checkbox"/> Artigo <input type="checkbox"/> Relatório de Pós-doutorado			
Data da defesa: 27/06/2024			

Com base no disposto na Lei Federal Nº 9160, de 19 de fevereiro de 1998:

- Autorizo a disponibilização do **texto integral** do trabalho de minha autoria, em formato digital, para fins de leitura e/ou impressão, na Biblioteca Digital da Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), sem ressarcimento dos direitos autorais.
- Autorizo a disponibilização **parcial do texto** do trabalho de minha autoria, em formato digital, para fins de leitura e/ou impressão, na Biblioteca Digital UDESC, sem ressarcimento dos direitos autorais. **Partes disponibilizadas: elementos pré-textuais e outros (especificar):**
- Não autorizo** a UDESC, por meio da Biblioteca Digital, a disponibilizar, gratuitamente, em seu banco de dados, o trabalho de minha autoria, em formato digital.

Local/Data: Joinville/SC, 24 de agosto de 2024.

Assinatura do aluno: _____

Assinatura do orientador (assinatura digital via SGPE, solicitada pelo responsável do curso)



Assinaturas do documento



Código para verificação: **1D4PG9D5**

Este documento foi assinado digitalmente pelos seguintes signatários nas datas indicadas:



LILIAN MARINA MILANI (CPF: 074.XXX.259-XX) em 24/08/2024 às 11:37:29

Emitido por: "AC Final do Governo Federal do Brasil v1", emitido em 24/08/2024 - 11:35:48 e válido até 24/08/2025 - 11:35:48.
(Assinatura Gov.br)



FERNANDA PERAZZOLO DISCONZI (CPF: 004.XXX.520-XX) em 26/08/2024 às 19:12:58

Emitido por: "SGP-e", emitido em 30/03/2018 - 12:42:51 e válido até 30/03/2118 - 12:42:51.
(Assinatura do sistema)

Para verificar a autenticidade desta cópia, acesse o link <https://portal.sgpe.sea.sc.gov.br/portal-externo/conferencia-documento/VURFU0NfMTIwMjJfMDAwMzY3ODIfMzY4MzJfMjAyNF8xRDRQRzIENQ==> ou o site <https://portal.sgpe.sea.sc.gov.br/portal-externo> e informe o processo **UDESC 00036789/2024** e o código **1D4PG9D5** ou aponte a câmera para o QR Code presente nesta página para realizar a conferência.



Processo UDESC 00036789/2024 Vol.: 1

Origem

Órgão: UDESC - Universidade do Estado de Santa Catarina

Setor: UDESC/CCT/SECEPG - Secretaria de Ensino de Pós-graduação

Responsável: Nathália Kons

Data encam.: 27/08/2024 às 13:20

Destino

Órgão: UDESC - Universidade do Estado de Santa Catarina

Setor: UDESC/CCT/BIB - Biblioteca Setorial

Encaminhamento

Motivo: Para providências

Encaminhamento: Encaminha-se conforme RESOLUÇÃO Nº 013/2014 - CONSEPE



Processo UDESC 00036789/2024

Responsável pelo arquivamento

Órgão: UDESC - Universidade do Estado de Santa Catarina

Setor: UDESC/CCT/BIB - Biblioteca Setorial

Usuário: 59187530953 - LUCIANA SILVA DESTRI PEROZIN

Data/hora: 28/08/2024 às 12:12h

Dados do arquivamento

Despacho: Acervo 167380 Sistema Pergamum UDESC 2024, responsável Luciana Silva Destri Perozin, Bibliotecária (catalogação e indexação).

Assinaturas do documento



Código para verificação: **0SMO1X30**

Este documento foi assinado digitalmente pelos seguintes signatários nas datas indicadas:

 **LUCIANA SILVA DESTRI PEROZIN** (CPF: 591.XXX.309-XX) em 28/08/2024 às 12:12:44
Emitido por: "SGP-e", emitido em 30/03/2018 - 12:45:38 e válido até 30/03/2118 - 12:45:38.
(Assinatura do sistema)

Para verificar a autenticidade desta cópia, acesse o link <https://portal.sgpe.sea.sc.gov.br/portal-externo/conferencia-documento/VURFU0NfMTIwMjJfMDAwMzY3ODIfMzY4MzJfMjAyNF8wU01PMVgzMA==> ou o site <https://portal.sgpe.sea.sc.gov.br/portal-externo> e informe o processo **UDESC 00036789/2024** e o código **0SMO1X30** ou aponte a câmera para o QR Code presente nesta página para realizar a conferência.