



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

MARCOS DE SOUZA MATA JÚNIOR

**A INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DA RELAÇÃO JANELA/PAREDE, TIPO
DE VIDRO E DO FATOR DE ABERTURA NO DESEMPENHO TÉRMICO DE UMA
EDIFICAÇÃO MULTIFAMILIAR.**

Recife

2025

MARCOS DE SOUZA MATA JÚNIOR

A INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DA RELAÇÃO JANELA/PAREDE, TIPO DE VIDRO E DO FATOR DE ABERTURA NO DESEMPENHO TÉRMICO DE UMA EDIFICAÇÃO MULTIFAMILIAR.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia civil.

Orientador: Prof. Dr. Ms. Tibério Wanderley Correia de Oliveira Andrade

Recife

2025

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Mata Júnior, Marcos de Souza .

A influência da variação da relação janela/parede, tipo de vidro e do fator de abertura no desempenho térmico de uma edificação multifamiliar / Marcos de Souza Mata Júnior. - Recife, 2025.

p. 78 : il., tab.

Orientador(a): Tibério Wanderley Correia de Oliveira Andrade
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Civil - Bacharelado, 2025.

Inclui referências, anexos.

1. Desempenho térmico de edificações. 2. Simulação computacional. 3. Ventilação natural. 4. Vidro de controle solar. 5. WWR. I. Andrade, Tibério Wanderley Correia de Oliveira . (Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)

MARCOS DE SOUZA MATA JÚNIOR

A INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DA RELAÇÃO JANELA/PAREDE, TIPO DE VIDRO E DO FATOR DE ABERTURA NO DESEMPENHO TÉRMICO DE UMA EDIFICAÇÃO MULTIFAMILIAR.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em: 28/08/2025

BANCA EXAMINADORA

Prof. Tibério Wanderley Correia de Oliveira Andrade (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Profa. Rachel Perez Palha (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Pedro de Freitas Gois (Examinador externo)
Tecomat

RESUMO

Diante do aumento acelerado do consumo de energia elétrica nas edificações brasileiras, sobretudo em regiões com climas quentes, torna-se essencial adotar estratégias projetuais que melhorem o desempenho térmico de forma a evitar gastos com condicionamento artificial. Este trabalho visa analisar o desempenho térmico de uma edificação multifamiliar vertical com 16 pavimentos, localizada na cidade de Recife-PE, cuja zona bioclimática é 5A, a partir de simulações computacionais baseadas nos critérios da NBR 15575:2024. Foram avaliados três indicadores principais: Temperatura Operativa Máxima ($T_{o,máx}$), Percentual de Horas na Faixa de Temperatura Operativa (PHFT) e Carga Térmica Total (CgTT). O software utilizado para as simulações foi o EnergyPlus, com auxílio do Sketchup, no qual foram realizadas cinco variações de WWR (20%, 30%, 50%, 70% e 90%), e para cada WWR três configurações distintas: vidro incolor, vidro de controle solar cinza, e vidro cinza com fator de abertura para ventilação de 0,9. Todos os demais parâmetros construtivos foram mantidos constantes de forma a isolar o efeito das variáveis analisadas. Os resultados demonstraram de forma geral que o aumento do WWR elevou os valores de $T_{o,máx}$ e CgTT. Já o PHFT apresentou melhora até aproximadamente WWR 50%, estabilizando-se ou decrescendo em situações de WWRs mais elevados. A inserção do vidro cinza e o aumento do fator de abertura para ventilação contribuíram significativamente para a melhoria dos indicadores, elevando a classificação de desempenho térmico de várias unidades, concluindo, dessa forma, que estratégias bem pensadas possibilitam a melhora do conforto térmico, reduzem a demanda energética e constroem edificações mais eficientes, principalmente em climas quentes e úmidos como o de Recife.

Palavras-chave: Desempenho térmico de edificações; Simulação computacional; Ventilação natural; Vidro de controle solar; WWR.

ABSTRACT

Given the rapid increase in electricity consumption in Brazilian buildings, especially in hot climates, it is essential to adopt design strategies that improve thermal performance to avoid costs with artificial conditioning. This study aims to analyze the thermal performance of a 16-story multifamily building located in the city of Recife- PE, whose bioclimatic zone is 5A, using computer simulations based on the criteria of NBR 15575:2024. Three main indicators were evaluated: Maximum Operating Temperature ($T_{o,max}$), Percentage of Hours in the Operating Temperature Range (PHFT), and Total Thermal Load (CgTT). The simulation software used was EnergyPlus, with the help of SketchUp. Five WWR variations (20%, 30%, 50%, 70%, and 90%) were created, and for each WWR, three distinct configurations were used: clear glass, gray solar control glass, and gray glass with a ventilation aperture factor of 0.9. All other construction parameters were kept constant to isolate the effects of the analyzed variables. The results generally demonstrated that increasing the WWR increased the $T_{o,max}$ and CgTT values. The PHFT improved up to approximately 50% WWR, stabilizing or decreasing at higher WWRs. The insertion of gray glass and the increase in the ventilation opening factor contributed significantly to the improvement of the indicators, raising the thermal performance rating of several units, thus concluding that well-thought-out strategies enable the improvement of thermal comfort, reduce energy demand and construct more efficient buildings, especially in hot and humid climates like Recife.

Keywords: Thermal performance of buildings, computer simulation, natural ventilation, solar control glass, WWR.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, por me conceder forças, saúde e sabedoria para superar todos os desafios ao longo desta jornada.

Aos meus pais, minha eterna gratidão pelo apoio, carinho, pelos ensinamentos e por sempre acreditarem em mim em todos os momentos.

Ao meu irmão, também engenheiro civil, agradeço pelo apoio técnico e motivacional durante a graduação.

Agradeço a minha namorada, Fátima, pela paciência, incentivo constante e por estar ao meu lado nos momentos mais difíceis, sendo fundamental para que eu chegasse até aqui.

Não poderia deixar de agradecer às minhas professoras do ensino médio, que despertaram em mim o desejo de seguir na engenharia e me fizeram acreditar que era possível alcançar esse sonho — em especial, à professora Roniérica.

Agradeço ao meu orientador de TCC, Prof. Tibério, pelos ensinamentos passados durante a graduação, no qual tive o privilégio de pagar três disciplinas.

Agradeço verdadeiramente ao engenheiro civil, Matheus Mendonça Barbosa, especialista na área de Desempenho Térmico de Edificações, por ter contribuído grandemente com seu conhecimento para que este trabalho fosse realizado.

A todos citados, meus verdadeiros agradecimentos.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 –	Representação da resistência térmica de uma telha de barro.....	18
Figura 2 –	Croqui dos ambientes de permanência prolongada (APP) da edificação	24
Figura 3 –	Procedimento para o cálculo do PHFT.....	28
Figura 4 –	Procedimento de análise de desempenho térmico com simulação computacional	32
Figura 5 –	Interface inicial: EP-launch do software EnergyPlus	34
Figura 6 –	Fluxograma do procedimento de configuração da simulação no EnergyPlus.....	35
Figura 7 –	Variáveis que influenciam no ganho térmico	36
Figura 8 –	Janelas com diferentes aberturas úteis para ventilação	38
Figura 9 –	Planta baixa tipo do edifício	41
Figura 10 –	Croqui 3D do modelo real do edifício	42
Figura 11 –	Croqui 3D do modelo de referência	42
Figura 12 –	Área de influência da Zona Bioclimática quente e úmida 5A	44
Figura 13 –	Croqui dos elementos construtivos de paredes.....	46
Figura 14 –	Croqui do elemento construtivo da cobertura e laje com telha de fibrocimento.....	47
Figura 15 –	Croqui do elemento construtivo com laje nervurada e forro de gesso	47
Figura 16 –	Redimensionamento das esquadrias no sketchup para WWR 20%.	52
Figura 17 –	Croqui 3D da edificação para diferentes WWRs	53
Figura 18 –	Fluxograma do procedimento de análise dos resultados	55
Figura 19 –	Resultados da cobertura para temperatura operativa máxima (°c) ..	56
Figura 20 –	Resultados do pavimento tipo para a temperatura operativa máxima (°c)	57
Figura 21 –	Resultados do pavimento térreo para a temperatura operativa máxima (°c)	59
Figura 22 –	Resultados do pavimento da cobertura para o PHFT (%).....	60
Figura 23 –	Resultados do pavimento tipo para o PHFT (%).....	61
Figura 24 –	Resultados do pavimento térreo para o PHFT (%).....	62

Figura 25 – Resultados do pavimento da cobertura para a carga térmica total (kWh/ano)	64
Figura 26 – Resultados do pavimento térreo para a carga térmica total (kWh/ano)	65
Figura 27 – Resultados do pavimento térreo para a carga térmica total (kWh/ano)	66

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 –	Valores de absorvidade (α) e emissividade (ϵ) de alguns materiais	19
Quadro 2 –	Intervalos de temperaturas externas de bulbo seco média (TBSm)..	26
Quadro 3 –	Faixas de temperaturas operativas para a determinação do PHFT,APP.....	27
Quadro 4 –	Faixas de temperaturas operativas para a determinação da CgTR,APP.....	29
Quadro 5 –	Critério de avaliação quanto ao PHFT,UH.....	31
Quadro 6 –	Critério de avaliação quanto à CgTT,UH.....	31
Quadro 7 –	Propriedades dos materiais do modelo de referência.....	43
Quadro 8 –	Propriedades térmicas do vidro float transparente.....	48
Quadro 9 –	Propriedades térmicas do vidro float cinza.....	48
Quadro 10–	Padrão de Ocupação da Habitação.....	49
Quadro 11–	Padrão de utilização da iluminação interna	50
Quadro 12–	Parâmetros de ventilação natural para portas e janelas	52
Quadro 13–	Níveis de desempenho segundo a NBR 15575 (ABNT, 2024) por unidade habitacional	58

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
APP	Ambiente de Permanência Prolongada
APT	Ambiente de Permanência Transitória
Apto	Apartamento
CgTA	Carga Térmica de Aquecimento
CgTR	Carga Térmica de Resfriamento
CgTT	Carga Térmica Total
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
PAV.	Pavimento
PHFT	Percentual de Horas Ocupadas Dentro de uma Faixa de Temperatura Operativa
pp	Pontos percentuais
Rt	Resistência Térmica
λ	Condutividade Térmica
TBSm	Temperatura externa de Bulbo Seco Média
Term.	Terminação
Tomáx	Temperatura operativa máxima
Tomín	Temperatura operativa mínima
U	Transmitância Térmica
UH	Unidade habitacional
WWR	Window-to-Wall Ratio (Relação janela-parede)
ZB	Zona Bioclimática

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	JUSTIFICATIVA	15
1.2	OBJETIVOS	16
1.2.1	Objetivo geral	16
1.2.2	Objetivos Específicos	16
2	REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1	DESEMPENHO TÉRMICO DE EDIFICAÇÕES	17
2.2	NORMAS DE DESEMPENHO TÉRMICO	21
2.2.1	NBR 15220 (ABNT, 2024).....	21
2.2.2	NBR 15575 (ABNT, 2024).....	22
2.2.3	Ambientes de permanência prolongada (APP) e transitória (APT)	23
2.2.4	Comparação com o modelo de referência	24
2.2.5	Consideração de cargas internas	25
2.2.6	Usos da edificação quanto a ventilação	25
2.2.7	Indicadores de desempenho térmico	25
2.2.7.1	Temperaturas Operativas Anuais Máxima (Tomáx) e Mínima (Tomín)	26
2.2.7.2	Percentual de Horas Ocupadas dentro de uma Faixa de Temperatura Operativa (PHFT)	26
2.2.7.3	Carga Térmica Total (CgTT).....	28
2.2.8	Níveis de desempenho térmico	29
2.2.8.1	Nível de desempenho mínimo	30
2.2.8.2	Nível de desempenho intermediário e superior	30
2.3	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL APLICADA AO DESEMPENHO TÉRMICO.....	32
2.4	ELEMENTOS TRANSPARENTES E A VENTILAÇÃO NATURAL	36
3	METODOLOGIA	40
3.1	PROPOSTA DA EDIFICAÇÃO	41
3.1.1	Modelo de referência	42

3.2	ZONA BIOCLIMÁTICA	43
3.3	PARÂMETROS TERMO FÍSICOS	44
3.3.1	Composição das paredes	45
3.3.2	Cobertura e laje	46
3.3.3	Vidros	47
3.4	PARÂMETROS DE ENTRADA	49
3.4.1	Parâmetros de cargas internas e de utilização	49
3.4.2	Ventilação	51
3.5	CASOS ANALISADOS	52
3.6	ANÁLISE DOS RESULTADOS	53
4	RESULTADOS	56
4.1	TEMPERATURA OPERATIVA MÁXIMA (TÓMAX)	56
4.2	PERCENTUAL DE HORAS DENTRO DA FAIXA DE TEMPERATURA OPERATIVA (PHFT)	59
4.3	CARGA TÉRMICA TOTAL (CGTT)	63
5	CONCLUSÃO	67
5.1	LIMITAÇÕES DO TRABALHO.....	68
5.2	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	69
	REFERÊNCIAS	70
	ANEXO A – CRITÉRIO PARA OS NÍVEIS DE DESEMPENHO INTERMEDIÁRIO E SUPERIOR	75
	ANEXO B – INCREMENTO MÍNIMO DO PHFT,UH(REAL) E REDUÇÃO MÍNIMA DA CGTT,UH(REAL) PARA O NÍVEL INTERMEDIÁRIO	76
	ANEXO C – INCREMENTO MÍNIMO DO PHFT,UH(REAL) E REDUÇÃO MÍNIMA DA CGTT,UH(REAL) PARA O NÍVEL SUPERIOR	77
	ANEXO D – ÁBACO E EQUAÇÕES PARA OBTER O ΔPHFTmin QUANDO O PHFT,UH,REF FOR INFERIOR A 70%	78

1 INTRODUÇÃO

A construção civil é um ramo de alto dinamismo que está sempre sendo demandado para atender diversos setores da sociedade, principalmente, o de habitações. Atualmente, as construtoras para almejar uma produção em série, que exija mais velocidade e otimização da mão de obra, estão buscando com frequência a inserção de métodos construtivos mais racionalizados diferentes dos convencionais (Carvalho, 2012). Entretanto, surge a preocupação da má qualidade e persistências de vícios construtivos nas produções em larga escala, que podem acabar por prejudicar o desempenho da edificação, sendo um deles o desempenho térmico.

Uma pesquisa de satisfação realizada pelo Ministério das Cidades em 2014, com relação a satisfação dos clientes do setor imobiliário da construção civil, o quesito temperatura obteve o segundo pior resultado, cuja média nacional se aproxima da nota 5, indicando um nível de satisfação relativamente baixo (Ministério das Cidades, 2014).

Visto a necessidade de se aprofundar em estudos à qualidade térmica das edificações, diversas pesquisas vêm sendo realizadas de forma a apresentar alternativas eficientes da melhoria da temperatura interna dos ambientes. De acordo com Mazzaferro (2013), a temperatura interna dos edifícios é significativamente condicionada pelas características da sua envoltória, a qual atua como mediadora dos fluxos de calor entre o ambiente externo e os espaços internos. Visto isso, algumas estratégias na geometria da fachada da edificação, escolha de materiais específicos e uso da ventilação natural podem influenciar diretamente no desempenho térmico.

Segundo Lamberts *et al.* (2014), a ventilação natural, nos climas quentes e úmidos é uma das estratégias mais simples para se almejar a melhoria na sensação térmica. Além disso, estudos na literatura indicam que alguns problemas térmicos podem ser resolvidos por meio de um planejamento cuidadoso das janelas, e que é possível obter redução de custos ao se fazer escolhas adequadas já nas etapas iniciais do desenvolvimento do projeto (Ahmed *et al.*, 2023).

Dada a ausência de dados empíricos nas fases iniciais de projeto de um edifício, a simulação computacional torna-se uma ferramenta essencial para a

avaliação do desempenho térmico (Troup *et al.*, 2019). Por meio dela, é possível prever o comportamento térmico de diferentes soluções construtivas, subsidiando decisões projetuais mais eficientes, como a definição otimizada das dimensões das aberturas para ventilação, sua adequada localização na edificação e a escolha dos materiais mais apropriados, tudo isso, em conformidade com as normas técnicas que regulamentam o desempenho térmico de edificações, como é o caso das NBR 15575 (ABNT, 2024) e NBR 15220 (ABNT, 2024).

1.1 JUSTIFICATIVA

Uma edificação mal projetada além de estar suscetível a manutenções precoces, pode proporcionar aos usuários desconforto durante sua utilização, principalmente, devido as altas temperaturas internas da edificação, sobretudo em locais caracterizados por climas quentes, influenciando cada vez mais a utilização de acondicionamento artificial.

Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), em 2023, o setor residencial respondeu por 31% do consumo total de eletricidade do país, ocupando a segunda posição entre os maiores consumidores, ficando atrás apenas do setor industrial, que representou 35% do consumo. E grande parcela responsável pelo consumo da eletricidade nesse mesmo ano, foi devido a posse e ao uso de aparelhos de climatização a fim de controlar as altas temperaturas nas habitações (EPE, 2024).

No Brasil, cujo clima é predominantemente tropical, estratégias como a utilização de ventilação natural é recomendada para até 99% das cidades do país, exceto aquelas localizadas na zona bioclimática 1, que apresentam temperaturas mais baixas (Tibúrcio, 2017). Dessa forma, a necessidade de se construir edificações com melhores desempenhos térmicos e, por conseguinte, mais eficientes energeticamente, se torna de extrema relevância, especialmente na cidade de Recife, cujo clima é quente e úmido. Para isso, estudos visando alternativas de melhoria no desempenho térmico são indispensáveis. Visto isso, nos capítulos a seguir do presente trabalho será analisada a influência da variação da relação janela-parede (WWR), a implementação de vidro cinza em substituição ao incolor, que é o tradicionalmente empregado, e aumento do fator de abertura para ventilação na melhoria, ou não, do desempenho térmico de um residencial.

1.2 OBJETIVOS

No presente tópico serão mencionados os objetivos gerais e específicos do estudo a seguir.

1.2.1 Objetivo geral

Este trabalho visa avaliar o desempenho térmico de uma edificação multifamiliar localizada na zona bioclimática 5A

1.2.2 Objetivos específicos

a) Analisar os indicadores de desempenho térmico da NBR 15575:2024 com auxílio de simulação computacional.

b) Analisar a influência que o aumento do WWR pode ocasionar no resultado de desempenho térmico.

c) Analisar o impacto da mudança do tipo de vidro das janelas no desempenho térmico do edifício.

d) Avaliar o efeito do aumento do fator de abertura para ventilação na melhora dos indicadores de desempenho térmico.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A presente seção tem como objetivo reunir os principais conceitos teóricos que fundamentam este trabalho, servindo de base para a análise do desempenho térmico da edificação estudada. Além da introdução do uso de software para o estudo de desempenho térmico, serão abordados itens importantes para o entendimento dos indicadores e para a classificação da edificação quanto ao nível de desempenho térmico. Ademais, se faz necessário compreender os mecanismos físicos envolvidos nas estratégias de climatização, como a ventilação natural, o tipo de vidro associado e a proporção entre janelas e paredes, sendo essas as principais variáveis do presente estudo.

2.1 DESEMPENHO TÉRMICO DE EDIFICAÇÕES

Segundo Akutsu e Lopes (1988), o desempenho térmico de uma edificação está diretamente relacionado à interação entre a construção e o ambiente ao seu redor. O conforto térmico em uma edificação é influenciado por diversos fatores de exposição, que englobam condições climáticas, de implantação e de uso. Entre os principais elementos ambientais que afetam o desempenho térmico, destacam-se a temperatura e umidade do ar, a velocidade e direção dos ventos, além da radiação solar. As condições de implantação incluem aspectos como latitude, longitude, topografia e orientação solar, enquanto as condições de uso abrangem o número de ocupantes, as atividades desenvolvidas, os equipamentos utilizados, a quantidade de calor e umidade gerada no ambiente e a taxa de renovação do ar. Além disso, a eficiência térmica da edificação está diretamente relacionada às características de seus materiais e componentes construtivos, incluindo, absorvância e refletância da radiação solar, emissividade das superfícies, condutibilidade térmica, calor específico e massa específica dos materiais. Esses elementos são essenciais para compreender o comportamento térmico das edificações e seus componentes (Akutsu, apud Spannenberg, 2006, p. 56).

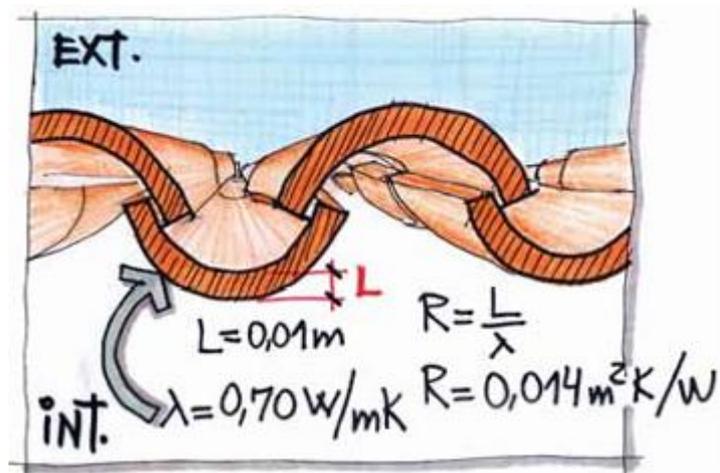
Segundo Lamberts *et al.* (2004), A condutividade térmica (λ) dada em (W/m.K) é uma propriedade física dos materiais que expressa a sua capacidade de conduzir calor. Essa propriedade depende diretamente da densidade do material, pois, quanto

maior a densidade, maior tende a ser a condutividade térmica, ou seja, o material transfere calor com mais facilidade.

Ainda segundo Lamberts *et al.* (2004) a resistência térmica (R_t), dada em ($m^2.K/W$), de um material representa sua capacidade de resistir a transferência de calor. Quanto maior for sua espessura, maior será essa resistência, reduzindo a passagem do calor pelo material, e pode ser representada pela equação (1), sendo (L) a espessura do material e (λ) a condutividade térmica. Na figura 1, é possível visualizar a representação do cálculo da resistência térmica de uma telha de barro, sendo a condutividade térmica de $0,70 W/m.K$.

$$R_t(m^2K/W) = \frac{L}{\lambda} \quad (1)$$

Figura 1 – Representação da resistência térmica de uma telha de barro



Fonte: Lamberts; Dutra; Pereira (2014, p 211)

Ainda segundo o autor, o inverso da resistência térmica denomina-se transmitância térmica (U) dado em ($W/m^2.k$) e por meio dela é possível analisar o desempenho de um fechamento opaco frente à transmissão de calor. A transmitância pode ser obtida conforme disposto na equação (2), sendo R_t a resistência térmica do material.

$$U(W/m^2K) = \frac{1}{R_t} \quad (2)$$

A absorptância, também chamada de absorptividade (α), é a propriedade dos materiais de construção que determina a quantidade de radiação que é absorvida por sua superfície. Esse comportamento depende, principalmente, da cor superficial do material, ou seja, superfícies escuras tendem a absorver uma maior parcela da radiação incidente, enquanto superfícies claras refletem a maior parte da radiação e absorvem menos calor. Quando um material absorve radiação, parte dessa energia é convertida em calor, elevando sua temperatura. Esse calor pode ser parcialmente reemitido para o ambiente externo e interno, influenciando o conforto térmico dentro das edificações. A quantidade de energia reemitida está diretamente relacionada à emissividade (ϵ) do material, ou seja, sua capacidade de emitir radiação térmica (Lamberts *et al.*, 2014). Ao combinar uma baixa absorptância de um determinado fechamento com uma baixa emissividade, esse material irá absorver menos calor e não irá transferir a radiação de forma rápida para o ambiente. Esses parâmetros são importantes, pois, quando combinados podem reduzir a sensação de calor no interior do ambiente. Abaixo, no quadro 1, é possível verificar a combinação da emissividade e absorptância de alguns materiais. É possível verificar que o vidro possui uma alta emissividade, ou seja, é um material que influenciará significativamente na mudança da temperatura interna da edificação, visto isso, torna-se importante o estudo do impacto que o uso desse material na fachada causa no desempenho térmico.

Quadro 1 - Valores de absorptividade (α) e emissividade (ϵ) de alguns materiais

TIPO DE SUPERFÍCIE		α	ϵ
Chapa de alumínio (nova e brilhante)		0,05	0,05
Chapa de alumínio (oxidada)		0,15	0,12
Chapa de aço galvanizada (nova e brilhante)		0,25	0,25
Caiação nova		0,12 / 0,15	0,90
Concreto aparente		0,65 / 0,80	0,85 / 0,95
Telha de barro		0,75 / 0,80	0,85 / 0,95
Tijolo aparente		0,65 / 0,80	0,85 / 0,95
Reboco claro		0,30 / 0,50	0,85 / 0,95
Revestimento asfáltico		0,85 / 0,98	0,90 / 0,98
Vidro comum de janela		transparente	0,90 / 0,95
Pintura:	branca	0,20	0,90
	amarela	0,30	0,90
	verde claro	0,40	0,90
	“alumínio”	0,40	0,50
	verde escuro	0,70	0,90
	vermelha	0,74	0,90
	preta	0,97	0,90

Fonte: Lamberts; Dutra; Pereira (2014, p 209)

Diversas edificações enfrentam problemas de conforto térmico, seja com temperaturas internas altas no verão ou baixas no inverno, causando sensações térmicas desconfortáveis para os usuários. Esse cenário geralmente está ligado à falta de aproveitamento das condições climáticas locais ainda na fase de projeto. Porém, a adoção de estratégias como a ventilação natural eficiente, a escolha adequada de materiais e a definição correta dos sistemas construtivos pode contribuir significativamente para a criação de ambientes mais confortáveis (Maciel, 2013).

Alguns estudos apontam que modificações simples ainda em fase de projeto podem melhorar significativamente o desempenho térmico das edificações. De acordo com Giovanaz, Kristiner e Sartori (2020), a escolha dos materiais e métodos construtivos exerce uma influência significativa no desempenho, impacta diretamente o conforto dos moradores e a eficiência energética das edificações. Um estudo realizado pelos os autores revelou que mudanças simples nos materiais e componentes dos telhados e sistema de vedação, juntamente com a escolha correta de cores de baixa absorvância para fachadas e telhas, podem melhorar de forma eficiente o desempenho térmico da edificação, bem como, reduzir em até 43% na carga térmica do apartamento.

Ainda segundo Spannenberg (2006) indica que a substituição de telhas de fibrocimento por telhas cerâmicas melhora o desempenho térmico, assim como, a adoção de uma manta isolante com face aluminizada voltada para as telhas, pode ser uma medida eficaz de baixo custo e benéficamente ecológica.

Um estudo realizado por Ghisi e Massignani (2007), chegou-se à conclusão que reduzir o valor da transmitância dos materiais e minimizar a área exposta das fachadas são estratégias eficientes para melhorar o conforto térmico da edificação nos períodos de verão.

Portanto, de forma a garantir um desempenho térmico adequado em edificações, é primordial que os projetistas compreendam as propriedades dos materiais construtivos e adaptem os projetos às condições climáticas da região onde serão implantados.

2.2 NORMAS DE DESEMPENHO TÉRMICO

A qualidade de uma moradia influencia diretamente o conforto e a satisfação dos seus moradores, pois seu desempenho reflete a capacidade de atender às necessidades básicas de habitabilidade. Segundo Akutsu (1988 apud Spannenberg, 2006, p. 56), “A avaliação do desempenho térmico de uma edificação consiste basicamente em verificar se o ambiente interno atende ou não a um conjunto de requisitos prefixados em função das exigências do usuário quanto ao seu conforto térmico”.

Atualmente, no Brasil, existem duas normas vigentes que trata do desempenho térmico de edificações, são elas a NBR 15220 - Desempenho térmico de edificações (ABNT, 2024) e a NBR 15575 - Edificações habitacionais - Desempenho Parte 1: Requisitos gerais (ABNT, 2024). Neste trabalho, a metodologia será executada em torno das exigências da NBR 15575:2024, no entanto, utilizando como auxílio algumas especificações da NBR 15520:2024.

2.2.1 NBR 15220 (ABNT, 2024)

A norma NBR 15220 (ABNT, 2024) foi elaborada pelo Comitê Brasileiro de Construção Civil, e atualmente ela se encontra dividida em 3 partes. A parte 1, refere-se a conceitos e definições importantes para o entendimento das partes posteriores da norma, bem como apresentação dos símbolos e as unidades utilizadas no texto normativo.

A parte 2 da norma define os métodos de cálculo para avaliar os parâmetros térmicos dos elementos e componentes das edificações, que são transmitância térmica, capacidade térmica, atraso térmico e fator solar.

Já na parte 3 da norma trata do zoneamento bioclimático brasileiro, com base em dados de temperatura, umidade, radiação solar e vento, dividindo o território em 12 zonas climáticas, apresentando arquivos climáticos e algumas características físicas de cidades representativas.

A norma na sua parte 2, não traz mais propriedades térmicas de materiais usuais na construção civil, assim como era abordado na norma de 2003. Dessa forma, para realizar a inserção de dados em algumas etapas da simulação no software, serão

utilizadas algumas especificações da norma anterior quanto às propriedades termo físicas de alguns materiais e componentes da edificação.

2.2.2 NBR 15575 (ABNT, 2024)

A NBR 15575 foi elaborada pelo Comitê Brasileiro de Construção Civil e sua primeira versão foi de 2008. O principal enfoque dessa norma é estabelecer os requisitos mínimos obrigatórios de desempenho para sistemas das edificações, incluindo o de desempenho térmico. Essa norma leva em consideração as necessidades dos usuários e as condições de exposição ao longo de sua vida útil mínima. Desde o ano de sua publicação, essa norma está dividida em seis partes principais, sendo que a parte 1 define os requisitos gerais e as demais partes são relativas ao desempenho relativo aos principais sistemas que compõe uma edificação habitacional.

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

A publicação em 2008 da primeira versão da norma brasileira de desempenho, abrangia, inicialmente, apenas edificações habitacionais com até cinco pavimentos. Durante seu desenvolvimento, o texto passou por amplas discussões envolvendo diferentes setores da cadeia produtiva da construção civil, enfrentando desafios e contestações. Até que, finalmente, no ano de 2013, uma versão revisada e mais detalhada entrou oficialmente em vigor no Brasil, ampliando seu escopo para abranger edificações habitacionais de qualquer porte (Nunes *et al.*, 2021).

Mesmo após ter passado por revisões e ter ganhado especificações mais detalhadas, a norma de desempenho do ano de 2013 ainda possuía lacunas em seu texto e enfrentava desafios quanto à sua aplicação no mercado da construção. Um

estudo realizado por Gealh (2019), buscou analisar de forma crítica a implantação da NBR 15575 em construtoras e incorporadoras e, dentre as conclusões obtidas no estudo, a autora enfoca que o comprometimento e a participação dos projetistas na aplicação da Norma de Desempenho ainda são pouco expressivos. Além disso, ela retrata que a falta de alinhamento com certas normas prescritivas e legislações vigentes, além da falta de clareza no corpo do texto, possibilita interpretações divergentes, e com isso levou a NBR 15575 a passar por novas revisões.

Diante das limitações o Laboratório de Eficiência Energética (LabEEE) iniciou, em 2018, a elaboração de uma proposta para revisar a análise de desempenho térmico da NBR 15575. Após um período de desenvolvimento e aprimoramento do novo método, em 2020, o texto revisado foi submetido à Comissão de Estudos da ABNT. Após debates, a emenda da norma foi disponibilizada para consulta nacional entre 17 de novembro e 16 de dezembro de 2020, e foi novamente publicada no início de 2021.

De acordo com Sorgato *et al.* (2012), no texto em consulta, foram identificadas modificações que impactam negativamente o desempenho térmico das edificações. Dentre essas mudanças, destacam-se as aberturas para ventilação; sombreamento e método de simulação. Atualmente, no momento da realização desse trabalho, a norma encontra-se em sua versão mais nova, no ano de 2024, portanto, as especificações utilizadas durante o trabalho irão se referir a NBR 15575:2024.

Na antiga versão de 2013, as simulações eram realizadas com base em dados horários de apenas dois dias do ano: o dia típico de verão, e o dia típico de inverno, escolhidos a partir dos dias mais quente e mais frio do ano, respectivamente. No modelo atual, passou-se a utilizar dados diários ao longo de todo o ano, abrangendo as 8760 horas anuais (Veiga, 2023).

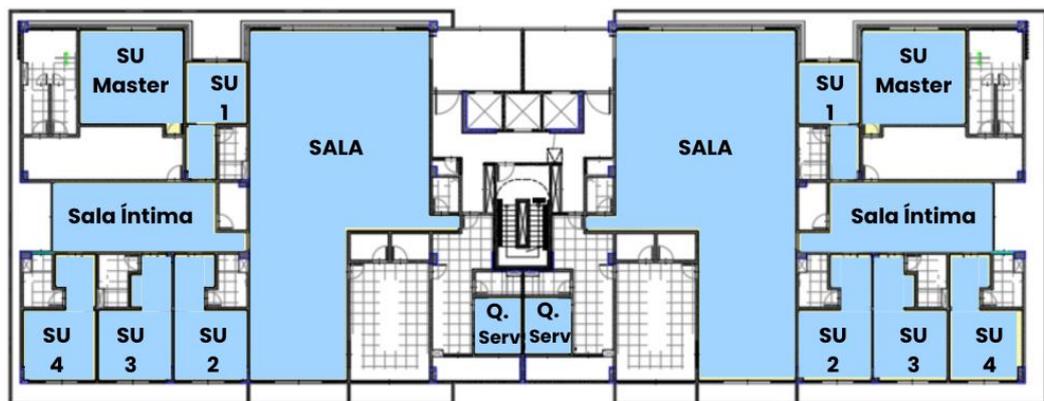
2.2.3 Ambientes de permanência prolongada (APP) e transitória (APT)

Para a realização da análise de desempenho térmico de um edifício, primeiramente deve ser estipulado quais são os ambientes de permanência prolongada (APP) da unidade habitacional (UH). A NBR 15575 (ABNT, 2024) considera dormitórios e salas de estar como sendo ambientes de permanência prolongada. Além disso, ambientes que forem utilizados como salas e como

dormitórios integrados (por exemplo, quitinetes e similares), estes devem ser modelados sendo considerados ambientes de permanência prolongada de uso misto. Ou seja, os APP são considerados os ambientes nos quais os usuários permanecem por longos períodos de tempo.

A figura 2, apresenta um croqui da planta baixa do pavimento tipo do edifício que será analisado no presente estudo. Para a simulação serão considerados ambientes de permanência prolongada (APP) os quartos, suítes, salas íntimas e salas de estar, conforme apresentados e marcados em azul no croqui da figura 2. Ambientes como banheiros, hall e corredores serão considerados ambientes de permanência transitória (APT), assim como diz a norma.

Figura 2 – Croqui dos ambientes de permanência prolongada (APP) da edificação



Fonte: o autor (2025)

2.2.4 Comparação com modelo de referência

A norma atual traz a realização da análise do desempenho térmico por meio da simulação computacional, a partir da comparação entre dois modelos propostos, um real e um de referência. O modelo físico precisa reproduzir a edificação em estudo, levando em conta suas características de volume, proporção de elementos envidraçados e aberturas para ventilação, propriedades térmicas dos materiais construtivos e a presença de dispositivos fixos de sombreamento na fachada, caso existam (como brises, beirais e venezianas) (NBR 15575-1 (ABNT, 2024)).

Com relação ao modelo de referência, ele deve representar a edificação adotando-se características de referência. Este modelo deve manter a volumetria do modelo real, alterando os percentuais de elementos transparentes e de aberturas para

ventilação, bem como as propriedades térmicas dos sistemas construtivos, que serão detalhadas na seção de metodologia.

2.2.5 Consideração de cargas internas

Na modelagem da edificação deve ser considerado a ocorrência de cargas internas por meio da ocupação dos usuários nos APP e do uso de iluminação artificial e de equipamentos, sendo realizada igualmente para o modelo real e para o modelo de referência. A própria norma estabelece horários padrões de uso e ocupação dos ambientes de permanência prolongada, para salas, dormitório e uso misto. Essa especificação, tem como propósito aproximar a modelagem de uma condição mais realista de exposição da unidade habitacional (UH), e está inserida no estudo na seção de metodologia do presente trabalho.

2.2.6 Usos da edificação quanto a ventilação

Krelling *et al.* (2020) esclarece que a modelagem conforme a norma, permite duas condições de uso da habitação, com ventilação natural e sem ventilação natural. O novo método propõe considerar a abertura de janelas, ou seja, as janelas podem ser operáveis, de tal maneira que possibilite a ventilação a partir de parâmetros de velocidade e direção do vento presentes no arquivo climático utilizado. Diversas considerações, como, taxa de infiltração, temperatura limite para operação e propriedades termo físicas, serão detalhadas nos itens a seguir de metodologia deste trabalho.

2.2.7 Indicadores de desempenho térmico

A NBR 15575:2024 traz a proposta de três indicadores de desempenho térmico, são eles: Percentual de Horas ocupadas dentro de uma faixa de Temperatura operativa (PHFT), as Temperaturas operativas anuais máxima (Tomáx) e mínima (Tomín), e a Carga Térmica Total (CgTT). Todos eles devem ser analisados tanto para o modelo real quanto ao de referência.

2.2.7.1 Temperaturas Operativas Anuais Máxima (Tomáx) e Mínima (Tomín)

As temperaturas Tomáx e Tomín são determinadas com base nas temperaturas operativas horárias de cada Ambiente de Permanência Prolongada (APP) durante o período de ocupação. Ou seja, para a obtenção desse parâmetro, basta solicitar no software EnergyPlus a variável de saída (output) Zone Operative Temperature, e analisar as situações em que os APP estão sendo ocupado. Feito isso, basta retirar os valores extremos de temperatura e definir a partir da maior e da menor temperatura registrada entre todos os APP durante o ano, qual será a Temperatura Operativa Máxima (Tomáx) e Temperatura Operativa Mínima (Tomín), respectivamente. Vale destacar, que devido ao clima quente, a zona bioclimática 5A do trabalho em questão não se aplica a utilização da Tomín, apenas será avaliada a Tomáx (NBR 15575-1 (ABNT, 2024)).

2.2.7.2 Percentual de Horas Ocupadas Dentro de uma Faixa de Temperatura Operativa (PHFT)

O procedimento para o cálculo do PHFT começa com a obtenção da temperatura externa de bulbo seco (TBS). O arquivo climático, que se refere ao arquivo digital que reúne dados meteorológicos históricos e estatísticos de um local específico, fornece na sua base de dados a temperatura externa de bulbo seco. Com ela em mãos, é possível calcular a sua média e, dessa forma, obter a temperatura externa de bulbo seco média (TBS_m).

A temperatura de bulbo seco média (TBS_m) é importante para saber em qual intervalo de temperatura externa a cidade simulada estará inserida, conforme a NBR 15575 (ABNT, 2024). O quadro 2 abaixo, retirada da norma, fornece os intervalos de classificação. (NBR 15575-1(ABNT, 2024)).

Quadro 2 – Intervalos de temperatura externa de bulbo seco média (TBS_m)

Intervalos de temperaturas externas	Média anual da temperatura externa de bulbo seco (TBS _m) °C
Intervalo 1	TBS _m < 25,0 °C
Intervalo 2	25,0 °C ≤ TBS _m < 27,0 °C
Intervalo 3	TBS _m ≥ 27,0 °C

Fonte: ABNT NBR 15575-1 (2024)

O PHFT é um indicador que somente é calculado em momentos de ocupação do APP, como também, apenas em simulações com uso da ventilação natural. É um tipo de indicador que analisa o percentual de horas em que a UH encontra-se dentro de uma faixa de temperatura operativa pré-estabelecida, consideradas no período de ocupação de cada APP durante o ano. O quadro 3 abaixo, fornece as faixas de temperatura a serem consideradas para o cálculo do PHFT a depender do intervalo obtido na tabela 1 já vista anteriormente. Por exemplo, a cidade de Recife cuja TBSm é aproximadamente 25,75°C, está inserida no intervalo 2, dessa forma, serão contabilizadas as horas para o cálculo do PHFT apenas os momentos em que o APP está ocupado e se encontra com temperaturas operativas abaixo de 28°C.

Quadro 3 - Faixas de temperaturas operativas para a determinação do PHFT,APP

Intervalos de temperaturas externas	Faixa de temperatura operativa a ser considerada
Intervalo 1	18,0 °C < T _{OAPP} ^a < 26,0 °C
Intervalo 2	T _{OAPP} < 28,0 °C
Intervalo 3	T _{OAPP} < 30,0 °C
^a T _{OAPP} é a temperatura operativa do APP, que atende aos limites estabelecidos nesta Tabela.	

Fonte: ABNT NBR 15575-1 (2024)

Sabendo qual é a faixa de temperatura operativa que será contabilizada para o cálculo do PHFT, o resultado do indicador passa a obedecer a uma equação básica. No software de simulação deverá ser solicitado como variável de saída da análise a temperatura operativa referente a cada hora do ano, e as horas de ocupação de cada ambiente, com esse dado de saída, é possível encontrar o numerador da equação, o Nhft:

- **Nhft:** Refere-se ao número de horas em que o APP se encontra ocupado e com temperaturas operativas dentro da faixa de temperatura operativa, estabelecida no Quadro 3, ao longo do ano.

O denominador da equação já é estipulado pela norma e significa:

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

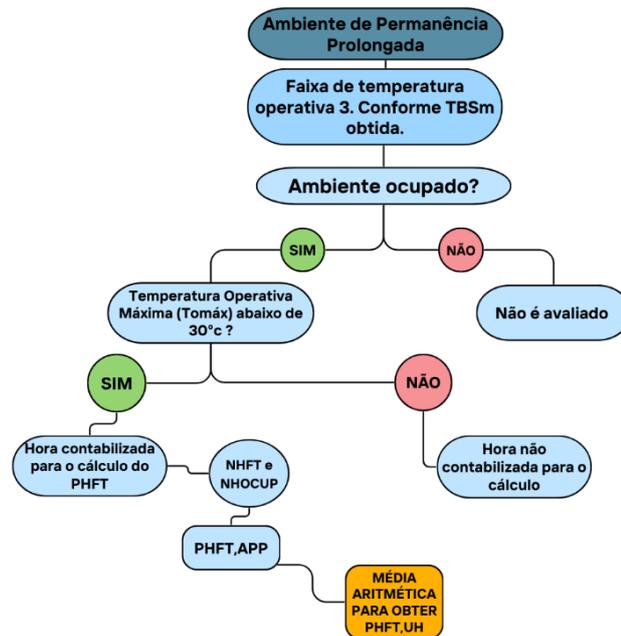
Dessa forma, por meio da equação (3), é possível calcular o PHFT para cada Ambiente de Permanência Prolongada (APP) (NBR 15575-1(ABNT, 2024)).

$$PHFT, APP(\%) = \frac{Nhft}{Nhocup} \quad (3)$$

Por fim, para determinar o PHFT da unidade habitacional (UH) basta realizar a média aritmética do PHFT de cada ambiente de permanência prolongada, assim como apresentado na equação (4), sendo (n) o número de APP da edificação. Abaixo na figura 3, pode ser visualizado um exemplo do procedimento de cálculo do PHFT para uma cidade localizada no intervalo 3 conforme quadro 3;

$$PHFT, UH(\%) = \frac{\sum PHFT, APP}{n} \quad (4)$$

Figura 3 – Procedimento para o cálculo do PHFT



Fonte: o autor (2025)

2.2.7.3 Carga Térmica Total (CgTT):

Segundo a NBR 15575-1(ABNT, 2024), carga térmica total (CgTT) representa a soma das Cargas Térmicas anuais de Refrigeração (CgTR) e Aquecimento (CgTA). Esse indicador é calculado para simulações realizadas sem ventilação natural, e

representa a quantidade de carga térmica necessária para deixar o ambiente dentro da faixa de temperatura operativa quando em ocupação. Além do mais, para cidades localizadas na zona bioclimática 5A, como a cidade de Recife, não deverá ser utilizado o cálculo da CgTA.

O cálculo desse indicador é bem simples, conforme equação (5), basta solicitar no software de simulação o output (Zone Ideal Loads Zone Total Cooling Energy) que fornece a carga térmica de resfriamento para as horas do ano no qual os APP estão sendo ocupados. O somatório da carga térmica será realizado em situações em que a temperatura do APP está fora dos limites de temperatura operativa estabelecido no Quadro 4.

$$CgTR, UH(kWh/ano) = \sum_{i=1}^n CgTR, APP, i \quad (5)$$

Quadro 4 - Faixas de temperaturas operativas para a determinação da CgTR,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	$T_{OAPP}^a \geq 26,0^{\circ}C$	$T_{OAPP} \leq 18,0^{\circ}C$
Intervalo 2	$T_{OAPP} \geq 28,0^{\circ}C$	Não considera
Intervalo 3	$T_{OAPP} \geq 30,0^{\circ}C$	Não considera
^a T_{OAPP} é a temperatura operativa do APP considerada para o cálculo da CgTR _{APP} e da CgTA _{APP} .		

Fonte: ABNT NBR 15575-1 (2024)

2.2.8 Níveis de desempenho térmico

A norma NBR 15575-1 (ABNT, 2024) estabelece critérios de avaliação do desempenho térmico de edificações habitacionais por meio de três níveis de classificação: mínimo, intermediário e superior. O nível de desempenho mínimo é de caráter obrigatório exigido pela norma, enquanto a classificação de nível intermediário e superior é de caráter não obrigatório.

2.2.8.1 Nível de desempenho mínimo

A NBR 15575 (ABNT, 2024) estabelece para o atendimento ao critério de PHFT,UH no nível mínimo (M), o resultado que obedece ao disposto na equação (6), ou seja, o PHFT,UH do modelo real seja superior a 90% do valor obtido para o PHFT,UH do modelo de referência.

$$\text{Nível mínimo (M)} = PHFT,UH(\text{real}) > 0,9 * (PHFT,UH(\text{ref})) \quad (6)$$

Além disso, para atender ao nível mínimo a temperatura operativa máxima da unidade habitacional no modelo real não deve ser maior que a Tomáx do modelo de referência somada a um valor de tolerância da temperatura operativa anual máxima expressa em °C ($\Delta Tomáx$), conforme equação (7). O valor de $\Delta Tomáx$ é estipulado pela norma, e será considerado 2°C para o pavimento de cobertura, e 1°C para o pavimento tipo e térreo.

$$\text{Nível mínimo (M)} = Tomáx,UH(\text{real}) \leq Tomáx,UH(\text{ref}) + \Delta Tomáx \quad (7)$$

2.2.8.2 Nível intermediário e superior

O cumprimento dos critérios referentes aos níveis de desempenho térmico intermediário e superior possui caráter não obrigatório e podem ser feitos por meio dos critérios do quadro 5, quadro 6 e Anexo A. O método de avaliação consiste na capacidade de incremento do PHFT,UH,real ($\Delta PHFT$) e de redução da carga térmica total (RedCgTT) do modelo real em relação ao modelo de referência (ABNT NBR 15575 (ABNT, 2024)).

Esses incrementos são o $\Delta PHFT$ e a RedCgTT e são analisados em comparação com os valores mínimos estabelecidos, determinados como $\Delta PHFT_{mín}$ e $RedCgTT_{mín}$, conforme o Anexo B e C desse trabalho.

Quadro 5 – Critério de avaliação quanto ao PHFT,UH

Nível de desempenho	Critério
Mínimo (M)	$PHFT,UH(real) > 0,9 * (PHFT,UH(ref))$
Intermediário (I)	$\Delta PHFT^a \geq \Delta PHFT, min^b$
Superior (S)	$\Delta PHFT \geq \Delta PHFT, min$
a $\Delta PHFT$ é o incremento do PHFT,UH,real em relação ao PHFT,UH,ref	b $\Delta PHFT, min$ é o incremento mín do PHFT,UH,real em relação ao PHFT,UH,ref, com valor para (I) na tabela do Anexo B e para (S) na tabela do anexo C.

Fonte: Adaptada NBR 15575-1 (ABNT, 2024)

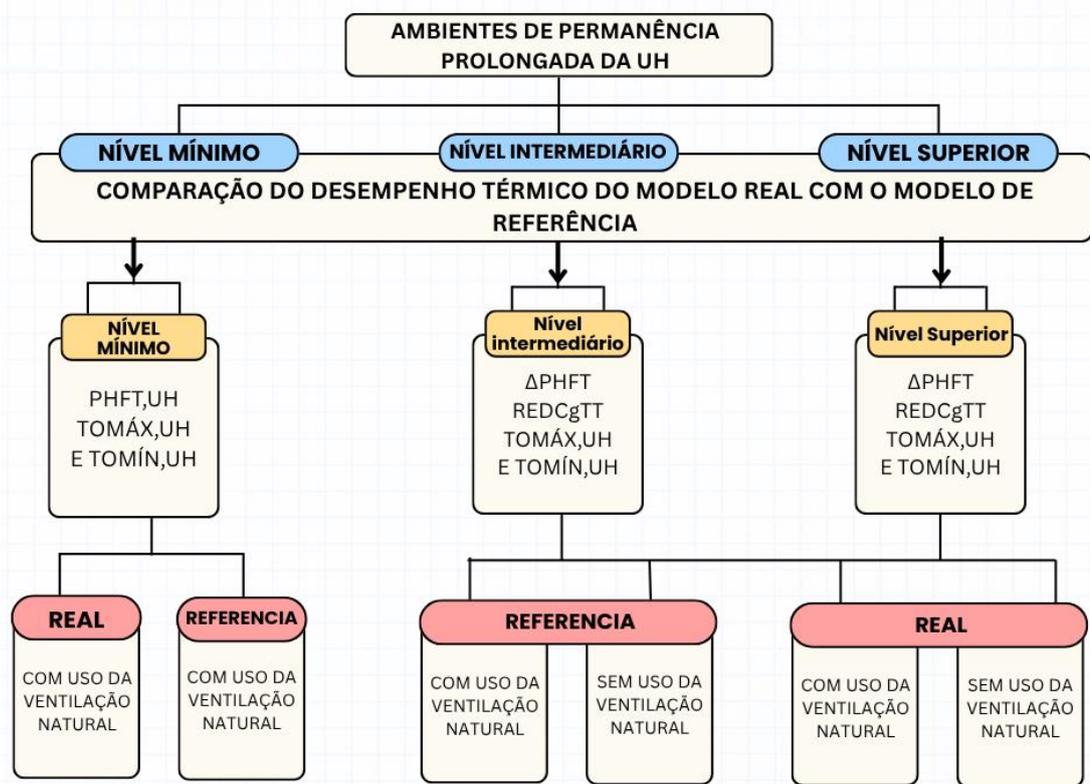
Quadro 6 – Critério de avaliação quanto à CgTT,UH

Nível de desempenho	Critério
Mínimo (M)	<i>Não considera</i>
Intermediário (I)	$RedCgTT^a \geq RedCgTT, min^b$
Superior (S)	$RedCgTT \geq RedCgTT, min$
a $RedCgTT$ é a redução total da CgTT,UH,real em relação ao CgTT,UH,ref	b $RedCgTT, min$ é a redução mín da CgTT,UH,real em relação a CgTT,UH,ref, com valor para (I) na tabela do Anexo B e para (S) na tabela do anexo C.

Fonte: Adaptada NBR 15575-1 (ABNT, 2024)

A partir dos cálculos dos indicadores de desempenho térmico apresentados anteriormente e dos níveis de classificação apresentados nessa seção, a figura 4 abaixo fornece um fluxograma que resume o procedimento de análise do desempenho térmico por meio da simulação computacional. Em casos de análises em edifícios multifamiliares deverá ser considerado na simulação o pavimento de cobertura, o tipo e o térreo, com todas UH do pavimento sendo avaliadas.

Figura 4 – Procedimento de análise de desempenho térmico com simulação computacional



Fonte: Adaptado ABNT NBR 15575:2024

2.3 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL APLICADA AO DESEMPENHO TÉRMICO

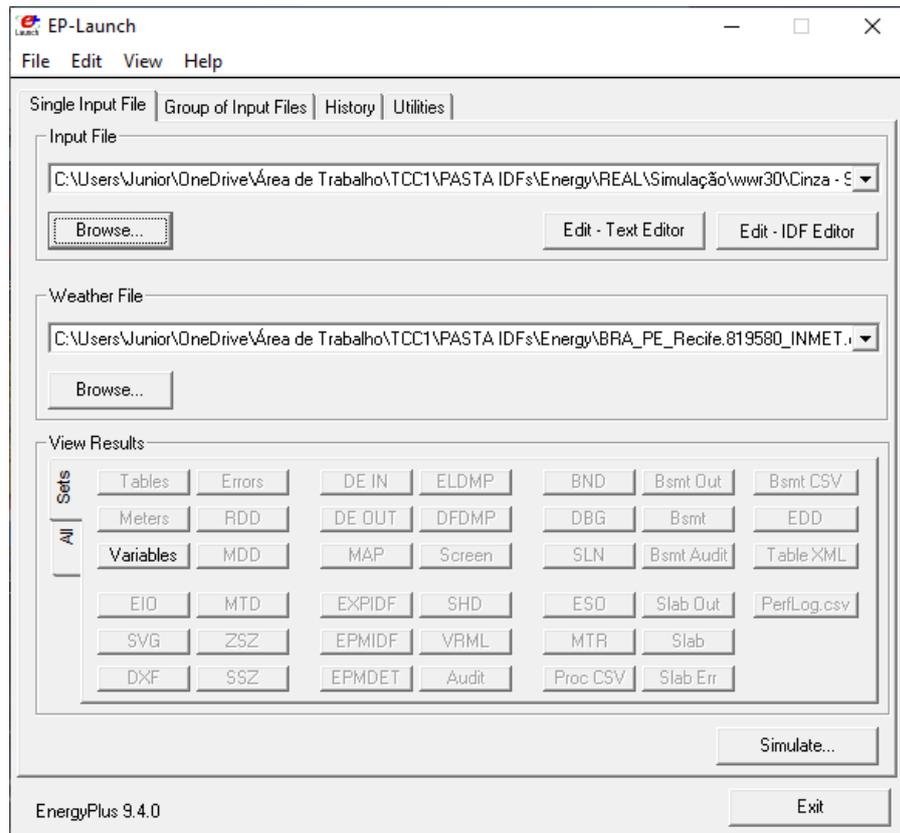
Os primeiros programas de simulação computacional para desempenho térmico surgiram em meados da década de 70, quando utilizavam computadores mainframe para o desenvolvimento e aprimoramento dessas ferramentas. Dentre essas ferramentas, vale o destaque para o programa NBSLD, que acabou se tornando uma referência, como também um abrigo de portas para outros simuladores de edificações mais tecnológicos que vieram surgir mais adiante, como DOE-2, BLAST, RADIANCE e ESP-r. Com o constante avanço dos recursos computacionais, tornou-se possível o desenvolvimento de programas mais modernos e sofisticados, tais como CFX, FLUENT, PHOENICS e o ENERFGY PLUS (Mendes *et al.*, 2005).

O EnergyPlus é um programa de simulação criado a partir dos softwares BLAST e DOE-2, e disponibilizado pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos. Ele foi projetado para realizar análises energéticas e simulações de carga

térmica em edificações e seus sistemas associados. O software se destaca por funcionalidades avançadas, como a simulação em intervalos de tempo menores que uma hora, sistema modular, possibilidade de modelar a infiltração de ar de forma individualizada por zona térmica, avaliação de conforto térmico e compatibilidade com outros sistemas (Melo *et al.*, 2009).

O EnergyPlus marcou a nova geração de softwares para simulação termo energética de edificações, consolidando-se como uma das ferramentas mais abrangentes, precisas e detalhadas disponíveis na área. Para realizar simulações termo energéticas no software, são necessários dois arquivos de entrada em formato texto. O primeiro é o Arquivo de Entrada de Dados (Input Data File) cuja extensão é IDF, que contém todas as informações físicas da edificação, como características da envoltória, sistemas de climatização e uso do edifício. O segundo é o Arquivo Climático EnergyPlus que possui a extensão EPW, e que fornece os dados climáticos da localidade para as 8760 horas do ano, baseando-se em registros históricos com seus respectivos tratamentos estatísticos (Mochizuki, 2014). O arquivo climático é inserido no campo de preenchimento “Weather File” apresentado na interface inicial do energy plus como está sendo mostrado na figura 5.

Figura 5 – Interface inicial: EP-launch do software EnergyPlus

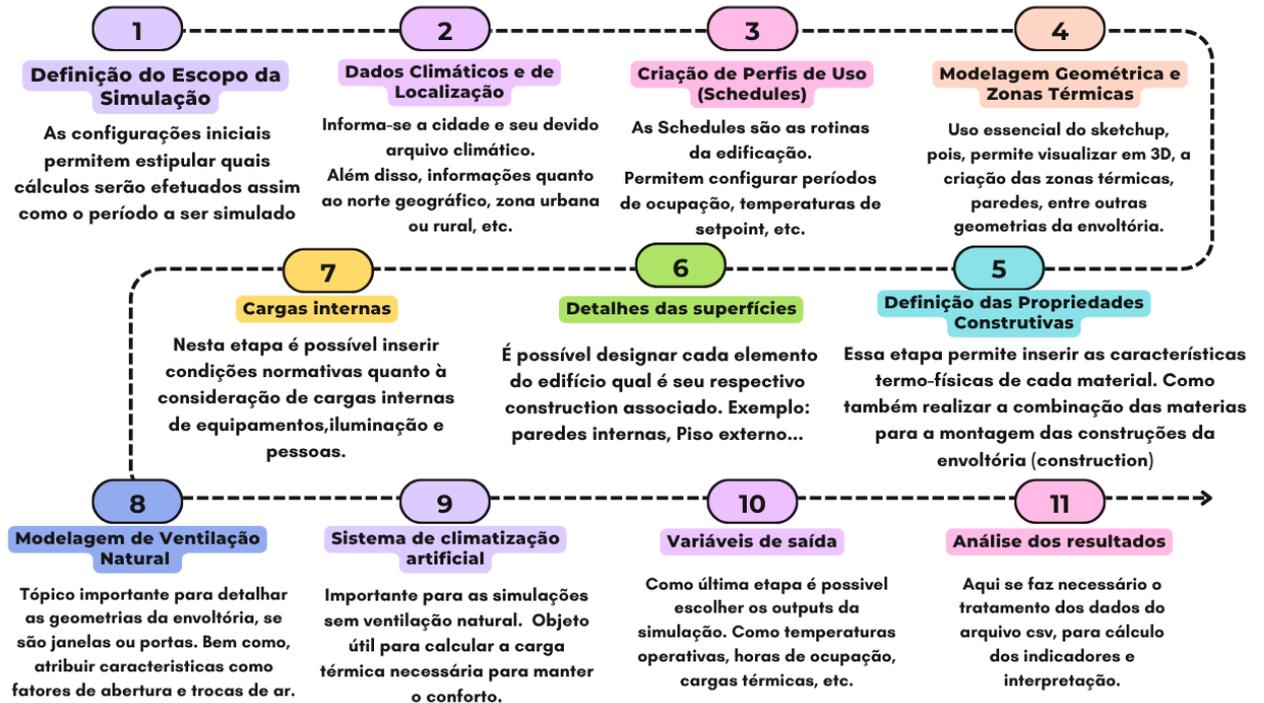


Fonte: o autor (2025)

No presente trabalho, será utilizado o programa EnergyPlus para realizar as análises de desempenho térmico, como também será utilizado o arquivo climático da cidade de Recife-PE. As informações de cargas internas e ocupação serão retiradas das normas de desempenho térmico, e serão abordadas na metodologia.

O EnergyPlus possui diversos objetos, no qual é possível realizar as configurações para variados tipos de simulações. Entretanto, para o desempenho térmico de edificações, apenas alguns objetos são realmente úteis. A funcionalidade do EnergyPlus aplicado ao presente trabalho pode ser resumida em forma de fluxograma, conforme apresentado na figura 6, no qual é possível verificar as principais etapas para a realização da simulação no software.

Figura 6 – Fluxograma do procedimento de configuração da simulação no EnergyPlus



Fonte: o autor (2025)

2.4 ELEMENTOS TRANSPARENTES E A VENTILAÇÃO NATURAL

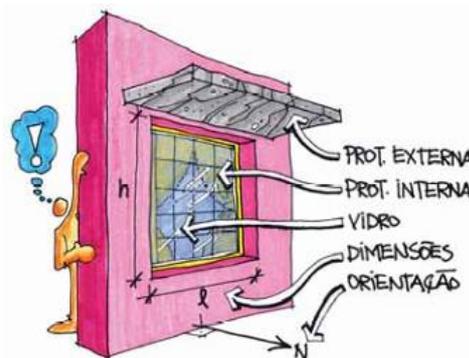
Atualmente o vidro é um elemento indispensável na construção civil, como também, desempenha papel importante para a entrada de luz e circulação de ares nas edificações (Bergamo; Motter, 2014). Segundo Ahmed *et al.* (2023) as janelas desempenham um papel essencial na composição estética dos edifícios, permitindo a entrada da luz natural, ajuda a controlar os ganhos de calor e promove a ventilação natural, contribuindo, dessa forma, para a qualidade do ambiente interno e o conforto dos ocupantes.

Visto a significância dos vidros no ambiente construído, um fator bastante relevante a ser estudado, refere-se à proporção entre janelas e paredes (WWR – Window-to-Wall Ratio), no qual, de acordo com Kim *et al.* (2016) é a medida da área percentual determinada pela divisão da área envidraçada pela área de parede, conforme equação (8). O WWR ao decorrer dos anos tem sido tema de estudo sobre sua influência na demanda energética para o resfriamento de edifícios comerciais.

$$WWR(\%) = \frac{\text{Área envidraçada}}{\text{Área de parede}} \quad (8)$$

Durante a execução de um projeto existem diversas variáveis que são capazes de influenciar e alterar o ganho de calor, alguma delas estão sendo representadas por meio da figura 7, são elas: Orientação e tamanho das aberturas; Tipo de vidro e Uso de proteção solares internas ou externas (Lamberts *et al.*, 2004).

Figura 7 – Variáveis que influenciam no ganho térmico



Fonte: Lamberts; Dutra; Pereira (2014, p 199)

Os vidros geralmente possuem alta transmitância, ou seja, são bons condutores de calor. Por outro lado, são um dos pouquíssimos materiais da construção civil capazes de regular de maneira eficiente a entrada da radiação solar, tanto luminosa quanto térmica. As trocas de calor entre os ambientes interno e externo ocorrem de maneira mais rápida e intensa por meio das superfícies transparentes. Ao se utilizar o vidro simples incolor, grande parte do calor solar que incide sobre as aberturas é transferida diretamente para o interior, devido à elevada transmissividade desse material. Para minimizar esse efeito, é recomendado o uso de vidros com menor transmissividade, como os de controle solar. Esses vidros podem sombrear até 80% da radiação infravermelha, reduzindo o ganho solar e a necessidade de resfriamento Lamberts *et al.*, (2004).

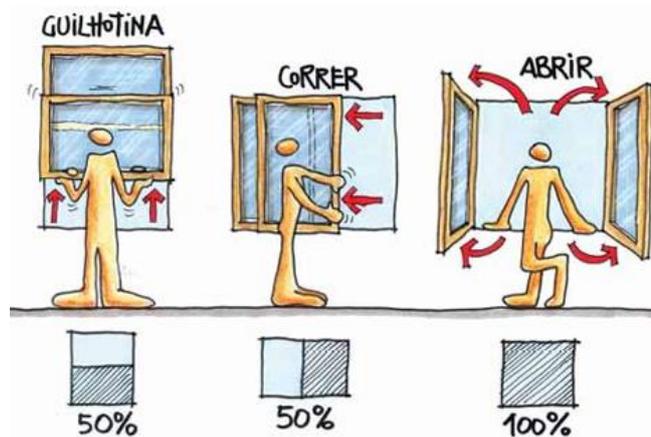
Um estudo realizado por Oliveira e Lunardi (2018), analisou a influência de características arquitetônicas e construtivas no consumo de eletricidade de edificações situadas em Mossoró-RN, de clima tropical semiárido. Foram obtidas informações sobre as características térmicas e geométricas dos componentes arquitetônicos, incluindo o formato da edificação, disposição e uso dos ambientes, orientação cardinal das fachadas, posicionamento de elementos transparentes e propriedades térmicas dos materiais. Como um dos resultados obtidos no estudo o baixo WWR é um fator determinante para minimizar os efeitos da radiação solar no aquecimento da edificação.

Apesar de alguns estudos afirmarem que o aumento de elementos transparentes nas fachadas aumenta, por conseguinte, o desconforto térmico, quando bem combinados com outros fatores, tais como localização na fachada, abertura para ventilação natural e propriedades térmicas, o aumento pode ser benéfico para o desempenho térmico do ambiente.

Um estudo realizado por Amaral *et al.* (2016) conclui que de maneira geral, diferentes tipos de envidraçamento apresentam desempenhos variados conforme a orientação. Dessa forma, é possível determinar o tamanho ideal das janelas em novos edifícios, considerando a orientação, o clima da região e as propriedades físicas da edificação. Assim, ainda durante a fase de projeto é possível realizar a escolha que mais se adapta ao ambiente construído de forma que contribua positivamente para o desempenho térmico.

A ventilação natural é um importante aspecto a ser considerado para o melhoramento do desempenho térmico, e o principal elemento para garantir essa função são as janelas, quanto maior as janelas, maior será a eficiência da ventilação no interior dos ambientes. Porém, um fator bastante importante para que as janelas desempenhem tal função, é a abertura útil para ventilação, que representa a área efetiva de ventilação quando a janela está aberta em operação. As janelas podem ter diferentes configurações de abertura útil, conforme figura 8. Dessa forma, torna-se fundamental analisar a influência dessa variável no desempenho térmico do edifício estudado neste trabalho.

Figura 8 – Janelas com diferentes aberturas úteis para ventilação



Fonte: Lamberts; Dutra; Pereira (2014, p 177)

De acordo com Tibúrcio (2017) regiões de clima quente e úmido, caracterizadas por altas temperaturas, a ventilação natural muitas das vezes se torna a principal estratégia para garantir o conforto térmico. Isso porque o movimento do ar contribui para a sensação de frescor, ajudando a melhorar as condições térmicas dos ambientes.

Além de auxiliar na diminuição do gasto energético com acondicionamento, a ventilação natural em edificações pode melhorar o conforto térmico dos ocupantes ao reduzir as temperaturas internas elevadas e favorecer o resfriamento fisiológico. (Sorgato, 2009).

Um trabalho desenvolvido por Sorgato, Versage e Lamberts (2011) estudou a influência da área de ventilação no desempenho térmico de edificações residenciais. Como método, foi utilizado o software EnergyPlus, para avaliar uma edificação multifamiliar em duas zonas bioclimáticas brasileiras (ZB-3 e ZB-8). Para uma

determinada porcentagem de abertura para ventilação com relação a área útil, foram aplicados diferentes percentuais de ventilação com relação a área de abertura do ambiente (25%, 50% e 100%), com e sem dispositivos de sombreamento. Como resultado, os autores afirmam que maiores áreas de ventilação melhoram o desempenho térmico, reduzindo significativamente os graus-hora de resfriamento (GHR).

O aumento das aberturas para ventilação ocasiona, por conseguinte, uma melhor troca do ar interno com o externo, possibilitando um aumento nas taxas de renovação de ar. Segundo Araújo e Bitterncourt (2022), a qualidade do ar interno está diretamente vinculada às taxas de renovação de ar, as quais são influenciadas pela geometria da edificação, bem como pela velocidade e direção dos ventos. Sendo assim, o aumento das aberturas para ventilação demonstra benefício no desempenho térmico, corroborando com o estudo de Silva e Toledo (2021), no qual, analisaram o impacto do aumento da taxa de renovação de ar no desempenho térmico de um edifício residencial multifamiliar em Maceió (ZB 8), utilizando simulações no EnergyPlus. Foram avaliados dormitórios com taxas de 1, 5 e 10 renovações de ar por hora. Os resultados mostraram que o aumento da taxa de renovação de ar melhora o comportamento das temperaturas internas nas horas após o pico da temperatura externa; e reduz a diferença entre as temperaturas internas e externas no período noturno.

O artigo de Sayadi, Hayati e Salmanzadeh (2021) analisa a otimização da relação janela-parede (WWR) em edifícios localizados em diferentes climas. O estudo avalia o impacto do WWR na demanda anual de energia em sete tipos climáticos segundo Köppen–Geiger. Foram estipulados três diferentes tipos de janelas, e diferentes tipos de sombreamento. Os resultados indicam que o WWR ideal para a edificação analisada varia conforme o clima, a orientação da fachada e o tipo de vidro, sendo que, de uma forma abrangente, os valores entre 30% e 70% geralmente resultaram menores quantidades de energia gasta em resfriamento ou aquecimento. Dessa forma, fica evidente que a depender dos parâmetros físicos e arquitetônicos os elementos transparentes atrelados a aplicação de ventilação natural, pode influenciar de forma significativa nos resultados de desempenho térmico.

3 METODOLOGIA

O presente trabalho realizou a análise da influência da variação da relação janela-parede no desempenho térmico de uma edificação habitacional, bem como, o impacto da adição de vidro de controle solar nas esquadrias e o aumento da abertura para ventilação. Ao longo do trabalho foram seguidas as especificações da NBR 15575 (ABNT, 2024) e NBR 15220 (ABNT, 2024), sendo essas, normas que tratam do desempenho térmico em edificações vigentes no Brasil.

O desempenho térmico foi avaliado por meio de simulações computacionais com auxílio do software EnergyPlus em sua versão 9.4.0. Foram realizadas cinco variações da relação janela-parede (WWR), começando com um WWR de 20% e variando para valores de 30%,50%,70% e 90%.

Como primeiro cenário, foram avaliados os 5 WWR utilizando o vidro incolor em todas as janelas do edifício, de forma a obter o impacto do aumento da relação janela-parede no desempenho térmico. Posteriormente, para cada variação de WWR foi substituído o vidro incolor por um vidro cinza, com o intuito de analisar a influência da adição dos vidros de controle solar nos resultados dos indicadores de desempenho térmico.

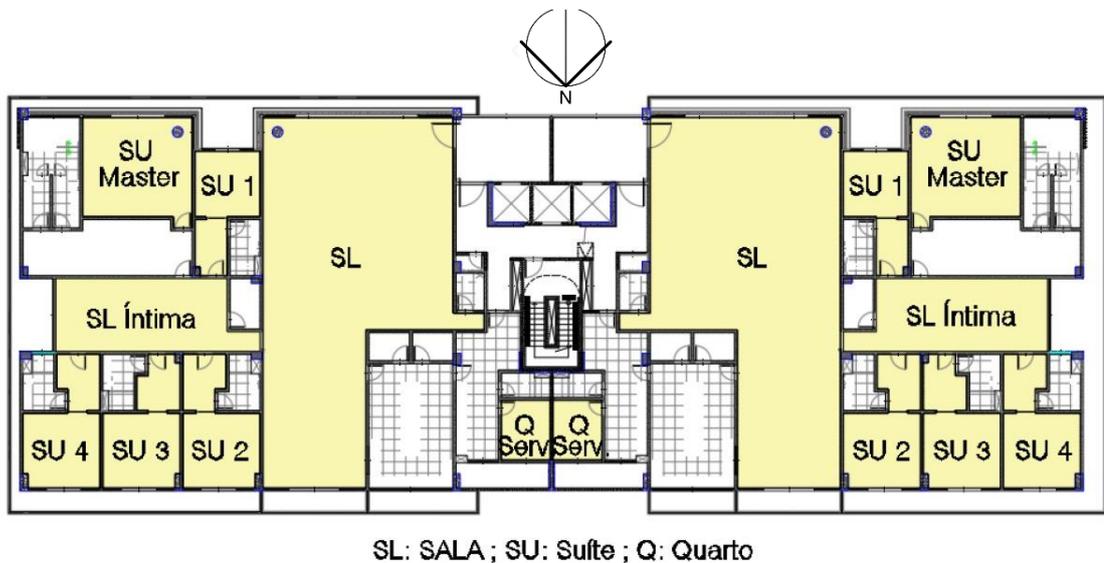
E como uma terceira etapa, novas simulações foram realizadas, porém, dessa vez, acrescentando ao vidro cinza uma maior abertura para ventilação nas janelas, saindo de um fator de abertura de 0,45 (45%) e passando para um fator de 0,9 (90%), verificando, dessa forma, qual será o impacto que o aumento da abertura para ventilação nas janelas ocasionará no desempenho térmico.

A simulação será realizada para três pavimentos do edifício, a cobertura (16º pav), o pavimento tipo (8º pav) e o pavimento térreo, de forma a atender as exigências normativas. A cidade em que o empreendimento será localizado para a modelagem é a cidade de Recife-PE que se encontra na zona bioclimática 5A conforme a NBR 15220-3:2024.

3.1 PROPOSTA DA EDIFICAÇÃO

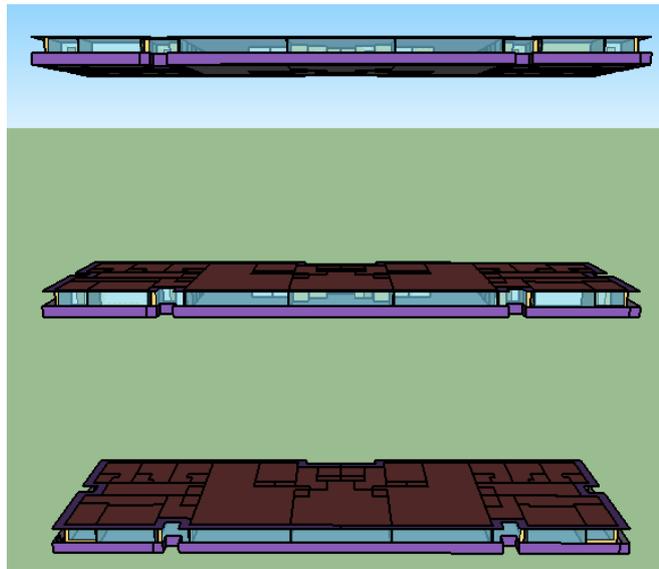
O empreendimento do estudo se trata de um residencial de caráter multifamiliar com 2 apartamentos tipo por pavimento, como pode ser visualizado na figura 9. Cada apartamento conta com 8 Ambientes de Permanência Prolongada (APP), sendo uma sala, quatro suítes, uma suíte master, uma sala íntima e um quarto de serviços, com 16 pavimentos tipo no total. A planta baixa da edificação pode ser visualizada na figura 9, assim como, um croqui 3D da edificação pode ser visualizado na figura 10. No lado direito da figura 10 estão localizados os apartamentos denominados de terminação 01, bem como, ao lado esquerdo estão os apartamentos denominados de terminação 02.

Figura 9 – Planta baixa tipo do edifício



Fonte: O autor (2025)

Figura 10 - Croqui 3D do modelo real do edifício

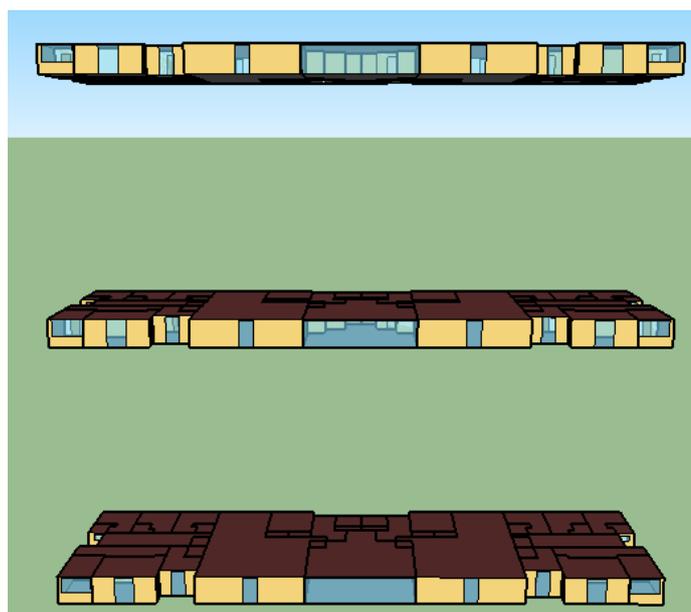


Fonte: o autor (2025)

3.1.1 Modelo de referência

O modelo de referência para simulação seguiu o proposto pela NBR 15575-1 (ABNT, 2024), mantendo a mesma volumetria do edifício real, entretanto, desconsiderando os elementos de sombreamento externos fixos na fachada, assim como, também não foi considerada a presença de sacadas. A figura 11, representa um croqui 3D da edificação com a modelagem do modelo de referência.

Figura 11 – Croqui 3D do modelo de referência



Fonte: o autor (2025)

No modelo de referência, todos os APP devem ser construídos com paredes e pisos referentes a um elemento de vedação com 100 mm de espessura, composto por um material com propriedades térmicas disponibilizadas no quadro 7. A cobertura deverá ser composta por telha com 6 mm de espessura, câmara de ar com resistência térmica de 0,21 (m².K)/W e laje com 100 mm de espessura, considerando sobre a laje o uso de isolamento com resistência térmica igual a 0,67 (m².K)/W, absorvância à radiação solar 0,70 e emissividade de onda longa 0,90 (NBR 15575-1 (ABNT, 2024)).

Os elementos transparentes dos APP, devem ser redimensionados de forma a corresponderem a um percentual de 17% da área de piso do APP no qual a esquadria está inserida. O vidro do modelo de referência deverá ter fator solar igual a 0,87 e transmitância térmica de 5,7 W/(m².K) (NBR 15575-1 (ABNT, 2024)).

Quadro 7 - Propriedades dos materiais do modelo de referência

Elemento	Condutividade térmica W/(m.K)	Calor específico J/(kg.K)	Absortância à radiação solar	Emissividade de onda longa	Densidade (kg/m³)
Paredes externas	1,75	1000	0,58	0,90	2200
Paredes internas	1,75	1000	0,58	0,9	2200
Pisos	1,75	1000	0,58	0,9	2200
Telha com 6 mm de espessura	0,65	840	0,65	0,90	1700
Laje com 100 mm de espessura	1,75	1000	0,58	0,9	2200

Fonte: Adaptado da NBR 15575-1:2024.

3.2 ZONA BIOCLIMÁTICA

O zoneamento bioclimático presente na NBR 15220-3 (ABNT, 2024) foi construído a partir de análises realizadas com base nos dados climáticos e nos agrupamentos considerando determinados indicadores de desempenho, como o percentual de horas de ocupação dentro de uma faixa de temperatura operativa estabelecida (PHFT), a carga térmica para resfriamento (CgTR) e aquecimento (CgTA).

A norma em questão tinha 8 zonas bioclimáticas no território brasileiro, até passar por uma atualização no ano de 2024, tendo elevado esse número para 12 zonas. O presente trabalho será modelado se baseando em dados climáticos da cidade de Recife-PE, cuja localização no mapa corresponde ao zoneamento bioclimático 5A, na figura 12, de caráter quente e úmido.

Para realizar a simulação será necessário a utilização de arquivos climáticos anuais da região a ser estudada, sendo possível a fácil obtenção, em bases fornecidas pelo INMET ou no diretório do EnergyPlus. Neste trabalho será utilizado o arquivo climático da cidade de Recife-PE elaborado pelo INMET e disponibilizado para download no site climate.onebuilding.org.

Figura 12 - Área de influência da Zona Bioclimática quente e úmida 5A



Fonte: NBR 15220-3 (2024).

3.3 PARÂMETROS TERMO FÍSICOS

Neste tópico serão abordados os parâmetros a serem avaliados durante a simulação para a modelagem do modelo real. Como visto nos objetivos gerais e

específicos, o presente trabalho pretende-se analisar a influência no desempenho térmico por meio de mudanças na razão de área envidraçada (WWR), como também, a adição de vidro cinza nas esquadrias e maior abertura para ventilação. Desse modo, todas as outras propriedades termo físicas dos componentes da envoltória da edificação irão permanecer inalteradas. Feito isso, será utilizado o vidro float transparente em todas as janelas, de modo que a variável do WWR tenha seu impacto estudado no desempenho da edificação separadamente. E logo após, será realizada a troca do vidro float transparente por um vidro de proteção solar cinza para todos os elementos envidraçados do edifício.

Para o presente estudo, optou-se por adotar na edificação analisada, materiais de vedação amplamente utilizados na construção civil do Brasil, em especial para projetos localizados na Zona Bioclimática 5A conforme classificação da NBR 15220-3:2024. Os materiais selecionados refletem soluções construtivas correntes e adaptadas ao clima predominante da zona bioclimática 5A, caracterizado por temperaturas elevadas e alta incidência solar. Nas simulações, esses materiais foram aplicados de maneira uniforme em todas as fachadas e paredes internas da edificação, de modo a garantir consistência na comparação entre os diferentes cenários analisados.

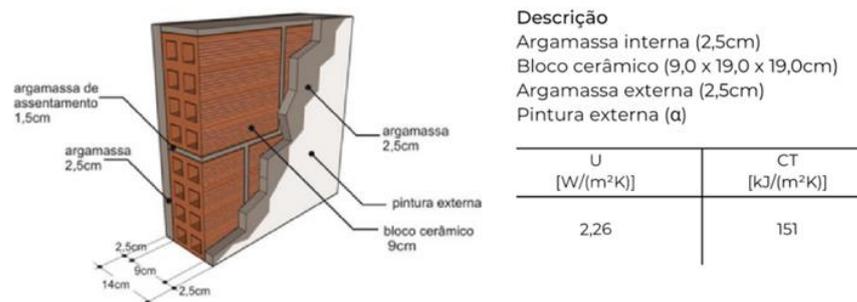
3.3.1 Composição das paredes

De maneira a manter uma padronização para a edificação como um todo, as paredes serão as mesmas tanto internamente, quanto externamente com 14cm de espessura no total, sendo composta conforme figura 13, com tijolos cerâmicos 9x19x19cm, argamassa interna e externa ambas com 2,5cm de espessura. O conjunto apresenta transmitância térmica de ordem de $2,26 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ e capacidade térmica de $151 \text{ KJ}/(\text{m}^2\text{K})$. As propriedades termo físicas foram obtidas por meio da versão antiga da norma NBR 15220-2 (ABNT, 2003), como também da biblioteca de componentes construtivos disponibilizada pelo Laboratório de Eficiência Energética (LABEE). Essas informações serão importantes para a entrada de dados no software EnergyPlus.

Na região correspondente à Zona Bioclimática 5A, a incidência de radiação solar ao longo do ano é significativamente elevada em comparação com outras regiões do país. Dessa forma, com o objetivo de minimizar a carga térmica absorvida

pelas fachadas e, conseqüentemente, melhorar o desempenho térmico da edificação, será utilizada um revestimento de cor medianamente clara que possua absorvância solar, em torno de 0,6.

Figura 13 - Croqui dos elementos construtivos de paredes



Fonte: PBE Edifica (2017).

3.3.2 Cobertura e laje

A laje escolhida é uma solução comumente utilizada em construções brasileiras, principalmente em edifícios residenciais de múltiplos pavimentos. Se trata de uma laje do tipo nervurada com câmara de ar. Esse tipo de laje proporciona uma boa resistência estrutural com economia de material.

Para compor o piso dos apartamentos será previsto o contrapiso seguido por um revestimento de placa cerâmica na camada superior como acabamento final. O teto do ambiente interno de todos os apartamentos, por sua vez, será composto por forro de gesso, que contribui não apenas para o acabamento estético, mas também de forma a facilitar a passagem de instalações elétricas e hidráulicas.

Para fins de modelagem no presente estudo, foi adotada uma cobertura do tipo telha de fibrocimento, sem isolamento térmico adicional, por se tratar de uma solução amplamente utilizada em diversas regiões do Brasil, os croquis das composições citadas acima podem ser vistos nas figuras 14 e 15.

Figura 14 - Croqui do elemento construtivo da cobertura e laje com telha de fibrocimento



Fonte: BRASIL (2025).

Figura 15 - Croqui do elemento construtivo com laje nervurada e forro de gesso.



Fonte: BRASIL (2025).

3.3.3 Vidros

Segundo Pinto (2023), as janelas são os elementos da envoltória que mais favorecem o ingresso de calor no interior da edificação, uma vez que apresentam elevada transmitância térmica e elevada transparência à radiação solar, o que intensifica as trocas de calor e afeta diretamente o conforto térmico dos usuários, especialmente em edificações de múltiplos pavimentos.

Na edificação do presente estudo, todos os elementos transparentes referentes às janelas manterão um mesmo padrão durante as simulações. Nas simulações iniciais, serão utilizadas as propriedades térmicas de um vidro incolor 4mm, modelados no EnergyPlus por meio do objeto WindowMaterial:Glazing, cujos valores se encontram resumidos no quadro 8.

Quadro 8 - Propriedades térmicas do vidro float transparente

Propriedade	Valor	Unidade
Espessura nominal	4,00	mm
Emissividade normal exterior	0,89	adimensional
Emissividade normal interior	0,89	adimensional
Transmitância Visível	89,0	%
Refletância exterior	8,00	%
Refletância interior	8,00	%
Transmitância Solar	83,0	%
Fator Solar	0,85	adimensional
Transmissão térmica (0° em relação à vertical)	5,80	W/(m ² .K)

Fonte: o autor (2025).

Após a realização de todas simulações para as cinco variações de WWR, será realizada mais cinco simulações, porém, dessa vez, com a alteração do vidro float transparente por um vidro de controle solar cinza, com propriedades térmicas melhores que o anterior. O vidro cinza também manterá o padrão de espessura de 4mm, e suas propriedades encontra-se no quadro 9.

Quadro 9 - Propriedades térmicas do vidro float cinza

Propriedade	Valor	Unidade
Espessura nominal	4,00	mm
Emissividade normal exterior	0,89	adimensional
Emissividade normal interior	0,89	adimensional
Transmitância Visível	55,0	%
Refletância exterior	6,00	%
Refletância interior	6,00	%
Transmitância Solar	52,0	%
Fator Solar	0,85	adimensional
Transmissão térmica (0° em relação à vertical)	5,80	W/(m ² .K)

Fonte: O autor (2025).

3.4 PARÂMETROS DE ENTRADA

3.4.1 Parâmetros de cargas internas e de utilização

A avaliação do desempenho térmico de edificações deve considerar o perfil de ocupação e as atividades desenvolvidas no interior dos ambientes, uma vez que esses fatores influenciam diretamente nas cargas internas e na sensação de conforto térmico dos usuários. Assim como indicado na NBR 15575-1 (ABNT, 2024), o padrão de ocupação de salas e dormitórios, o calor dissipado por ocupante e a sua fração radiante devem ser mantidos os mesmos para todos os dias do ano. Esses valores devem ser aplicados nos Ambientes de Permanência Prolongada (APP), e seguem a configuração de 2 ocupantes para cada dormitório disponível na edificação.

Para a sala, a norma deixa claro que independentemente do número de dormitórios a ocupação máxima será de 4 ocupantes. O padrão de ocupação, assim como os horários, pode ser conferido no quadro 10, retirado da norma.

Quadro 10 - Padrão de Ocupação da Habitação

Horário	Dormitório (%)	Sala (%)	Uso misto (%)
00:00 – 00:59	100	0	100
01:00 – 01:59	100	0	100
02:00 – 02:59	100	0	100
03:00 – 03:59	100	0	100
04:00 – 04:59	100	0	100
05:00 – 05:59	100	0	100
06:00 – 06:59	100	0	100
07:00 – 07:59	100	0	100
08:00 – 08:59	0	0	0
09:00 – 09:59	0	0	0
10:00 – 10:59	0	0	0
11:00 – 11:59	0	0	0
12:00 – 12:59	0	0	0
13:00 – 13:59	0	0	0
14:00 – 14:59	0	50	50
15:00 – 15:59	0	50	50
16:00 – 16:59	0	50	50
17:00 – 17:59	0	50	50
18:00 – 18:59	0	100	100
19:00 – 19:59	0	100	100
20:00 – 20:59	0	100	100
21:00 – 21:59	0	100	100
22:00 – 22:59	100	0	100
23:00 – 23:59	100	0	100

Fonte: NBR 15575-1 (ABNT, 2024).

Para o padrão de ocupação determinado anteriormente deve ser atribuído um valor de taxa metabólica e fração radiante para cada usuário a depender da atividade que está executando no ambiente. Para o estudo, será considerada as indicações da norma NBR 15575-1 (ABNT, 2024), para uma pessoa que possui 1,80m² de área de superfície corporal. Estando no dormitório, descansando ou dormindo o calor produzido pelo o usuário será de 81W, bem como, a fração radiante será de 0,3. Na situação de ocupação da sala, os usuários, sentados ou assistindo TV, devem produzir calor de 108W e fração radiante também de 0,3.

Além da taxa metabólica, outro fator que influência nas cargas internas da edificação é o padrão de utilização de iluminação interna e uso de equipamentos. Quanto aos equipamentos utilizados nos APP a potência e a fração radiante devem ser de 120W e 0,3 respectivamente, considerando o período de uso das 14:00h às 21:59h. Para a iluminação interna será adotado o mesmo valor de Densidade de Potência Instalada (5 W/m²), fração radiante (0,32), e fração visível (0,23) para todos APP da habitação. Com relação aos períodos em que a iluminação estará sendo utilizada, será utilizado o padrão disponível pela norma e disposto no quadro 11.

Quadro 11 - Padrão de utilização da iluminação interna

Horário	Dormitório (%)	Sala (%)	Uso misto (%)
00:00 – 00:59	0	0	0
01:00 – 01:59	0	0	0
02:00 – 02:59	0	0	0
03:00 – 03:59	0	0	0
04:00 – 04:59	0	0	0
05:00 – 05:59	0	0	0
06:00 – 06:59	100	0	100
07:00 – 07:59	100	0	100
08:00 – 08:59	0	0	0
09:00 – 09:59	0	0	0
10:00 – 10:59	0	0	0
11:00 – 11:59	0	0	0
12:00 – 12:59	0	0	0
13:00 – 13:59	0	0	0
14:00 – 14:59	0	0	0
15:00 – 15:59	0	0	0
16:00 – 16:59	0	100	100
17:00 – 17:59	0	100	100
18:00 – 18:59	0	100	100
19:00 – 19:59	0	100	100
20:00 – 20:59	0	100	100
21:00 – 21:59	0	100	100
22:00 – 22:59	100	0	100
23:00 – 23:59	100	0	100

Fonte: NBR 15575-1 (2024).

3.4.2 Ventilação

A norma NBR 15575-1 (ABNT, 2024) estabelece duas formas de simulação, com uso de ventilação natural e sem uso da ventilação natural. Quando se utiliza da ventilação natural considera-se que os ocupantes sabem operar as janelas realizando a abertura conforme temperatura estabelecida. Diferentes taxas de renovação de ar e configurações de aberturas são simuladas, analisando sua influência na dissipação do calor interno e na melhoria do conforto dos usuários.

Para o modelo simulado, conforme recomendação da norma, as janelas deverão ser abertas quando a temperatura interna de bulbo seco for superior a 19°C ou quando a temperatura de bulbo seco interna for superior à temperatura de bulbo seco externa.

Com relação aos ambientes de permanência transitória (APT), todas as janelas deverão estar fechadas para a simulação, exceto as janelas que fazem parte dos banheiros, essas devem ser consideradas permanentemente abertas. Para as portas e janelas que estarão fechadas, deverá ser considerado uma pequena parcela de fluxo de ar que circulará pelas frestas, esse valor deverá ser inserido no software conforme especificado no quadro 12 abaixo (ABNT NBR 15575-1 (ABNT, 2024)).

Inicialmente, a simulação será realizada para um vidro incolor com um fator de abertura para ventilação de 0,45 para as janelas, e as portas um fator de 0,6. Na terceira etapa o valor do fator passará para 0,90 tanto para janelas como para as portas, a fim de avaliar o impacto do aumento da ventilação natural no desempenho térmico. A modificação desses parâmetros pode ser facilmente alterada por meio do objeto `AirflowNetwork:MultiZone:Component:DetailedOpening` no EnergyPlus.

Os acessos para os APP e APT serão compostos por portas de madeira com densidade de 650 kg/m³, condutividade térmica 0,15 W.(m.K), calor específico 2300 J(kg.K), absorvância 0,5 e emissividade de onda longa igual a 0,9.

Quadro 12 - Parâmetros de ventilação natural para portas e janelas

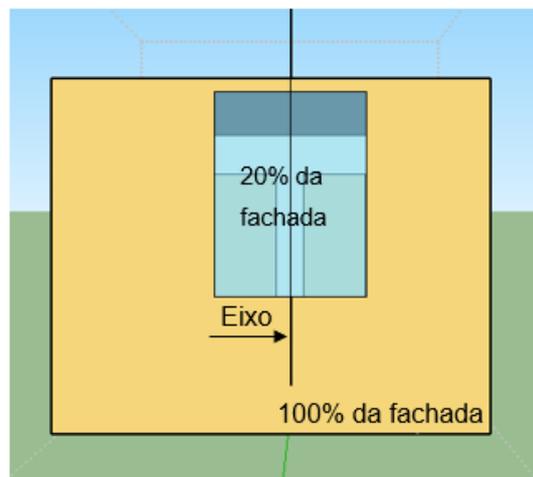
Parâmetros	Portas	Janelas
Coeficiente de fluxo de ar por frestas, quando a abertura está fechada kg/(s.m)	0,0024	0,00063
Expoente de fluxo de ar por frestas quando a abertura está fechada (adimensional)	0,59	0,63
Coeficiente de descarga (Cd) da abertura (adimensional)	0,60	0,60

Fonte: ABNT NBR 15575-1 (ABNT, 2024)

3.5 CASOS ANALISADOS

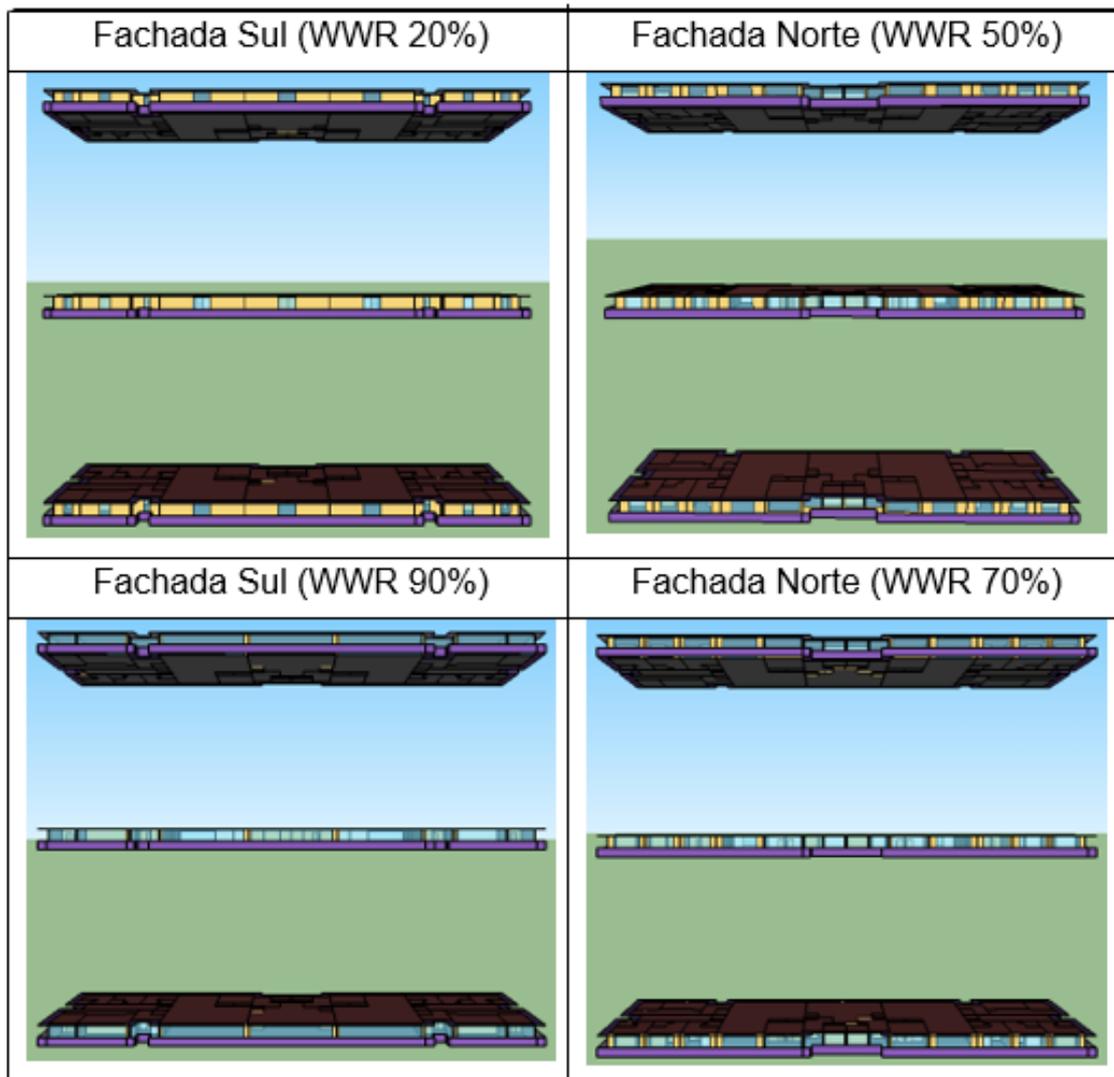
De forma a verificar a real influência do aumento do WWR no desempenho térmico da edificação, todas as propriedades térmicas e físicas da envoltória da edificação serão mantidas fixas, enquanto, a variação ocorrerá apenas no percentual de elementos transparentes. Para isso, a relação janela-parede (WWR) será adotado com relação a área total da parede da fachada no qual a janela está incluída e redimensionando o vão de janela mantendo o eixo central fixo apenas acrescentando o comprimento, ou em algumas situações, a altura para chegar na área desejada, conforme croqui apresentado na figura 16. Partindo de um WWR de 20%, o processo irá se repetir com um aumento gradual do WWR para os valores de 30%,50%,70% e 90%, o esboço final pode ser visto por meio da figura 17.

Figura 16 - Redimensionamento das esquadrias no sketchup para WWR 20%



Fonte: o autor (2025).

Figura 17 - Croqui 3D da edificação para diferentes WWRs



Fonte: o autor (2025).

3.6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Com todos objetos do software configurados, e após rodar as simulações, será fornecido um arquivo separado por vírgulas (.csv) contendo dados horários de temperatura operativa mínima e máxima para as 8760 horas do ano em cada um dos APP da edificação, bem como da carga térmica de resfriamento e aquecimento no caso da simulação sem ventilação natural.

Os dados do arquivo .csv serão tratados por meio do software Excel versão 2021, onde também serão feitos os cálculos dos indicadores de desempenho térmico conforme exigido pela NBR 15575-1 (ABNT, 2024)).

Os indicadores utilizados nesta análise foram:

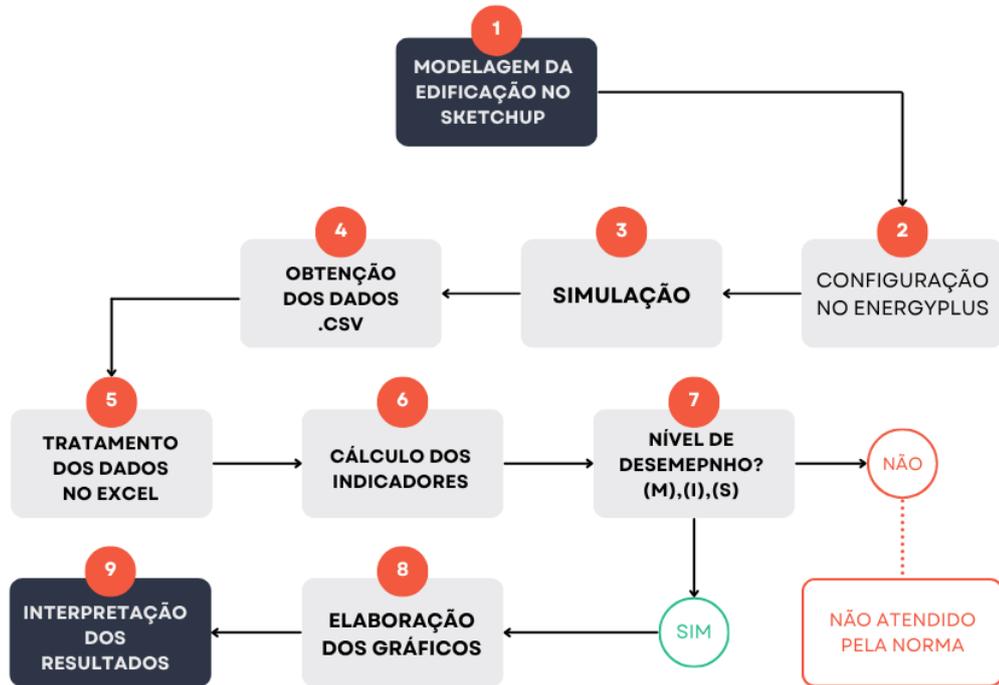
PHFT (Percentual de horas de ocupação dentro da faixa de temperatura operativa): corresponde ao percentual de horas, em relação ao total de horas do ano, em que a temperatura operativa no interior da unidade habitacional permanece dentro da faixa de conforto térmico definida pela norma.

Tomáx (Temperatura Operativa Máxima): representa a maior temperatura operativa registrada nos ambientes ao longo do ano de simulação.

CgTT (Carga Térmica Total): Representa a carga térmica necessária para manter o ambiente dentro da faixa de temperatura operativa em situações de ocupação

A análise dos resultados foi conduzida de forma comparativa entre os diferentes cenários simulados, considerando variações de WWR, tipologia dos vidros (incolor ou cinza) e fatores de abertura para ventilação natural. Para cada cenário, os valores obtidos de PHFT, Tomáx e CgTT foram expostos em forma gráfica sendo comparados com os resultados do modelo de referência para cada uma das seis unidades habitacionais. A partir dos limites estabelecidos pela norma também foi possível classificar cada UH quanto à sua faixa de classificação de desempenho térmico Mínimo (M), Intermediário (I) ou Superior (S) e apresentar em forma de quadro para melhor interpretação. Um fluxograma disponibilizado na figura 1 permite visualizar de forma resumida o procedimento de análise.

Figura 18 – Fluxograma do procedimento de análise dos resultados



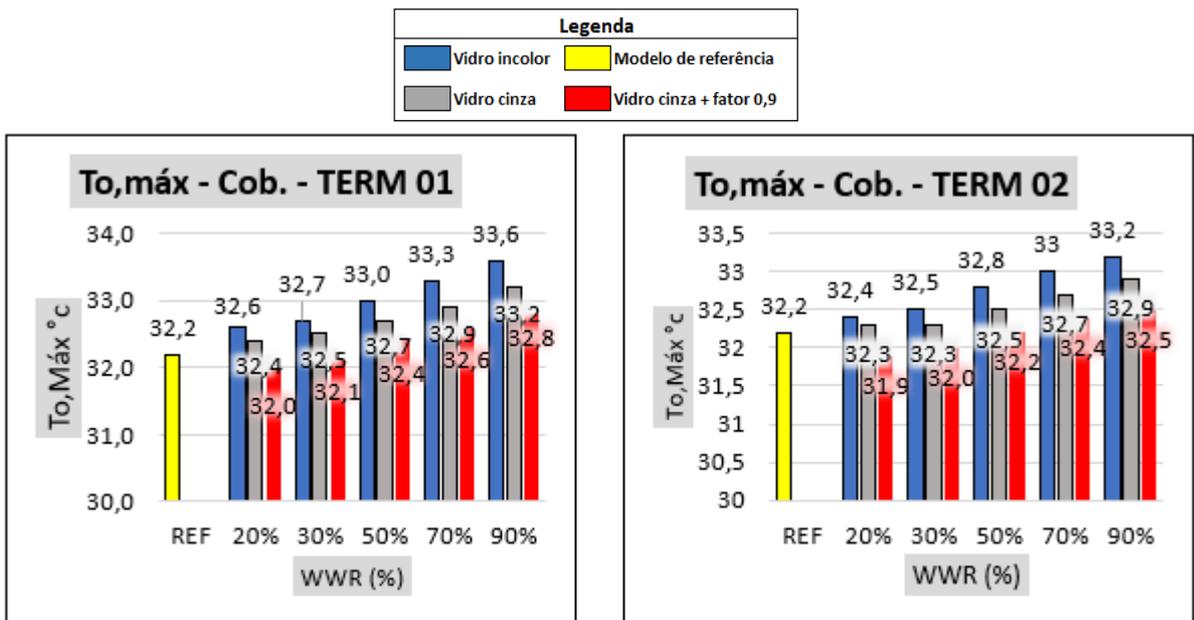
Fonte: o autor (2025).

4 RESULTADOS

4.1 TEMPERATURA OPERATIVA MÁXIMA (Tomáx)

A Temperatura Operativa Máxima (Tomáx) apresentou certa sensibilidade em função do aumento da razão de área envidraçada (WWR), com destaque para os cenários mais críticos nos pavimentos superiores e localizações mais expostas à radiação solar direta. A terminação 01 da cobertura (16º Pav) foi a responsável por trazer maiores valores de Tomáx quando comparados com todos outros pavimentos da edificação. Os dados apresentados nos gráficos da Figura 19 mostram que a terminação 01 (oeste) da cobertura utilizando um vidro float incolor saiu de uma temperatura de 32,2°C (Modelo de Referência) e chegou a atingir 33,6 °C (WWR 90%-TERM 01- Incolor), representando um acréscimo de 1,4°C na temperatura interna da unidade habitacional. A substituição do vidro incolor por vidro de controle solar cinza reduziu esse mesmo valor para 33,2 °C, ainda mais, quando adicionado o fator de abertura para ventilação de 0,9 uma nova redução foi atingida, chegando a 32,8 °C, totalizando uma queda de 0,8 °C em relação ao pior cenário (WWR 90% - TERM 01 Incolor).

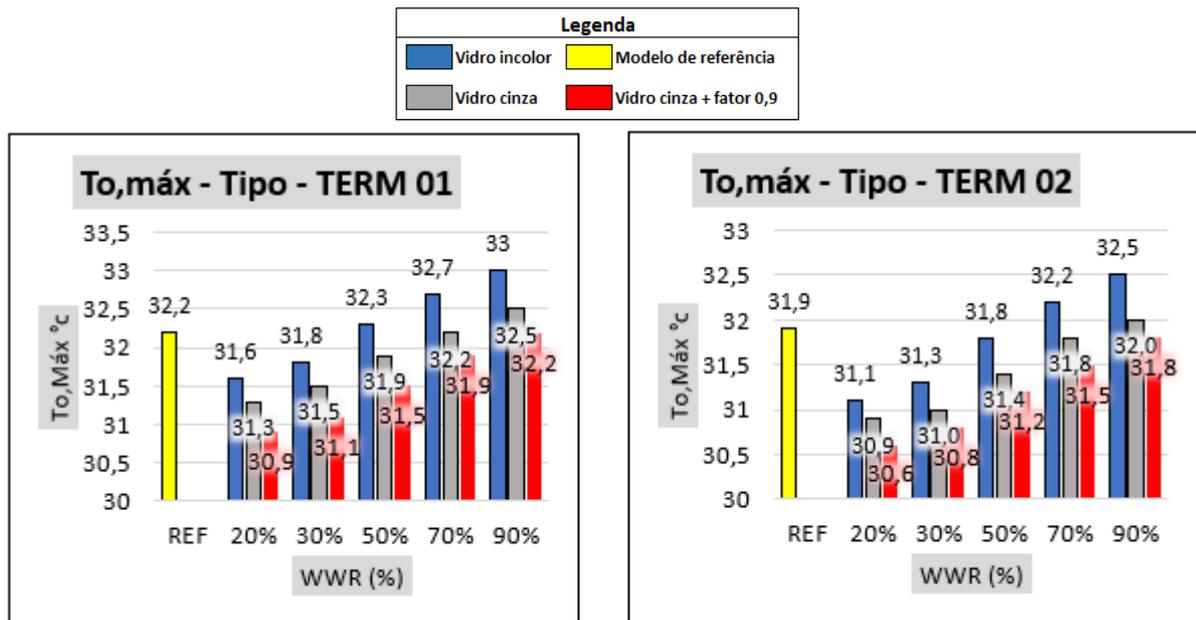
Figura 19 - Resultados da cobertura para a temperatura operativa máxima (°C)



Fonte: o autor (2025).

A tendência de aumento da temperatura com o aumento do WWR também pode ser observada por meio da figura 20, nos apartamentos de terminação 02 (leste), entretanto, com resultados de temperatura ligeiramente melhores que o da terminação 01 (oeste). Na Terminação 02 do pavimento tipo o maior pico de temperatura foi de 32,5°C (WWR 90 - TERM 02 – incolor), enquanto a temperatura máxima na terminação 01 do mesmo pavimento foi 33°C, uma variação de 0,5°C a mais. Ao se fazer a alteração do vidro incolor pelo vidro cinza as temperaturas operativas foram reduzidas em até 0,5 °C, e o aumento do fator de abertura para ventilação de 0,9 promoveu uma redução adicional média de 0,3 °C em ambos os lados. Vale ressaltar que mesmo usando o vidro incolor todas as unidades habitacionais atingiram pelo menos o nível mínimo exigido pela NBR 15575 (ABNT, 2024), conforme disposto no Quadro 13.

Figura 20 - Resultados do pavimento tipo para a temperatura operativa máxima (°C)



Fonte: o autor (2025)

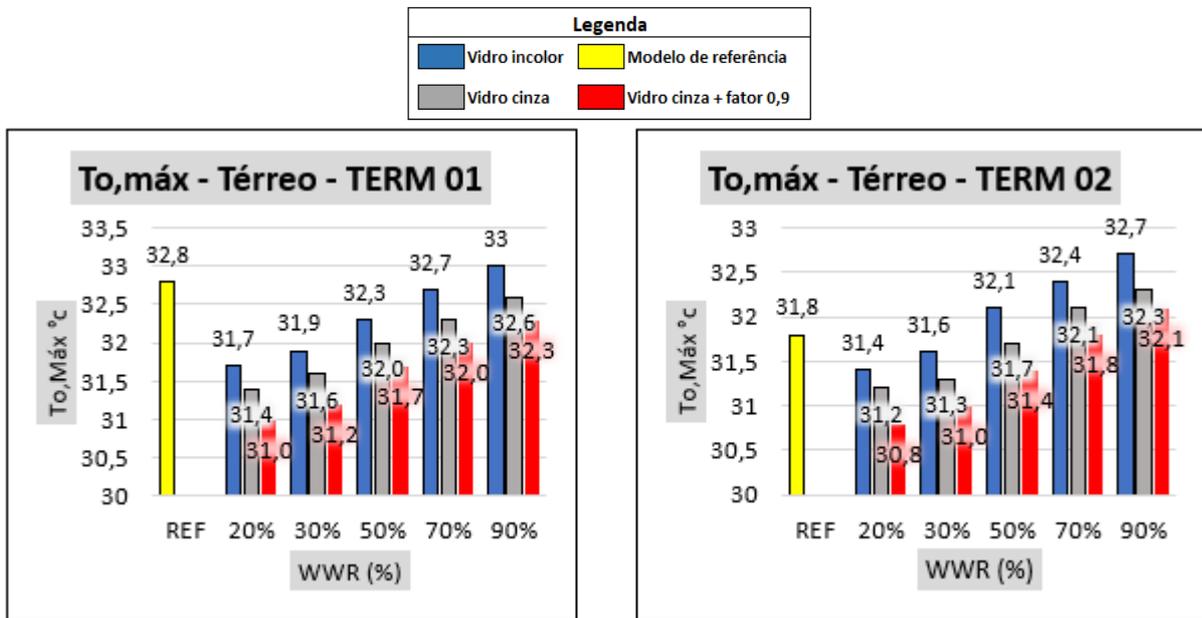
Quadro 13 - Níveis de desempenho segundo a NBR 15575 (ABNT, 2024) por unidade habitacional

Pavimento analisado	Und. Habitacional	VIDRO INCOLOR				
		WWR 20	WWR 30	WWR 50	WWR 70	WWR 90
Cobertura	Term. 01	M	M	I	I	M
	Term. 02	M	M	I	I	M
Intermediário	Term. 01	M	M	M	M	M
	Term. 02	I	I	M	M	M
Terreo	Term. 01	M	M	I	I	I
	Term. 02	M	M	M	I	M
Pavimento analisado	Und. Habitacional	VIDRO CINZA				
		WWR 20	WWR 30	WWR 50	WWR 70	WWR 90
Cobertura	Term. 01	M	I	I	I	I
	Term. 02	M	I	I	I	I
Intermediário	Term. 01	M	I	I	I	I
	Term. 02	I	I	I	M	M
Terreo	Term. 01	M	S	I	I	I
	Term. 02	M	I	I	I	I
Pavimento analisado	Und. Habitacional	VIDRO CINZA + FATOR DE 0,9				
		WWR 20	WWR 30	WWR 50	WWR 70	WWR 90
Cobertura	Term. 01	I	I	I	I	I
	Term. 02	I	I	I	I	I
Intermediário	Term. 01	S	S	S	I	I
	Term. 02	S	S	I	I	M
Terreo	Term. 01	S	S	S	I	I
	Term. 02	S	S	S	I	I
M		Nível de desempenho Mínimo				
I		Nível de desempenho Intermediário				
S		Nível de desempenho Superior				

Fonte: o autor (2025)

No pavimento térreo, os valores de Tomáx foram, em geral, os mais baixos entre os pavimentos analisados com relação ao modelo de referência, sobretudo, devido a utilização de vidro cinza, assim com apresentado na figura 21. Apesar da terminação 02 (leste) apresentar temperaturas mais amenas em comparação com a terminação 01 (oeste), devido a menor exposição à radiação solar ao longo do dia, foram os resultados de Tomáx do lado oeste que obtiveram melhores resultados em comparação com o modelo de referência entre todos pavimentos, chegando a atingir uma amplitude de variação de até 1,8°C no (WWR 20% - TERM 01 – Cinza + fator 0,9). Os resultados obtidos corroboram o estudo realizado por Riffat e Cuce (2016) no qual afirmam que a utilização de vidros com propriedades de isolamento térmico contribui significativamente para a solução do problema de superaquecimento causado no interior de edifícios altamente envidraçados.

Figura 21 - Resultados do pavimento térreo para a temperatura operativa máxima (°C)



Fonte: o autor (2025)

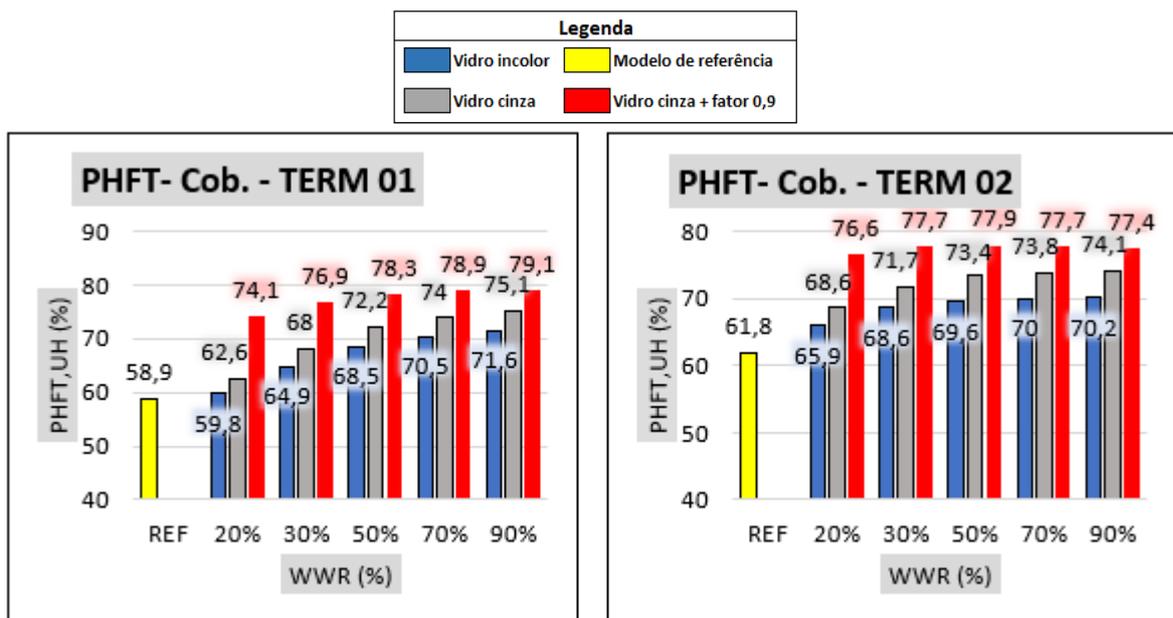
4.2 PERCENTUAL DE HORAS DENTRO DA FAIXA DE TEMPERATURA OPERATIVA (PHFT)

Os resultados das simulações demonstraram no geral que o aumento do WWR, em combinação com estratégias de controle solar e ventilação, influenciou diretamente o percentual de horas em que a edificação permaneceu na faixa de conforto térmico (PHFT). A tendência predominante foi o aumento do PHFT com o crescimento do WWR, especialmente quando associado ao vidro cinza e à maior abertura para ventilação natural (fator de 0,9).

Analisando o pavimento da cobertura, os dados da Figura 22 mostraram que tanto a terminação 01 (oeste) quanto a terminação 02 (leste) apresentaram crescimento do PHFT com o aumento do WWR. Na terminação 01 (oeste) o PHFT passou de aproximadamente 59,8% no modelo (COB - WWR 20%-incolor) para o valor de 71,6% com (COB - WWR 90% - incolor) obtendo um aumento de 11,8 pontos percentuais (pp) nas horas de conforto. A substituição do vidro incolor pelo vidro cinza proporcionou aumentos médios entre 2 a 4 pontos percentuais (pp) no PHFT em

ambos os lados, enquanto o uso do fator de abertura 0,9 gerou ganhos significativos, com destaque para o cenário da terminação 01 da cobertura que saiu de 59,8% (COB -WWR 20% - incolor) para 74,1% (COB - WWR 20% - cinza + fator de abertura) representando um aumento de 14,33 pontos percentuais (pp) nas horas de conforto. Esses resultados explicam o importante papel do aumento da taxa de ventilação natural na melhora do desempenho térmico de um apartamento, que podem ser confirmados pelo estudo realizado por Sorgato *et. al.* (2011) que avaliaram a influência da área de ventilação no desempenho térmico de uma habitação obtendo como resultados a melhora dos indicadores de desempenho com o aumento da taxa de ventilação, concluindo, dessa forma, que a área de ventilação tem influência significativa no desempenho térmico dos APPs

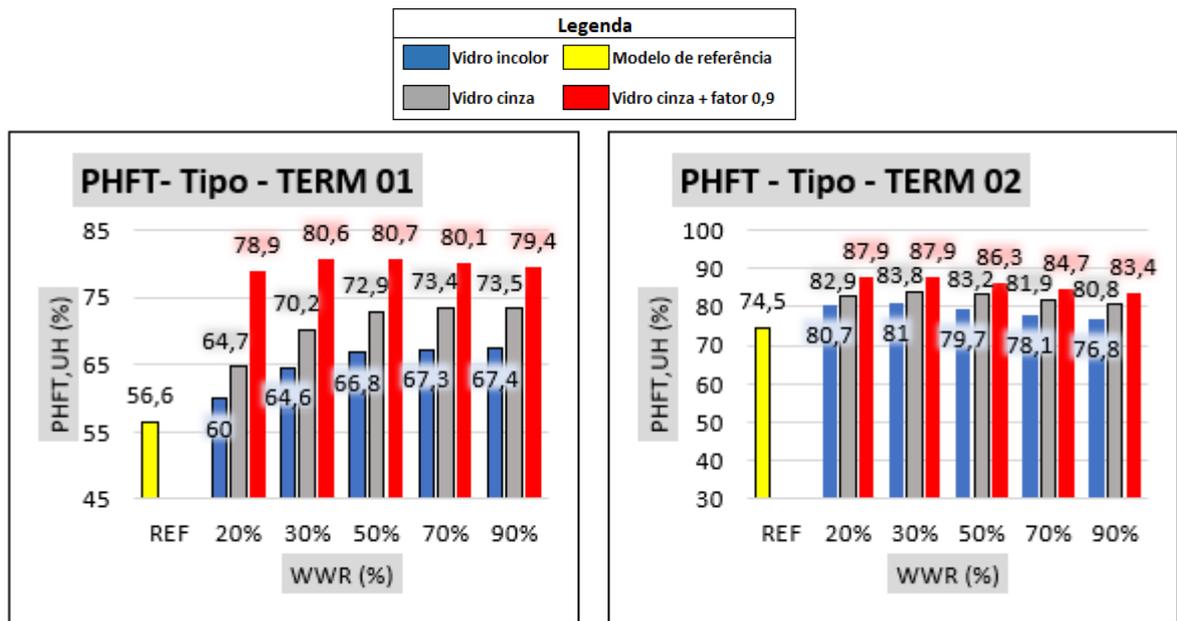
Figura 22 - Resultados do pavimento da cobertura para o PHFT (%)



Fonte: o autor (2025)

No pavimento tipo, os resultados seguiram o padrão de melhora com o aumento do WWR apenas na terminação 01 (oeste). A figura 23 mostra que nessa orientação, o PHFT saltou de cerca de 60% (Tipo - WWR 20% - incolor) para 67,4% com (Tipo - WWR 90% - incolor). A adição do vidro cinza com o aumento da abertura para ventilação proporcionou aumentos expressivos nas horas de conforto da unidade habitacional, com destaque mais uma vez para o WWR 20%, que obteve uma amplitude de 18,9pp, entre os cenários de vidro incolor e vidro cinza + fator de abertura 0,9.

Figura 23- Resultados do pavimento tipo para o PHFT (%)

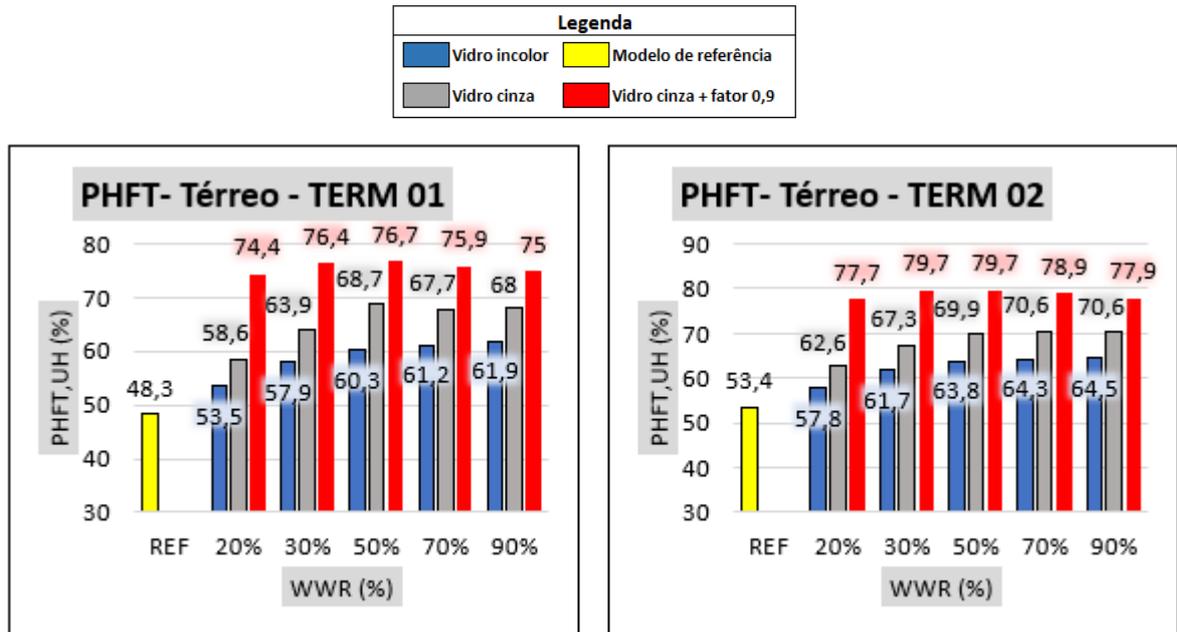


Fonte: o autor (2025)

No entanto, na terminação 02 (leste) do pavimento tipo, um comportamento inverso foi observado: o PHFT caiu levemente com o aumento do WWR. Esses resultados podem ser observados a partir do WWR 50% mesmo com estratégias de atenuação de temperatura, apresentando uma diminuição com o aumento do WWR em valores de até 1,6pp. Apesar dessa situação de inversão de padrão, os níveis de desempenho foram atendidos pela NBR 15575 (ABNT, 2024), inclusive, em alguns cenários atingindo o nível intermediário.

No pavimento térreo, o comportamento do PHFT com utilização de vidro incolor voltou a ser positivo com o aumento do WWR. Como exposto na figura 24, a terminação 01 (oeste) apresentou os melhores resultados relativos com o modelo de referência, ainda mais quando se utiliza o vidro cinza e fator de abertura 0,9. Por exemplo, no pavimento térreo terminação 01(oeste), o simples fato da adição do vidro cinza nas esquadrias para um WWR 50%, aumentou as horas de conforto em cerca de 8,4pp. Sugerindo que a especificação de vidros com propriedades ópticas melhoradas podem atenuar o impacto do aumento da sensação térmica no interior do ambiente, corroborando com os resultados obtidos no estudo de Westphal (2019) que avaliou o impacto de diferentes especificações de vidro, área de janela e elementos de proteção solar no conforto térmico de um edifício de escritórios.

Figura 24 - Resultados do pavimento térreo para o PHFT (%)



Fonte: o autor (2025)

Outra observação importante a ser abordada, é o fato dos resultados de PHFT não apresentarem aumentos significativos para um WWR a partir de 70%. Por exemplo, no pavimento tipo terminação 01, analisando o cenário com vidro cinza o PHFT entre WWR 20% e 30% apresenta uma variação de 5,5pp. Já os resultados entre WWR 30% e 50% teve um aumento de 2,7pp, entretanto, a diferença no aumento do WWR entre 50% e 70% foi de apenas 0,5pp. Esse comportamento se repete nos demais pavimentos e, em alguns casos, observa-se até mesmo uma redução nos valores de PHFT, como ocorre no pavimento térreo terminação 01.

Além disso, destaca-se um aspecto relevante já discutido anteriormente: a adoção de vidros cinza com aumento das aberturas para ventilação nas janelas contribuiu significativamente para o aumento dos valores de PHFT. Contudo, esse ganho não apresenta evolução expressiva com o aumento do WWR, especialmente a partir do WWR 50%. No quadro 13, que apresenta os níveis de desempenho, é possível verificar que na situação com vidro cinza e fator de abertura 0,9 pelo menos metade das unidades habitacionais chegaram a atingir nível superior até o WWR 50%, no entanto, a partir do WWR 70% a classificação passa a se tornar nível intermediário. Esse fato pode ser uma indicação de que acima do WWR 50%, os ganhos de ventilação se estabilizam, pois, a taxa de renovação de ar para um fator de abertura de 0,9 tende a atingir um limite prático, ou seja, um ponto de saturação no qual a partir

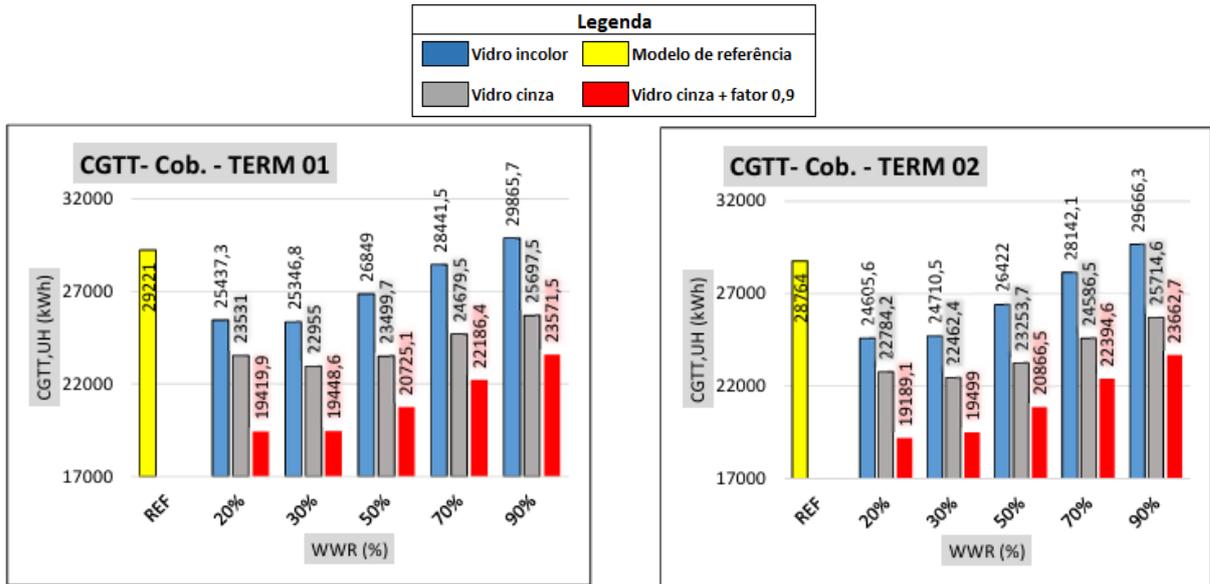
daí, o aumento do WWR passa a favorecer mais a entrada de carga térmica solar do que a melhora da ventilação natural no interior do APP.

4.3 CARGA TÉRMICA TOTAL (CgTT)

A carga térmica total (CgTT) representa a soma da carga térmica interna total da edificação e constitui um indicador fundamental para a avaliação do desempenho térmico. Os resultados obtidos demonstram que o aumento do WWR provocou, de forma geral, um crescimento da CgTT, principalmente na situação de vidro incolor.

Na cobertura, tanto a terminação 01 (oeste) quanto a terminação 02 (leste) apresentaram crescimento da CgTT com o aumento do WWR no cenário com vidro incolor, na figura 25 são apresentados os resultados. A CgTT passou de 25437,3 kWh/ano (WWR 20% - Term 01) para até 29865,7 kWh/ano (WWR 90% - Term 01), com variações próximas a 4428 kWh/ano adicionais. A substituição do vidro incolor pelo vidro cinza reduziu essa mesma amplitude de variação para cerca de 2346 kWh/ano, apresentando um decréscimo de aproximadamente 2082 kWh/ano. Ao acrescentar na simulação o fator de abertura 0,9 promoveu reduções ainda maiores, atingindo valores de até 6294,2 kWh/ano inferiores ao modelo de vidro incolor, como é o caso do WWR 90% - Term 01. O resultado do aumento da CgTT com o aumento do WWR já era esperado, assim como aconteceu no estudo realizado por Oliveira e Lunardi (2018). O autor verificou que a presença de maiores percentuais de aberturas nas fachadas está relacionada ao aumento das cargas térmicas nas edificações, uma vez que os elementos envidraçados permitem a entrada direta da radiação solar no interior dos ambientes, demonstrando, dessa forma, que quanto maior o percentual de elementos transparentes na fachada, maior será o consumo de energia elétrica predial, devido ao consumo de eletricidade para condicionamento de ar.

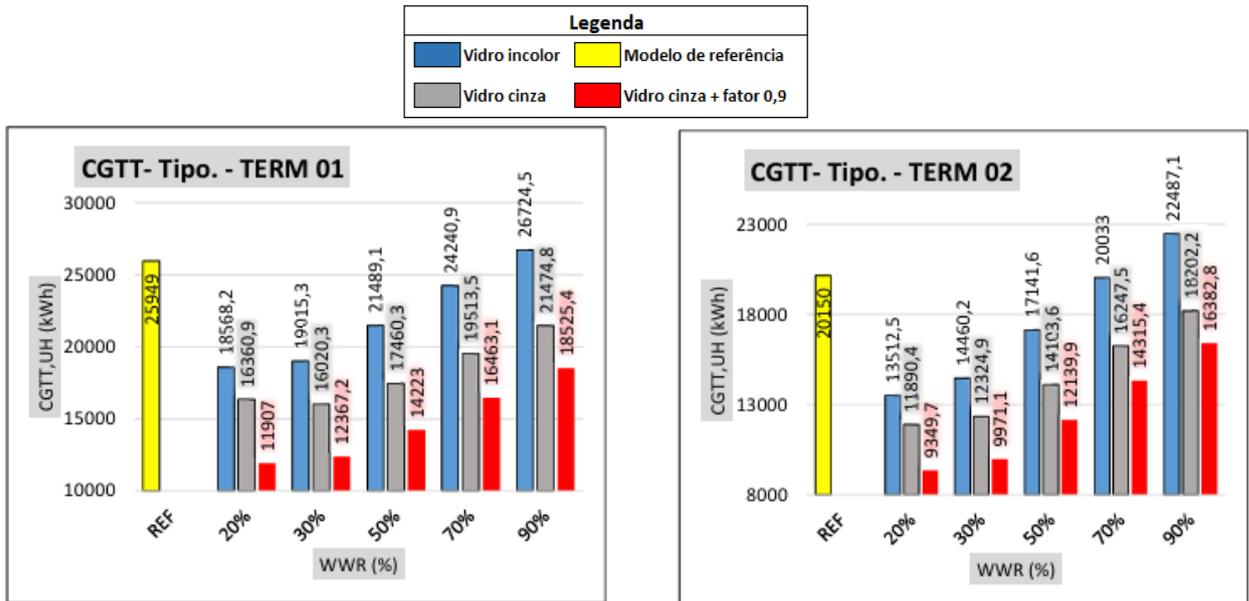
Figura 25 - Resultados do pavimento da cobertura para a carga térmica total (kWh/ano)



Fonte: o autor (2025)

No pavimento tipo, os resultados mantêm a mesma tendência e podem ser vistos na figura 26. A terminação 01 apresentou crescimento de 18.568 kWh (WWR 20%) para 26.724 kWh (WWR 90%) com vidro incolor, enquanto o uso do vidro cinza mais a ventilação natural (fator 0,9) possibilitou uma redução significativa para 18.525 kWh se tornando o cenário que apresentou maior redução da carga térmica entre todos os outros, cerca de 8199,1 kWh/ano. Mais uma vez os resultados da terminação 02 (leste), apesar de também sofrerem o aumento da CgTT, são menores que os obtidos na terminação 01 (oeste), indicando mais uma vez que o lado oeste é mais prejudicado pela maior exposição ao sol no período da tarde.

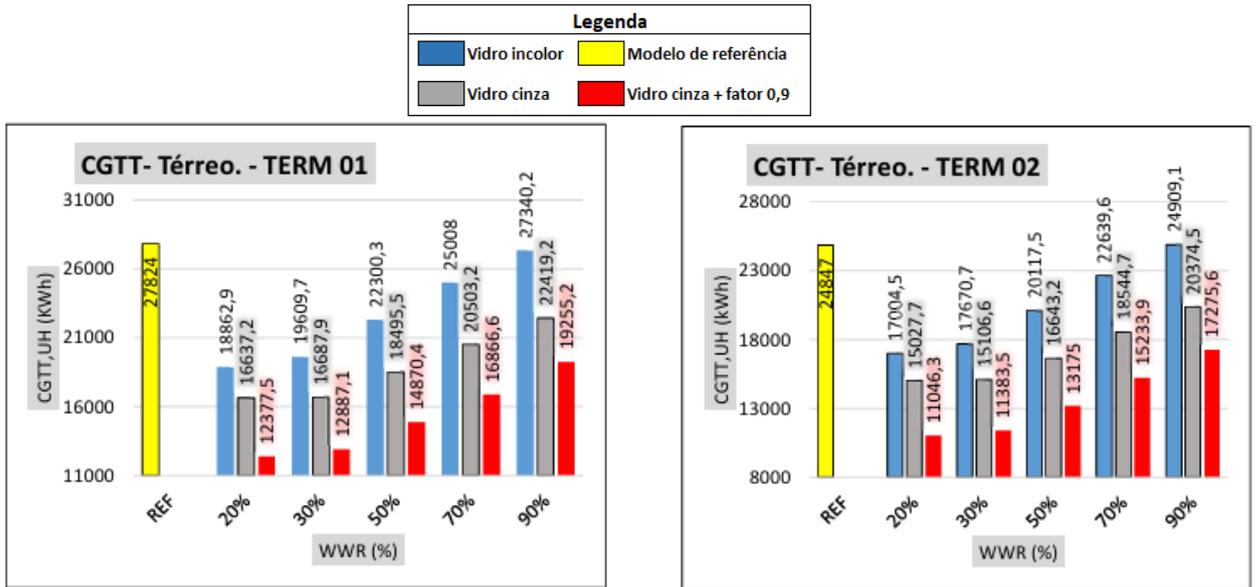
Figura 26 - Resultados do pavimento térreo para a carga térmica total (kWh/ano)



Fonte: o autor (2025)

No pavimento térreo, conforme exposto na figura 27, quase todos os cenários obtiveram resultados abaixo do modelo de referência, exceto a situação de vidro incolor com WWR 90%. Ainda assim, os padrões se repetem, pois ocorre o aumento da CgTT com maior WWR e reduções expressivas com adição do vidro cinza e ventilação 0,9, com destaque para terminação 02 com WWR 20%, que apresentou a menor CgTT do pavimento, com 11046,3 kWh/ano. Até atingir o WWR 50%, a adição do fator de abertura 0,9, possibilitou que os apartamentos do pavimento térreo tivessem todos o nível superior atingido, tornando-se mais eficientes energeticamente.

Figura 27 - Resultados do pavimento térreo para a carga térmica total (kWh/ano)



Fonte: o autor (2025)

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo avaliar o desempenho térmico de uma edificação multifamiliar localizada na zona bioclimática 5A, com base nos critérios estabelecidos pela NBR 15575 (ABNT, 2024), por meio de simulações computacionais realizadas no software EnergyPlus. Foram analisados os indicadores de Temperatura Operativa Máxima ($T_{o,m\acute{a}x}$), Percentual de Horas na Faixa de Temperatura Operativa (PHFT) e Carga Térmica Total (CgTT), considerando diferentes variações de WWR, tipos de vidro e fatores de abertura para ventilação natural.

Os resultados obtidos por meio das simulações demonstraram que o aumento do WWR influencia de forma direta os indicadores de desempenho térmico. O acréscimo da área envidraçada utilizando vidro incolor provocou elevação na $T_{o,m\acute{a}x}$ e na CgTT, principalmente nas unidades orientadas para o oeste, local este, que possui maior incidência solar na fachada. Por outro lado, o PHFT apresentou melhora inicial com o aumento do WWR, com resultados mais expressivos até o WWR de 50%.

A substituição do vidro incolor por um vidro de controle solar cinza contribuiu para uma redução média de até $0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ na temperatura operativa e reduções relevantes nas cargas térmicas. Além disso, foi possível verificar que a adição de vidro de controle solar possibilitou que boa parte das unidades habitacionais que estavam no nível mínimo com vidro incolor passassem a ser nível intermediário na classificação de desempenho térmico.

A combinação do vidro cinza com a mudança do fator de abertura para ventilação de 0,45 para 0,9 mostrou-se ainda mais eficaz, elevando o PHFT e permitindo que as unidades atingissem, em sua maioria, o nível superior de desempenho térmico até o WWR de 50%, sendo esse um ponto a partir do qual os ganhos positivos dos indicadores se estabilizam ou até mesmo se reduzem em determinadas unidades habitacionais. Esse fato sugeriu a ideia de que para o fator de abertura 0,9 a ventilação atinge um limite prático da eficiência para combater os ganhos solares devido maior área envidraçada.

Dessa forma, dentre os cenários simulados e baseado nos resultados obtidos nesse trabalho, o mais adequado para execução em edificações residenciais localizadas na ZB 5A, como a cidade de Recife, são projetos que contemplem um

WWR de até 50%, com estratégias de combate à radiação solar como a aplicação de vidros de controle solar. Além disso, a maior porcentagem de abertura para ventilação das janelas é capaz de proporcionar melhores condições térmicas e maiores horas de conforto no interior da unidade habitacional, principalmente em climas quentes e úmidos como o de Recife.

É relevante abordar que as estratégias adotadas ao longo deste estudo também favorecem a redução do consumo de energia elétrica, uma vez que possibilitam significativamente a redução do ganho de carga térmica e contribuem para minimizar a necessidade de sistemas de condicionamento artificial. Por esse motivo, o uso da simulação computacional torna-se imprescindível como ferramenta para projetar edifícios mais eficientes, permitindo prever e comparar cenários diversos antes da fase executiva. Os estudos dos componentes que irão compor a envoltória da edificação, assim como executado neste trabalho, representa um avanço essencial para o desenvolvimento de edificações mais confortáveis, eficientes e adequadas às exigências normativas.

5.1 LIMITAÇÕES DO TRABALHO

É de grande relevância, enfatizar algumas limitações encontradas na elaboração do presente estudo.

- a. Os resultados se limitam para a cidade de Recife-PE cujo arquivo climático foi utilizado.
- b. Os resultados obtidos podem ser diferentes para outras cidades também localizadas na zona bioclimática 5A.
- c. Foi desconsiderado possíveis áreas de sombreamento na fachada devido vizinhança.
- d. Não foi apresentado nos gráficos a influência de cada APP nos resultados dos indicadores.

5.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como recomendação para trabalhos futuros:

- a. Avaliar os resultados para um número maior de cidades características.
- b. Avaliar a influência da variação da orientação do edifício nos resultados dos indicadores de desempenho.
- c. Analisar a influência de cada APP no resultado de desempenho térmico final da unidade habitacional.
- d. Estudar a variável abertura para ventilação utilizando apenas o vidro incolor.

REFERÊNCIAS

- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15220: Desempenho térmico de edificações**. Rio de Janeiro, 2024.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15575: Edificações habitacionais - Desempenho**. Rio de Janeiro, 2024.
- AHMED, Emad A.; SUWAED, Mahmood; SHAKIR, Ahmed M.; GHAREEB, Ahmed. **The impact of window orientation, glazing, and window-to-wall ratio on the heating and cooling energy of an office building**: The case of hot and semi-arid climate, *Journal of Engineering Research*, v. 13, Issue 1, 2025, p. 409-422, ISSN 2307-1877, <https://doi.org/10.1016/j.jer.2023.10.034>. Disponível em: (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S230718772300295X>)
- AKUTSU, Maria; LOPES, David. (1988) **Simulação do desempenho térmico de edificações**. IN: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT). Tecnologia de edificações/ projeto de divulgação tecnológica Lix da Cunha. São Paulo: Pini: IPT.
- AMARAL, Ana R.; RODRIGUES, Eugénio; GASPAR, Adélio R.; GOMES, Álvaro. **A thermal performance parametric study of window type, orientation, size and shadowing effect**. *Sustainable Cities and Society*, v 26, 2016, p. 456-465, ISSN 2210-6707. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.05.014>
- ARAÚJO, Iuri Ávila L. de; BITTENCOURT, Leonardo S. **Eficácia da ventilação natural na manutenção da qualidade do ar interno em climas brasileiros**. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 19. ENTAC 2022, Canela. Anais... Porto Alegre: ANTAC, 2022. p. 1-14.
- BERGAMO, Ana Paula Rodrigues Horita; MOTTER, Camila Belim. **A origem do vidro e seu uso na arquitetura**. In: ENCONTRO CIENTÍFICO CULTURAL INTERINSTITUCIONAL, 12., 2014, Cascavel. *Anais do 12º Encontro Científico Cultural Interinstitucional*. Cascavel: Faculdade Assis Gurgacz, 2014. p. 1-7. ISSN 1980-7406.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Projeto EEE – Componentes Construtivos**. Disponível em: <https://projeteee.mme.gov.br/componentes-construtivos/> Acesso em: 30 jul. 2025.
- BRASIL. Ministério das Cidades/Secretaria de Assuntos Estratégicos da Presidência da República. **Pesquisa de satisfação dos beneficiários do Programa Minha Casa Minha Vida**/editado por Fernando Garcia de Freitas e Érica Negreiros de Camargo – Brasília, DF: MCIDADES; SNH; SAE-PR; IPEA, 2014 120 p.
- CARVALHO, D. P. **Desempenho térmico em habitações unifamiliares de interesse social com parede de concreto armado na zona bioclimática 2 brasileira**. 2012. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria-RS.

CUCE, Erdem; RIFFAT, Saffa B.; **A smart building material for low/zero carbon applications: heat insulation solar glass—characteristic results from laboratory and *in situ* tests**, *International Journal of Low-Carbon Technologies*. 2017. v. 12. Issue 2, p. 126–135, <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctw009>

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 20 anos** - Rio de Janeiro: EPE, 2024. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/anuario-estatistico-de-energia-eletrica-2022>. Acesso em: 10 dez. 2024.

FERREIRA, Camila Carvalho; PEREIRA, Iraci Miranda. **Avaliação do desempenho térmico de habitação de interesse social de acordo com a NBR 15575 para as diversas zonas bioclimáticas.**, XVI ENTAC, JUIZ DE FORA, 2012. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/316604899_AVALIACAO_DO_DESEMPENHO_TERMICO_DE_HABITACAO_DE_INTERESSE_SOCIAL_DE_ACORDO_COM_A_NBR_15575_PARA_AS_DIVERSAS_ZONAS_BIOCLIMATICAS. Acesso em: 10 dez. 2024.

GEALH, Jucélia Kuchla Vieira. **Análise crítica da implantação da NBR 15575 em construtoras e incorporadoras.** 2018. 350 p. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.

GHISI, Enedir; MASSIGNANI, Ricardo Felipe. **Thermal performance of bedrooms in a multi-storey residential building in southern Brazil. Building And Environment.** [S.L.], v. 42, n. 2, p. 730-742, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.10.026> fev. 2007. Elsevier BV. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S036013230500466X>. Acesso em: 20 mar. 2025

GIOVANAZ, Alfredo Henrique; KRISTINER, Isabel; SARTORI, João Marcos. ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE MATERIAIS E MÉTODOS CONSTRUTIVOS NO DESEMPENHO TÉRMICO EM HABITAÇÃO SOCIAL NO MUNICÍPIO DE LAJEADO/RS. **Revista Destaques Acadêmicos**, Lajeado, RS, v. 12, n. 4, 2020. DOI: 10.22410/issn.2176-3070.v12i4a2020.2411. Disponível em: <https://www.univates.br/revistas/index.php/destaques/article/view/2411>. Acesso em: 14 ago. 2025.

HIRATA, Francini. "Minha Casa, Minha Vida": Política habitacional e de geração de emprego ou aprofundamento da segregação urbana?. **Revista Aurora**, Marília, SP, v. 2, n. 2, p. 3–11, 2009. DOI: [10.36311/1982-8004.2009.v2n2.1202](https://doi.org/10.36311/1982-8004.2009.v2n2.1202). Disponível em: <https://revistas.marilia.unesp.br/index.php/aurora/article/view/1202>. Acesso em: 29 mar. 2025.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Panorama Censo 2022**. Disponível em: <https://censo2022.ibge.gov.br/panorama/>. Acesso em: 13/03/2025.

IPEA – INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. **Pesquisa de satisfação dos beneficiários do Programa Minha Casa Minha Vida**. Brasília, DF: IPEA, 2013. Disponível em:

<https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/3298/1/Pesquisa%20de%20satisfa%20c3%a7%20dos%20benefici%20a1rios%20do%20Programa%20Minha%20Casa%20Minha%20Vida.pdf>. Acesso em: 15 mar. 2024

KIM, Soojung; ZADEH, Puyan A.; STAUB-FRENCH, Sheryl; FROESE, Thomas; CAYKA, Belgin. **Assessment of the Impact of Window Size, Position and Orientation on Building Energy Load Using BIM**, *Procedia Engineering*, v. 145, 2016, p. 1424-1431, ISSN 1877-7058, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.04.179>.

KRELLING, Amanda F.; ELI, Letícia G.; OLINGER, Marcelo S.; VEIGA, Rodolfo K.S.; MELO, Ana P.; LAMBERTS, Roberto. Proposta de método de avaliação do desempenho térmico de residências: NBR 15575. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 18., 2020, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: ANTAC, 2020. Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/entac/article/view/847/529> . Acesso em: 27 mar. 2025.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência Energética na Arquitetura**. Rio de Janeiro: ELETROBRÁS, 2014

MACIEL, A. C. F. (2013). **Energia Incorporada de Fachadas Ventiladas. Estudo de Caso para Edificação Habitacional em Brasília-DF**. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.DM-018A/13, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 146p.

MAZZAFERRO, Leonardo. **INFLUÊNCIA DE ELEMENTOS CONSTRUTIVOS DO ENVELOPE NO DESEMPENHO TÉRMICO DE EDIFICAÇÕES UNIFAMILIARES**. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

MELO, Ana Paula; WESTPHAL, Fernando Simon; Matos, MICHELE. **Apostila do curso básico do programa EnergyPlus**. Florianópolis: LabEEE/UFSC, 2009.

MELO, Thiago da Costa. **Eficiência energética e conforto térmico em edificações em Recife utilizando o EnergyPlus**. 2018. Dissertação do Curso (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018.

MENDES, Nathan; WESTPHAL, Fernando Simon; LAMBERTS, Roberto; CUNHA NETO, José Antônio Bellini da. Uso de instrumentos computacionais para análise do desempenho térmico e energético de edificações no Brasil. **Ambiente Construído**, [S. l.], v. 5, n. 4, p. 47–68, 2008. Disponível em: <https://seer.ufrgs.br/index.php/ambienteconstruido/article/view/3657>. Acesso em: 30 jul. 2025

MOCHIZUKI, Daniel O. **Análise das Técnicas da Ventilação Sob Demanda e do Economizador de Ar Externo em Sistemas de Condicionamento de Ar**. 2014. Dissertação de Mestrado (Pós-Graduação em Engenharia Mecânica) – UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ, Itajubá, 2014.

NUNES, V. D. L.; HIPPERT, M. A. S.; CARVALHO, A. R. de; RUBIM, D. F. **A implantação da norma NBR 15575 e seu impacto no setor de construção civil**. *PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção*, Campinas, SP, v. 12, p. e021010, 2021. DOI: <http://doi.org/10.20396/parc.v12i00.8656159>.

OLIVEIRA, Paulo Américo de; LUNARDI, Diana Gonçalves. Influência da envoltória no desempenho termoenergético de edificações institucionais no semiárido. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, Campinas, SP, v. 9, n. 4, p. 276-289, dez. 2018. DOI: 10.20396/parc.v9i4.8651048. Disponível em: <https://periodicos.sbu.unicamp.br/ojs/index.php/parc/article/view/8651048>. Acesso em: 24 abr. 2025.

ONU. Organização das Nações Unidas. **Declaração Universal dos Direitos Humanos**. 1948. Disponível em: <https://www.unicef.org/>. Acesso em mai. 2022. Disponível em: <https://unric.org/pt/declaracao-universal-dos-direitos-humanos/>. Acesso em: 10 dez. 2024.

PBE EDIFICA. Programa Brasileiro de Etiquetagem de Edificações. **Anexo da Portaria INMETRO nº 50/2013: Anexo Geral V – Catálogo de Propriedades Térmicas de Paredes, Coberturas e Vidros**. Brasil, 2017.

PINTO, Mônica Martins. **Avaliação preditiva de conforto térmico em ambientes de escritórios climatizados próximos a fachadas com alto percentual de vidro**. 2023. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2023.

SANTOS, Vitor Arantes. **Sistema construtivo em paredes de concreto: uma abordagem técnica e econômica**. 2021. 120 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/31559/4/SistemaConstrutivoParedes.pdf>. Acesso em: 10 dez. 2024.

SAYADI, S.; HAYATI, A.; SALMANZADEH, M. **Optimization of Window-to-Wall Ratio for Buildings Located in Different Climates: An IDA-Indoor Climate and Energy Simulation Study**. *Energies* 2021, 14, 1974. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14071974>.

SILVA, Keke Rosberg Guimarães da; TOLEDO, Alexandre Márcio. **EFEITO DO AUMENTO DA TAXA DE RENOVAÇÃO DO AR NO DESEMPENHO TÉRMICO DE DORMITÓRIOS DE UM EDIFÍCIO VERTICAL MULTIFAMILIAR NATURALMENTE VENTILADO NA ZB 8**. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 16., 2021. *Anais [...]. [S. l.]*, 2021. p. 870–879. Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/encac/article/view/4475>. Acesso em: 30 jul. 2025.

SORGATO, M.J.; MARINOSKI, D.L; MELO, A.P.; LAMBERTS, R. **Nota técnica referente à avaliação para a norma de desempenho NBR 15575 em consulta pública.** 2012. Disponível em: <https://labeee.ufsc.br/node/397> . Acesso em: 27 mar. 2025.

SORGATO, Márcio José. **Desempenho térmico de edificações residenciais unifamiliares ventiladas naturalmente.** 2009. 216 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

SORGATO, Márcio José; VERSAGE, Rogério de Souza; LAMBERTS, Roberto. **A influência da área de ventilação no desempenho térmico de edificações residenciais.** Florianópolis: LabEEE/UFSC, 2011. (Nota Técnica).

SPANNENBERG, Mariane G. **Análise de desempenho térmico, acústico e lumínico em habitação de interesse social: Estudos de caso em Marau-RS.** 2006. Dissertação de Mestrado (Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

TAMIETTI, Gabriel. Brasil registra déficit habitacional de 6 milhões de domicílios. **Fundação João Pinheiro (FJP)**, Belo Horizonte, 24 abr. 2024. Disponível em: <https://fjp.mg.gov.br/brasil-registra-deficit-habitacional-de-6-milhoes-de-domicilios/>. Acesso em: 10/12/2024

TIBÚRCIO, C. S. P. **Ventilação Natural em Edificações Residenciais: parâmetros normativos para a configuração das aberturas.** 2017. Tese de Doutorado em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Alagoas, Maceió.

TROUP, Luke; PHILLIPS, Robert; ECKELMAN, Matthew J; FANNON, David. **Effect of window-to-wall ratio on measured energy consumption in US office buildings.** *Energy and Buildings*, v. 203, p. 29, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109434>. Disponível em: (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778819307509>)

VEIGA, Clara Zibetti Matuella. **Análise do desempenho térmico de uma residência unifamiliar por meio de simulação computacional.** 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2023.

WESTPHAL, Fernando Simon. Avaliação de desempenho térmico de fachadas com vidros de controle solar em um edifício de escritórios. In: WORKSHOP DE TECNOLOGIA DE PROCESSOS E SISTEMAS CONSTRUTIVOS, 2., 2019. **Anais [...].** Porto Alegre: ANTAC, 2019. p. 1–5. Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/tecsic/article/view/379>. Acesso em: 30 jul. 2025.

**ANEXO A – CRITÉRIO PARA OS NÍVEIS DE DESEMPENHO
INTERMEDIÁRIO E SUPERIOR**

Nível de desempenho	Critérios
Intermediário (I)	$\Delta PHFT \geq \Delta PHFT_{\min}^a,$ $Tomáx_{UH,real} \leq Tomáx_{UH,ref} + \Delta Tomáx,$ $Tomín_{UH,real} \geq Tomín_{UH,ref} - \Delta Tomín \text{ e}$ $RedCgTT \geq RedCgTT_{\min}^b$
Superior (S)	$\Delta PHFT \geq \Delta PHFT_{\min},$ $Tomáx_{UH,real} \leq Tomáx_{UH,ref} + \Delta Tomáx,$ $Tomín_{UH,real} \geq Tomín_{UH,ref} - \Delta Tomín \text{ e}$ $RedCgTT \geq RedCgTT_{\min}$
<p>^a $\Delta PHFT_{\min}$ é obtido pela Tabela 20, para o nível intermediário, e pela Tabela 21, para o nível superior.</p> <p>^b $RedCgTT_{\min}$ é obtido pela Tabela 20, para o nível intermediário, e pela Tabela 21, para o nível superior.</p> <p>Deve-se adotar $\Delta Tomáx$ igual a 2 °C para as UH unifamiliares e UH em edificações multifamiliares localizadas no pavimento de cobertura. Para as UH em edificações multifamiliares localizadas nos pavimentos térreo ou tipo, deve-se adotar $\Delta Tomáx$ igual a 1 °C.</p> <p>Deve-se adotar $\Delta Tomín$ igual a 1 °C para todas as UH avaliadas.</p>	

Fonte: ABNT NBR 15575-1:2024

ANEXO B – INCREMENTO MÍNIMO DO PHFT,UH(REAL) E REDUÇÃO MÍNIMA DA CgTT,UH(REAL) PARA O NÍVEL INTERMEDIÁRIO

Critério		Tipologia			
		Unifamiliar	Multifamiliar		
			Pavimento térreo	Pavimento tipo	Pavimento cobertura
PHFT_{UH,ref} (%)	CgTT_{UH,ref}/Ap_{,UH} kWh/(ano.m²)	ΔPHFT_{min} (%)			
PHFT _{UH,ref} <70%	Todos os valores	Obtido a partir do ábaco ou das equações do Anexo D			
PHFT _{UH,ref} ≥70%	Todos os valores	0	0	0	0
PHFT_{UH,ref} (%)	CgTT_{UH,ref}/Ap_{,UH} kWh/(ano.m²)	RedCgTT_{min} (%)			
PHFT _{UH,ref} <70%	Todos os valores	0	0	0	0
PHFT _{UH,ref} ≥70%	CgTT _{UH,ref} /Ap _{,UH} <100	17	15	22	15
	CgTT _{UH,ref} /Ap _{,UH} ≥100	27	20	25	20

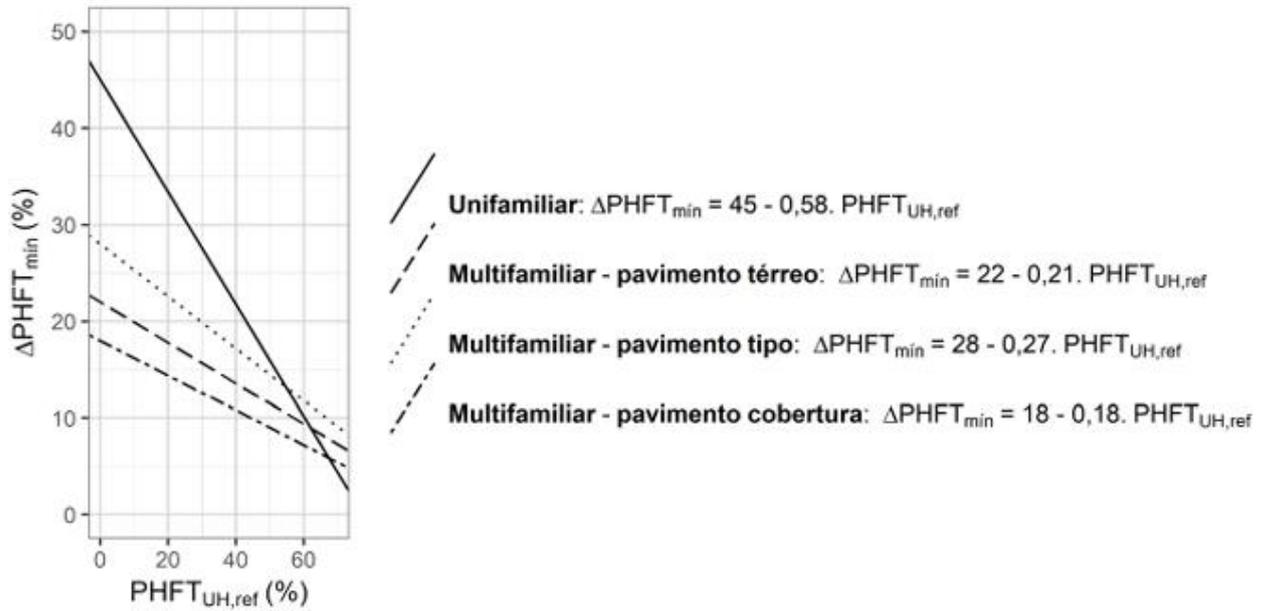
Fonte: Adaptado ABNT NBR 15575-1:2024

ANEXO C – INCREMENTO MÍNIMO DO PHFT,UH(REAL) E REDUÇÃO MÍNIMA DA CgTT,UH(REAL) PARA O NÍVEL SUPERIOR

Critério		Tipologia			
		Unifamiliar	Multifamiliar		
			Pavimento térreo	Pavimento tipo	Pavimento cobertura
PHFT_{UH,ref} (%)	CgTT_{UH,ref}/Ap_{UH} kWh/(ano.m²)	ΔPHFT_{min} (%)			
PHFT _{UH,ref} <70%	Todos os valores	Obtido a partir do ábaco ou das equações do Anexo D			
PHFT _{UH,ref} ≥70%	Todos os valores	0	0	0	0
PHFT_{UH,ref} (%)	CgTT_{UH,ref}/Ap_{UH} kWh/(ano.m²)	RedCgTT_{min} (%)			
PHFT _{UH,ref} <70%	Todos os valores	0	0	0	0
PHFT _{UH,ref} ≥70%	CgTT _{UH,ref} /Ap _{UH} <100	35	30	45	30
	CgTT _{UH,ref} /Ap _{UH} ≥100	55	40	50	40
NOTA: O nível superior também pode ser obtido se o PHFT _{uh,real} do modelo real for maior ou igual a 95%, juntamente com o atendimento ao critério de temperaturas anuais máxima e mínima (Tomáx,UHe Tomín,UH)					

Fonte: Adaptado ABNT NBR 15575-1:2024

**ANEXO D – ÁBACO E EQUAÇÕES PARA OBTER O ΔPHFT_{\min} QUANDO
O $\text{PHFT}_{\text{UH,REF}}$ FOR INFERIOR A 70%**



Fonte: ABNT NBR 15575-1:2024