

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

Matheus Dutra Bier

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DE UMA RESIDÊNCIA
UNIFAMILIAR EM PORTO ALEGRE SEGUNDO OS CONCEITOS DE
DESEMPENHO DA NBR 15.575:2013 E DE CONFORTO TÉRMICO DA ASHRAE
55:2017**

Porto Alegre

Dezembro de 2019

MATHEUS DUTRA BIER

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DE UMA RESIDÊNCIA
UNIFAMILIAR EM PORTO ALEGRE SEGUNDO OS CONCEITOS DE
DESEMPENHO DA NBR 15.575:2013 E DE CONFORTO TÉRMICO DA ASHRAE
55:2017**

Trabalho de Diplomação apresentado à Comissão de Graduação do Curso de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador: Rômulo Plentz Giralt

Coorientadora: Cristiane Sardin Padilla de Oliveira

Porto Alegre

Dezembro de 2019

MATHEUS DUTRA BIER

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DE UMA RESIDÊNCIA
UNIFAMILIAR EM PORTO ALEGRE SEGUNDO OS CONCEITOS DE
DESEMPENHO DA NBR 15.575:2013 E DE CONFORTO TÉRMICO DA ASHRAE
55:2017**

Este Trabalho de Diplomação foi considerado adequado como pré-requisito para obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pela Banca Examinadora, pelo Professor Rômulo Plentz Giralt e pela Comissão de Graduação do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, dezembro de 2019

BANCA EXAMINADORA

Prof. Rômulo Plentz Giralt (UFRGS)

Me. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Orientador

Prof^a Cristiane Sardin Padilla de Oliveira (UFRGS)

Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Coorientadora

Prof^a Luciani Somensi Lorenzi (UFRGS)

Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Eng. Renato Fonseca Pedrotti

Eng. De Energia pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

AGRADECIMENTOS

Em um primeiro momento, gostaria de agradecer à minha família pelo apoio incondicional ao longo de todos os anos de estudo. À minha irmã pelo auxílio e incentivo constante e principalmente aos meus pais, que não mediram esforços para proporcionar a seus filhos as melhores condições possíveis, mesmo que isso pudesse lhes custar a realização dos próprios sonhos e objetivos pessoais.

Agradeço à Clara pela leveza, alegria e inspiração trazidas por ela a meus últimos anos de graduação, por ter sido minha amiga e companheira nos momentos de felicidade e por ter estado ao meu lado também nos momentos difíceis.

Da mesma forma, agradeço aos meus colegas de graduação, que vieram a se tornar grandes amigos ao longo dos anos e serviram como uma das principais motivações para a continuidade dos meus estudos no curso de Engenharia Civil.

Gostaria de agradecer também aos colegas de trabalho da Petinelli, principalmente à Gabriela Seibert e ao Eduardo Trindade, que se mostraram sempre disponíveis para transmitir seus conhecimentos relacionados à simulação computacional e contribuíram muito para a realização deste trabalho.

Por fim, gostaria de agradecer a Universidade Federal do Rio Grande do Sul pela estrutura e pelo ensino de qualidade durante o período da graduação. Vivi alguns dos melhores anos da minha vida dentro desta universidade, na qual pude conhecer pessoas incríveis e usufruir de oportunidades únicas dentro e fora do âmbito acadêmico. Através das experiências e da convivência com pessoas de diferentes círculos sociais, pude amadurecer, ampliar minha visão de mundo e me tornar não apenas um profissional mais qualificado, mas também uma pessoa melhor. Nada disso seria possível sem a existência de uma universidade pública, gratuita e plural como a UFRGS. Muito obrigado.

RESUMO

O desempenho térmico de uma edificação, relacionado principalmente ao comportamento térmico dos elementos construtivos que a constituem, é um fator importante na avaliação de sua qualidade. Entretanto, mais importante do que o desempenho de sua envoltória é o conforto térmico que uma edificação confere a seus ocupantes. A Norma de Desempenho - NBR 15.575 (ABNT, 2013) apresenta requisitos e critérios para a avaliação do desempenho térmico da envoltória de uma edificação, mas não traz exigências quanto as condições de conforto fornecidas pela construção. Dessa forma, este trabalho se propôs a mensurar o conforto térmico proporcionado por uma Habitação de Interesse Social localizada em Porto Alegre que atendesse aos requisitos mínimos de desempenho apresentados na NBR 15.575 (ABNT, 2013). A avaliação de conformidade com os requisitos da norma brasileira de desempenho se deu através dos métodos de Procedimento Simplificado e Simulação Computacional, conforme exigido pela normativa. A verificação do conforto térmico foi realizada com base nos requisitos da norma americana ASHRAE Standard 55 (2017), com base na metodologia do conforto adaptativo para edificações naturalmente ventiladas. A avaliação de conformidade com os requisitos da normativa americana também se deu através de simulações computacionais. Para todas as simulações, foi utilizado o programa computacional *EnergyPlus*, ferramenta sugerida pela NBR 15.575 (ABNT, 2013) para a realização de análises deste tipo. Os resultados indicaram um conforto térmico insatisfatório para a edificação avaliada, apesar da conformidade com os requisitos da norma de desempenho.

Palavras-chave: Conforto Térmico, Desempenho Térmico, Habitação de Interesse Social, NBR 15.575, ASHRAE 55.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma de trabalho	16
Figura 2 - Zoneamento Bioclimático Brasileiro	27
Figura 3 - Zonas da Carta de Givoni	28
Figura 4 - Limites de Aceitabilidade para Metodologia de Conforto Adaptativo - ASHRAE 55 (2017)	35
Figura 5 - Detalhe Esquemático da Parede Externa adotada.....	40
Figura 6 - Detalhe esquemático da cobertura.....	41
Figura 7 - Modelo Tridimensional da Edificação.....	42
Figura 8 - Distribuição das zonas térmicas no modelo.....	42
Figura 9 - Adaptação de elemento de parede externa para simulação computacional	44
Figura 10 - Rotina de ocupação da edificação - Dias de semana	46
Figura 11 - Rotina de ocupação da edificação - Finais de semana.....	46
Figura 12 - Metodologia dinâmica de determinação da vestimenta para a temperatura externa às 6 horas da manhã - ASHRAE 55	48
Figura 13 - Rotina de uso da iluminação - Dias de semana	49
Figura 14 - Rotina de uso da iluminação - Finais de semana	49
Figura 15 - Participação dos eletrodomésticos no consumo residencial da região Sul	50
Figura 16 - Rotina de uso dos equipamentos - Dias de semana	51
Figura 17 - Rotina de uso dos equipamentos - Finais de semana.....	51
Figura 18 - Relação entre temperatura operativa interna e temperatura média mensal externa	53
Figura 19- Orientação crítica de inverno (a) e orientação crítica de verão (b) segundo os critérios da NBR 15.575	56
Figura 20 - Variação das temperaturas externas e internas ao longo de um dia típico de verão	57
Figura 21 - Variação das temperaturas externas e internas ao longo de um dia típico de inverno.....	58
Figura 22 - Variação dos limites da faixa de conforto térmico do modelo adaptativo para a região estudada	59
Figura 23 - Variação da temperatura operativa interna para a zona “Sala de Estar” ao longo do ano – Condição crítica de verão	60

Figura 24 - Variação da temperatura operativa interna para a zona “Sala de Estar” ao longo do ano – Condição crítica de inverno	61
Figura 25 - Variação da temperatura operativa interna para a zona “Quarto 1” ao longo do ano – Condição crítica de verão	61
Figura 26 - Variação da temperatura operativa interna para a zona “Quarto 1” ao longo do ano – Condição crítica de inverno	62
Figura 27 - Variação da temperatura operativa interna para a zona “Quarto 2” ao longo do ano – Condição crítica de verão	62
Figura 28 - Variação da temperatura operativa interna para a zona “Quarto 2” ao longo do ano – Condição crítica de inverno	63
Figura 29 - Desconforto térmico total sob as condições críticas de inverno e de verão	64
Figura 30 - Total de horas de desconforto para a Condição crítica de verão (CCV) e de inverno (CCI).....	66
Figura 31 - Frequência de Desconforto Térmico no ambiente “Sala de Estar”	67
Figura 32 - Frequência de Desconforto Térmico no ambiente “Quarto 1”	68
Figura 33- Frequência de Desconforto Térmico no ambiente “Quarto 2”	68
Figura 34 - Intensidade máxima de desconforto pro frio	69
Figura 35 - Intensidade máxima do desconforto por calor	70
Figura 36 - Intensidade de Desconforto Térmico diário médio – Sala de Estar.....	70
Figura 37 - Intensidade de Desconforto Térmico – Diário – Quarto 1.....	71
Figura 38 - Intensidade de Desconforto Térmico diário médio – Quarto 2	71
Figura 39 - Intensidade de desconforto térmico mensal – Sala de Estar.....	72
Figura 40 - Intensidade do desconforto térmico mensal - Quarto 1	72
Figura 41 - Intensidade do desconforto térmico mensal - quarto 2.....	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores de metabolismo para tipos de atividade	25
Tabela 2 - Valores máximos admissíveis para a transmitância térmica das paredes externas .	31
Tabela 3 – Valores máximos admissíveis para a capacidade térmica de paredes externas	31
Tabela 4 - Valores máximos admissíveis para a transmitância térmica da cobertura	32
Tabela 5 - Critério de avaliação de desempenho térmico para as condições de verão.....	33
Tabela 6 - Critério de desempenho térmico para as condições de inverno	33
Tabela 7 - Taxas metabólicas para diferentes atividades - ASHRAE 55 (2017)	47

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Estratégias de condicionamento térmico passivo - NBR 15.220 (2005).....	29
Quadro 2- Estratégias de Condicionamento Térmico para cada zona Bioclimática	30
Quadro 3- Características do projeto representativo para casa unifamiliar térrea.....	39
Quadro 4 - Propriedades térmicas adotadas para o cálculo da transmitância (U) e capacidade térmica (CT) dos componentes construtivos utilizados.....	41
Quadro 5 - Lista de materiais e propriedades térmicas adotadas para simulação	44
Quadro 6 - Verificação de conformidade dos elementos da envoltória para os requisitos de transmitância (U) e capacidade térmica (CT) da NBR 15.575.....	54
Quadro 7 - Verificação de atendimento dos requisitos da NBR 15.575 para diferentes absorptâncias solares – Dia típico de verão.....	56
Quadro 8 - Verificação de atendimento dos requisitos da NBR 15.575 para diferentes absorptâncias solares - Dia típico de inverno	57
Quadro 9 - Cenários de avaliação de conforto térmico	60
Quadro 10 - Total de horas de desconforto nas zonas regularmente ocupadas no período de um ano	64
Quadro 11 - Horas de desconforto por frio e calor considerando apenas os períodos ocupados na zona “Sala de Estar”	65
Quadro 12 - Horas de desconforto por frio e calor considerando apenas os períodos ocupados na zona “Quarto 1”	65
Quadro 13 - Horas de desconforto por frio e calor considerando apenas os períodos ocupados na zona “Quarto 2”	65

LISTA DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASHRAE – American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers

CCV – Condição Crítica de Verão

CCI – Condição Crítica de Inverno

DOE – Department of Energy of the United States

Eq. – Equação

HVAC – Heating, Ventilation and Air Conditioning

FDT – Frequência de Desconforto Térmico

IDF – Input Data File

IDT – Intensidade de Desconforto Térmico

LabEEE – Laboratório de Eficiência Energética em Edificações

NBR – Norma Brasileira

PMCMV – Programa Minha Casa Minha Vida

PMV – Voto Estimado Médio (Predicted Mean Vote)

PPD – Porcentagem Estimada de Pessoas Insatisfeitas (Predicted Percentage of Dissatisfied)

RS – Rio Grande do Sul

TOP – Temperatura operativa

TRY – Test Reference Year

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	13
2.	DIRETRIZES DE PESQUISA	15
2.1.	QUESTÃO DE PESQUISA.....	15
2.2.	OBJETIVO DA PESQUISA.....	15
2.3.	PRESSUPOSTO	15
2.4.	DELIMITAÇÕES	15
2.5.	DELINEAMENTO	16
3.	REVISÃO DA LITERATURA E DEFINIÇÕES	17
3.1.	DESEMPENHO.....	17
3.2.	DESEMPENHO TÉRMICO.....	17
3.2.1.	Propriedades Térmicas	18
3.3.	CONFORTO TÉRMICO	19
3.3.1.	Variáveis Climáticas e Ambientais	20
3.3.2.	Variáveis Arquitetônicas	22
3.3.3.	Variáveis Humanas	24
3.3.4.	Indicadores de Conforto Térmico	25
3.4.	NORMAS DE DESEMPENHO E CONFORTO TÉRMICO	27
3.4.1.	NBR 15.220	27
3.4.2.	NBR 15.575	30
3.4.3.	ASHRAE 55.....	34
3.5.	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	36
3.5.1.	EnergyPlus	36
3.5.2.	OpenStudio SketchUp Plug-in	37
4.	METODOLOGIA	38
4.1.	EDIFICAÇÃO ESCOLHIDA.....	38
4.2.	AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO	40
4.2.1.	Método simplificado (NBR 15575)	40
4.2.2.	Simulação computacional (NBR 15575)	41
4.3.	AVALIAÇÃO DO CONFORTO TÉRMICO.....	45
4.3.1.	Parâmetros da Simulação	45
4.3.2.	Atendimento das condições de conforto térmico	52
5.	RESULTADOS	54
5.1.	PROCEDIMENTO SIMPLIFICADO (NBR 15575).....	54

5.2. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL (NBR 15575)	55
5.3. CONFORTO TÉRMICO (ASHRAE 55).....	58
5.3.1. Distribuição do desconforto	65
5.3.2. Frequência de Desconforto Térmico (FDT)	67
5.3.3. Intensidade do Desconforto Térmico (IDT)	69
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	74
6.1. CONCLUSÕES	74
6.2. SUGESTÕES DE PESQUISA.....	76
REFERÊNCIAS	77

1. INTRODUÇÃO

A Declaração Universal dos Direitos Humanos afirma no Artigo XXV parágrafo primeiro que “Todo ser humano tem direito a um padrão de vida capaz de assegurar-lhe, e a sua família, saúde e bem-estar, inclusive alimentação, vestuário, habitação, [...]” (Assembleia Geral da ONU, 2014). A moradia adequada é um direito humano universal garantido pela ONU desde 1948, sendo elencado também como um dos direitos fundamentais para a vida das pessoas.

No Brasil, um levantamento feito pela Associação Brasileira de Incorporadoras Imobiliárias (Abrainc) em parceria com a Fundação Getúlio Vargas (FGV) aponta que o déficit habitacional no país chegou a 7,78 milhões de unidades em 2017 (O ESTADO DE S. PAULO, 2019). Somado a isso, a Síntese de Indicadores Sociais (SIS) 2018, documento divulgado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2018), indicou que 54,8 milhões de brasileiros estavam abaixo da linha de pobreza estabelecida pelo Banco Mundial.

Com o intuito de suprir estas carências, uma série de programas sociais tem sido criada em todo o Brasil, dentre eles o “Minha Casa, minha Vida”, que busca fornecer moradias que apresentem as mínimas condições necessárias para abrigar famílias de baixa renda. No entanto, o extenso território brasileiro e a grande variedade de clima encontrado ao longo do país submetem as edificações a condições distintas dependendo da região na qual estas se encontram. Essa diversidade climática resulta, por consequência, em necessidades específicas a serem atendidas pelas edificações em cada região.

Trazendo luz à esta questão, a norma NBR 15.220 (ABNT, 2005) estabeleceu o zoneamento bioclimático brasileiro indicando, para cada uma das oito zonas definidas no documento, diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social, apresentando também as estratégias bioclimáticas mais recomendadas para cada local.

Buscando definir um padrão mínimo de comportamento para as edificações no país, foi publicada em 2013 a NBR 15.575 (ABNT, 2013), norma que apresenta os requisitos gerais de desempenho para edificações habitacionais e seus sistemas, incluindo exigências referentes ao desempenho térmico das construções. Referenciada na NBR 15.220 (ABNT, 2005), a normativa apresenta metodologias de avaliação do desempenho térmico de habitações e estipula níveis mínimos considerados aceitáveis para cada uma das oito zonas bioclimáticas brasileiras.

A grande variação das condições climáticas encontrada em algumas regiões do Brasil, no entanto, submete muitas vezes os ocupantes de edificações a situações extremas. Lamberts

(2013) destaca o desenvolvimento de normativas referentes ao desempenho e eficiência energética das edificações como um passo importante em direção a um cenário mínimo de exigências, mas afirma que as normas, por si só, não garantem edificações mais eficientes e confortáveis.

Tomando como referencial o projeto de uma edificação não climatizada situada na Zona bioclimática ZB8, D'ell Santo et al (2014) desenvolveram um trabalho destacando a contradição entre o conforto e o desempenho térmico obtidos a partir dos critérios de avaliação adotados pela NBR 15.575 (ABNT, 2013). As pesquisadoras identificaram que alguns fatores como a extrema simplificação do processo de análise de desempenho térmico sugerido pela norma e a ausência de correlação com referenciais de conforto térmico tornam vulnerável a metodologia apresentada pela normativa.

Silveira (2014) verificou também, para as condições climáticas de Campinas-SP, Curitiba-PR e Natal-RN, o conforto térmico de uma edificação unifamiliar utilizando a abordagem adaptativa proposta pela ASHRAE 55 (2017). Segundo o autor, os resultados obtidos por ele demonstraram substancial importância do modelo adaptativo na verificação do conforto térmico em projeto para edificações destinadas à habitação de interesse social.

Considerando a importância do conforto térmico na qualidade de vida das pessoas e no desempenho de suas atividades diárias, o presente trabalho se propõe a avaliar o conforto térmico proporcionado por uma edificação localizada em Porto Alegre e construída de maneira a atender aos requisitos mínimos de desempenho térmico estipulados pela NBR 15.575 (ABNT, 2013).

Inicialmente, pretende-se realizar a modelagem da edificação e analisar o desempenho térmico do modelo resultante através do processo de simulação computacional, verificando, dessa forma, a conformidade do modelo proposto com os critérios mínimos de desempenho para a respectiva zona bioclimática. Após a confirmação do atendimento dos requisitos impostos pela NBR 15.575 (ABNT, 2013), será verificado, com base no método proposto pela normativa internacional ASHRAE Standard 55 de 2017, o nível de conforto térmico proporcionado por esta residência a seus ocupantes. Para tanto, será analisado o comportamento das temperaturas internas em cada uma das zonas regularmente ocupadas da edificação ao longo de um ano, identificando a frequência e intensidade dos períodos de desconforto por frio e por calor na residência.

2. DIRETRIZES DE PESQUISA

2.1. QUESTÃO DE PESQUISA

A garantia de atendimento dos requisitos mínimos de desempenho térmico estabelecidos pela normativa NBR 15.575 (ABNT, 2013) assegura conforto térmico aos ocupantes de uma edificação?

2.2. OBJETIVO DA PESQUISA

O objetivo principal deste trabalho é a avaliação do conforto térmico, com base no modelo adaptativo sugerido pela normativa internacional ASHRAE 55 (2017), fornecido aos ocupantes de uma edificação localizada em Porto Alegre cujo projeto atende aos requisitos mínimos de desempenho estabelecidos pela norma NBR 15.575 (ABNT, 2013).

2.3. PRESSUPOSTO

O trabalho desenvolvido parte do pressuposto de que as edificações construídas no Brasil, principalmente aquelas destinadas à população de baixa renda, não garantem conforto térmico aos seus ocupantes, apesar de atenderem aos requisitos de desempenho estabelecidos pelas normas brasileiras vigentes.

2.4. DELIMITAÇÕES

O trabalho limita-se a avaliar os resultados obtidos através de simulações termo energéticas computacionais para uma edificação unifamiliar localizada na cidade de Porto Alegre (RS) que atende aos requisitos mínimos de desempenho térmico estabelecidos pela normativa NBR 15.575 (ABNT, 2013). A avaliação de conforto térmico será realizada com base nos parâmetros impostos pela norma internacional ASHRAE 55 (2017) para edificações naturalmente ventiladas.

Para as diretrizes de modelagem serão adotados padrões construtivos considerados representativos das habitações de interesse social mais presentes no território brasileiro. A escolha do modelo padrão será realizada com base em trabalhos e estudos acadêmicos que indiquem as tipologias e materiais mais utilizados na execução destas edificações, tendo como foco principal as habitações destinadas à população de baixa renda (classe C).

O trabalho não pretende analisar os custos e desempenhos individuais dos componentes adotados para construção do modelo utilizado no estudo.

2.5. DELINEAMENTO

O trabalho foi realizado de acordo com as etapas a seguir:

- a) Pesquisa Bibliográfica
- b) Definição da tipologia, materiais e propriedades térmicas dos componentes construtivos do modelo.
- c) Verificação do desempenho e conforto (Figura 1)

Figura 1 - Fluxograma de trabalho



Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

- d) Avaliação dos Resultados

- e) Considerações Finais

3. REVISÃO DA LITERATURA E DEFINIÇÕES

3.1. DESEMPENHO

O primeiro registro conhecido de um regulamento relacionado à construção civil foi atribuído ao Rei Hammurabi, que reinou na Babilônia entre 1955 e 1913 a.C. (BALDASSO, 2009). O artigo 229 do Código de Hammurabi é descrito a seguir:

Artigo 229: O construtor fez uma casa para um homem e o seu trabalho não foi forte, e se a casa cair e matar o dono da casa, então o construtor deve ser morto.

Apesar de não definir materiais ou técnicas específicas a serem utilizadas para a construção da edificação, o texto deixa claro o desempenho esperado quanto ao comportamento da estrutura: a casa deve garantir segurança estrutural ao seu usuário.

No que diz respeito à construção civil dos tempos atuais, o desempenho de uma edificação pode ser entendido como o seu comportamento em uso ao longo de sua vida útil (BLACHERE, 1969). Andrade e Gomes (2017) definem o edifício como um produto que deve apresentar determinadas características que o capacitem a cumprir objetivos e funções para as quais foi projetado, sendo, dessa forma, considerado “bem-comportado” quando atende a esses requisitos.

Para edificações construídas no Brasil, a norma NBR 15.575 (ABNT, 2013c), sob o título geral “Edificações habitacionais – Desempenho”, é quem estabelece os requisitos e critérios para a avaliação do comportamento em uso de uma edificação e de seus sistemas. Além das exigências para sistemas estruturais, hidrossanitários, pisos, vedações e coberturas, a normativa estabelece também critérios relativos ao desempenho térmico, acústico, lumínico e de segurança ao fogo nas edificações.

3.2. DESEMPENHO TÉRMICO

O desempenho térmico de uma construção está relacionado principalmente ao comportamento térmico dos elementos construtivos que a constituem. As propriedades térmicas dos materiais que compõe as paredes e coberturas de um edifício são, dessa forma, determinantes para seu desempenho. Algumas das principais propriedades relacionadas ao desempenho térmico das edificações, cujo conhecimento e entendimento é importante para o desenvolvimento deste trabalho, são apresentadas a seguir conforme sua definição estabelecida na norma NBR 15.220.

3.2.1. Propriedades Térmicas

A normativa NBR 15.220 (ABNT, 2005) traz, em seu anexo B, uma lista de materiais para os quais fornece informações referentes a algumas de suas propriedades individuais. As definições apresentadas pela norma para as propriedades citadas são descritas a seguir:

- a) Absortância (α): A absortância representa o quociente da taxa de radiação solar absorvida por uma superfície pela taxa de radiação solar incidente sobre esta mesma superfície. Como quociente de duas taxas com a mesma unidade, a absortância se constitui em um índice adimensional.
- b) Emissividade (ϵ): A emissividade é definida pela norma como o quociente da taxa de radiação emitida por uma superfície pela taxa de radiação emitida por um corpo negro, à mesma temperatura. Assim como a absortância, não apresenta uma unidade de medida, sendo, portanto, um índice adimensional.
- c) Densidade de massa aparente (ρ): A densidade de massa aparente é definida pela NBR 15220 (ABNT, 2005) como o quociente da massa pelo volume aparente de um corpo e é medida kg/m^3 .

Condutividade térmica (λ): A condutividade térmica é definida pela norma como uma propriedade física de um material homogêneo e isotrópico, no qual se verifica um fluxo de calor constante, com densidade de 1 W/m^2 , quando submetido a um gradiente de temperatura uniforme de 1 Kelvin por metro. Sua unidade de medida é dada em $\text{W}/(\text{m.K})$.

- d) Calor específico (c): O calor específico é definido como o quociente da capacidade térmica pela massa de um material e tem sua unidade de medida em $\text{J}/(\text{kg.K})$.

A partir das propriedades individuais apresentadas para cada material, a norma traz exemplos de análise do comportamento térmico de elementos construtivos tradicionais como paredes e coberturas. As propriedades verificadas para avaliação do comportamento desses conjuntos de materiais e sua definição segundo a normativa são descritas a seguir:

- e) Resistência Térmica de elementos (R): É definida pela NBR 15220 (ABNT, 2005) como o quociente da diferença de temperatura verificada entre as superfícies de um elemento ou componente construtivo pela densidade de fluxo de calor, em regime estacionário. Sua unidade de medida é dada em $(\text{m}^2.\text{K})/\text{W}$

- f) Resistência Total (RT): A resistência total, por sua vez, é definida como o somatório do conjunto de resistências térmicas correspondentes às camadas de um elemento ou componente, incluindo as resistências superficiais interna e externa. Sua unidade de medida também é dada em $(m^2.K)/W$.
- g) Transmitância térmica (U): A transmitância térmica de um conjunto é definida como o inverso da resistência térmica total e tem como sua unidade de medida $W/(m^2.K)$.
- h) Capacidade térmica (CT): A capacidade térmica é dada em J/K , e representa a quantidade de calor necessária para variar em uma unidade a temperatura de um sistema.
- i) Atraso térmico (ϕ): Medido em horas (h), o atraso térmico representa o tempo transcorrido entre uma variação térmica em um meio e sua manifestação na superfície oposta de um componente construtivo submetido a um regime periódico de transmissão de calor.
- j) Fator Solar (FS): O fator solar, ou ainda, fator de ganho solar de elementos opacos é uma propriedade adimensional, definida como o quociente da taxa de radiação solar transmitida através de um elemento opaco pela taxa da radiação solar total incidente sobre a superfície externa do mesmo.

3.3. CONFORTO TÉRMICO

O conceito de conforto térmico é definido pela ASHRAE 55 Environmental Conditions for Human Occupancy (ASHRAE, 2017) como “o estado de espírito no qual se expressa satisfação com o ambiente térmico em que se está inserido”. Dentre as variáveis que podem afetar a sensação de conforto de um indivíduo, a normativa destaca 6 principais, sendo as duas primeiras relacionadas a características do ocupante e as 4 restantes relacionadas ao ambiente térmico em questão:

- a) Taxa metabólica
- b) Isolamento da Vestimenta
- c) Temperatura do ar
- d) Temperatura Radiante
- e) Velocidade do ar
- f) Umidade

Lamberts et al. (2016) afirmam que o corpo humano pode ser considerado como uma “máquina térmica”, dispondo de um mecanismo termorregulador que busca controlar variações térmicas e manter a temperatura do organismo praticamente constante, entre 35 e 37°C. Dessa forma, o corpo busca preservar parte do calor gerado pela atividade metabólica, parcela imprescindível para o funcionamento fisiológico do organismo, e dissipar o restante, evitando, assim, o superaquecimento. A dissipação do calor excedente gerado ocorre através de trocas térmicas, podendo estas serem secas – condução, convecção, radiação – ou úmidas – evaporação (FROTA; SCHIFFER, 2001).

3.3.1. Variáveis Climáticas e Ambientais

As variáveis ambientais que influenciam no conforto térmico e podem ser medidas diretamente são a temperatura do ar, a temperatura radiante, a umidade relativa e a velocidade do ar (LAMBERTS et al, 2014). Para que esses parâmetros possam ser obtidos, no entanto, devem ser verificados os fatores climáticos que caracterizam a região em estudo e sua influência sobre cada uma das variáveis citadas. Frota e Schiffer (2001) afirmam que as variáveis climáticas com maior influência sobre o desempenho térmico dos espaços construídos são a oscilação diária e anual de temperatura e umidade, a radiação solar incidente, o grau de nebulosidade do céu, a predominância de época, os sentidos dos ventos e os índices pluviométricos.

3.3.1.1. Radiação Solar

Como principal fonte de energia, luz e calor do planeta Terra, o sol exerce também grande influência sobre fatores climáticos importantes à arquitetura. A maior influência da radiação é na distribuição de temperaturas do globo (FROTA; SCHIFFER, 2001, p. 53).

A radiação solar pode ser dividida em difusa e direta, sendo a primeira a parcela que sofre interferências no seu trajeto em direção à superfície e a segunda aquela que atinge diretamente a terra. Além de ser a principal influente nos ganhos térmicos em uma edificação, a radiação solar direta é também a fonte de luz mais intensa (LAMBERTS et al, 2014).

Em climas frios, a penetração da radiação direta nos ambientes internos é importante para promover aquecimento, já em climas quentes, somente a radiação difusa é desejável para promover a iluminação do ambiente. (LAMBERTS et al, 2016, p. 31).

3.3.1.2. Temperatura do Ar

A temperatura do ar não é consequência da ação direta do sol. Na verdade, o processo ocorre indiretamente, onde a radiação solar atinge o solo, que converte parte da energia absorvida em calor e aquece o ar posteriormente por convecção (LAMBERTS et al, 2016, pg 31).

Além dos ganhos relacionados à transmissão de calor entre o solo e o ar, as perdas por evaporação, convecção e radiação também são fatores determinantes na temperatura.

3.3.1.3. Umidade Relativa

A grande diferença que o grau de umidade relativa do ar acarreta nas condições climáticas é quanto à amplitude da temperatura diária (FROTA; SCHIFFER, 2001, p. 67). Lamberts (2016) explica essa diferença de amplitude entre climas secos e úmidos:

Os climas secos caracterizam-se por sua baixa umidade e pouca nebulosidade. Nos climas úmidos, durante o dia, a radiação é menor por causa da nebulosidade, além do que, as perdas por evaporação são favorecidas devido à umidade que cobre o solo. Desta forma, a temperatura superficial não atinge os valores dos solos secos.

Durante a noite, as nuvens se interpõem entre a superfície e as camadas altas da atmosfera, que têm uma temperatura muito baixa, originando uma perda menor por radiação. Ao mesmo tempo, ao diminuir a temperatura superficial numa atmosfera saturada de umidade, produz-se elevada condensação acompanhada de liberação de calor, fazendo com que a temperatura atinja valores maiores do que no clima seco. (LAMBERTS, 2016, p. 32).

3.3.1.4. Ventos

Segundo Frota e Schiffer (2001, p. 63), em nível global, o determinante principal das direções e características dos ventos é a distribuição sazonal das pressões atmosféricas. As autoras afirmam que essas variações atmosféricas podem ser explicadas, entre outros fatores pelo aquecimento e resfriamento de terras e mares, pelo gradiente de temperatura do globo e pelo movimento de rotação da Terra.

Os valores desses parâmetros sofrem alterações para distintos locais em função da influência de fatores como circulação atmosférica, distribuição de terras e mares, relevo e revestimento do solo, latitude e altitude (LAMBERTS, 2016)

3.3.1.5. Nebulosidade e Precipitação

A quantidade de radiação que atinge o solo depende, dentre outros fatores, do percentual de recobrimento e da espessura das nuvens no céu. Além disso, a nebulosidade pode também

dificultar a dissipação na atmosfera do calor desprendido do solo à noite. (FROTA; SCHIFFER, 2001).

3.3.2. Variáveis Arquitetônicas

A presença de quatro fatores (temperatura do ar, temperatura radiante, velocidade do ar e umidade relativa) associados ao ambiente dentre os seis indicados pela ASHRAE para a avaliação da sensação de conforto térmico experimentado por um indivíduo em um determinado ambiente interno evidencia a clara relação entre a arquitetura e o conforto.

Essa conexão fica ainda mais explícita quando levado em consideração o tempo que os residentes urbanos passam no interior das edificações. Nos Estados Unidos, por exemplo, a Environmental Protect Agency (2009) destaca que os americanos dispõem, em média, 90% ou mais do seu tempo em ambientes internos. Dessa forma, cabe à arquitetura e às edificações, amenizar as sensações de desconforto impostas por climas rígidos e propiciar ambientes que sejam, no mínimo, tão confortáveis como os espaços ao ar livre em climas amenos. (Frota e Schiffer, 2001).

3.3.2.1. Envoltória (paredes e coberturas)

Segundo Graf (2011), a envoltória ou invólucro de uma edificação compreende as superfícies que fecham a construção e dividem os ambientes, estando em contato com o ambiente externo ou ambientes vizinhos. A autora afirma que, para tornar uma edificação mais eficiente energeticamente, por exemplo, deve-se ajustar o nível de isolamento térmico do invólucro conforme o clima do local do estudo.

As vedações verticais são parte importante da envoltória de uma edificação e exercem funções de estanqueidade à água, isolamento térmica e acústica, capacidade de fixação de peças suspensas e compartimentação em casos de incêndio (LAMBERTS, 2016, p.122). Os sistemas de vedações verticais são compostos tanto por elementos opacos, como as paredes, como também por elementos translúcidos, como os vidros pertencentes às esquadrias periféricas da edificação. Os requisitos e critérios para verificação dos níveis mínimos de desempenho térmico de vedações verticais externas e internas levam em consideração critérios como a transmitância térmica e capacidade térmica das paredes internas e externas.

Os sistemas de cobertura, por sua vez, como parte do edifício habitacional mais exposta a radiação solar, exercem predominante influência na carga térmica transmitida aos ambientes e, por consequência, influenciam diretamente no conforto térmico dos usuários (LAMBERTS,

2016, p.122). Dessa forma, a norma de desempenho brasileira NBR 15.575 apresenta requisitos para a verificação do comportamento adequado dos sistemas de cobertura, utilizando como critérios de avaliação a transmitância térmica do sistema e as condições térmicas propiciadas por ele aos usuários de uma edificação durante um dia típico de verão e um dia típico de inverno.

3.3.2.2. Aberturas

As aberturas presentes na envoltória de uma edificação exercem influência não apenas quanto ao isolamento térmico e acústico de uma edificação, mas também determinam a iluminação e ventilação natural incidente no interior da construção.

Lamberts (2016, p. 36) destaca, por exemplo, que, em uma situação na qual a temperatura interna de um edifício for maior que a externa, a ventilação propiciada pelas aberturas da envoltória pode ser utilizada como uma estratégia de resfriamento natural do ambiente construído por meio da substituição do ar interno pelo externo. Por outro lado, para locais nos quais a temperatura do ar é baixa, o autor sugere o dimensionamento das aberturas da edificação de maneira a promover o aquecimento solar passivo em seu interior. Para isso, as aberturas devem ser projetadas de maneira que a edificação tenha superfícies envidraçadas voltadas para o sol e aberturas reduzidas para fachadas que não recebem insolação, evitando assim as perdas de calor nos ambientes internos.

3.3.2.3. Orientação

Outro fator importante a ser considerado durante a concepção de um edifício é a orientação solar das fachadas. Corbella e Yannas (2001, p. 43) afirmam que, para encontrar a melhor maneira de se posicionar o edifício, um estudo das trajetórias aparentes do sol para o local de interesse deve ser realizado. Os autores destacam que, nos trópicos, por exemplo, durante o verão, as paredes voltadas para leste e oeste, recebem mais energia solar do que aquelas voltadas para o norte e para o sul. Logo, a forma de um edifício construído nesses locais deve ser tal que as paredes voltadas para leste e oeste possuam dimensões menores do que aquelas voltadas para o norte e sul, minimizando, assim, os ganhos solares da edificação em períodos quentes.

3.3.2.4. Dispositivos de sombreamento

O uso de obstáculos para proteger a entrada do sol pelas aberturas de uma edificação e dificultar sua chegada às superfícies do envelope do edifício, se apresenta como mais uma possível estratégia a ser adotada na busca pelo conforto térmico no interior de uma construção.

Como um dos parâmetros utilizados na avaliação do desempenho térmico e energético, o sombreamento das aberturas, segundo Olgyay (1957, apud Kinsel 2009), deve ser avaliado sob o ponto de vista de controle de calor na concepção do projeto arquitetônico, considerando os benefícios da energia térmica no inverno e a exclusão de calor excessivo no verão.

Lamberts, Dutra e Pereira (2013) afirmam que o sombreamento é uma das estratégias mais importantes no Brasil, tendo em vista que o país tem clima quente na maior parte do seu território durante a maior parte do ano. O autor destaca ainda que o uso de brises, marquises, sacadas e venezianas como dispositivos de sombreamento é indicado sempre que a temperatura do ar for superior a 20°C e afirma que a estratégia deve ser adotada mesmo quando a carta climática indicar conforto.

3.3.3. Variáveis Humanas

Além das variáveis relacionadas ao clima e à envoltória da edificação, a atividade física (MET) e a vestimenta (Clo) surgem também como parâmetros importantes para a sensação de conforto térmico do homem.

3.3.3.1. Atividade

Quanto maior a atividade física, tanto maior será o calor gerado pelo metabolismo, logo, é importante ao arquiteto saber a função da edificação projetada, de forma a prever o nível de atividade realizado em seu interior. (LAMBERTS et al, 2014, p. 47)

Na tabela 1, baseada nos valores indicados pela ISO 7730 (2005), são apresentados os valores de metabolismo para algumas atividades em Wm^2 e em met. Os valores variam de acordo com o nível de atividade realizado pelo indivíduo, apresentando valores mais baixos para atividades que exigem pouca movimentação e valores mais elevados para aquelas cuja exigência física se mostra mais extrema.

Segundo Roriz (2003, apud Silveira 2014), os estudos de conforto térmico podem ser separados em duas correntes, sendo a primeira delas a “analítica” e a segunda a “adaptativa”. A primeira, influenciada pelos estudos de Fanger (1970), sugere que os limites de conforto podem ser universais. Já a segunda abordagem considera que, em caso de ocorrência de uma mudança ambiental que resulte em desconforto, os usuários do ambiente agem no sentido de reestabelecer as condições de conforto.

Silveira (2014) destaca que a abordagem analítica tem como base os resultados obtidos por Fanger através da aplicação de questionários a pessoas submetidas a diferentes combinações de variáveis ambientais em câmaras climáticas controladas. A partir dessa abordagem, desenvolveu-se o índice PMV (Predicted Mean Vote), no qual era verificada a influência da temperatura e da umidade do ar na sensação de conforto térmico dos ocupantes. O autor salienta ainda que a vantagem do método proposto reside no fato de que a complexa influência das seis variáveis que compõem o conforto reduz-se a um único índice. Além do índice PMV, Fanger (1970) relacionou também o voto médio estimado à Porcentagem Estimada de Pessoas Insatisfeitas – PPD (*Predicted Percentage of Dissatisfied*).

Por outro lado, a abordagem adaptativa tem como base estudos realizados através de dados coletados em pesquisas de campo, obtendo-se assim informações relativas ao ambiente térmico e, simultaneamente, a resposta térmica dos envolvidos em situações reais, com interferência mínima dos pesquisadores (Nicol; Humphreys, 2002).

Para estudos relacionados a edificações de baixo consumo energético, como no caso avaliado neste trabalho, Sicurella et al (2013) destacam que a abordagem adaptativa se apresenta como uma alternativa mais apropriada do que a analítica, tendo em vista que nenhum tipo de sistema de condicionamento térmico é requerido.

Enquanto a abordagem de Fanger postula intrinsecamente a necessidade de um sistema para promover e manter as condições térmicas ótimas no interior de uma edificação, a abordagem adaptativa apenas define uma faixa de temperatura na qual um ocupante pode encontrar seu próprio conforto sem a necessidade de um sistema de ar-condicionado, desde que ele seja livre para adaptar seu comportamento e operar as aberturas para que estas possam fornecer ventilação natural. (Sicurella, Evola e Wurtz, 2012, pg. 1, tradução nossa).

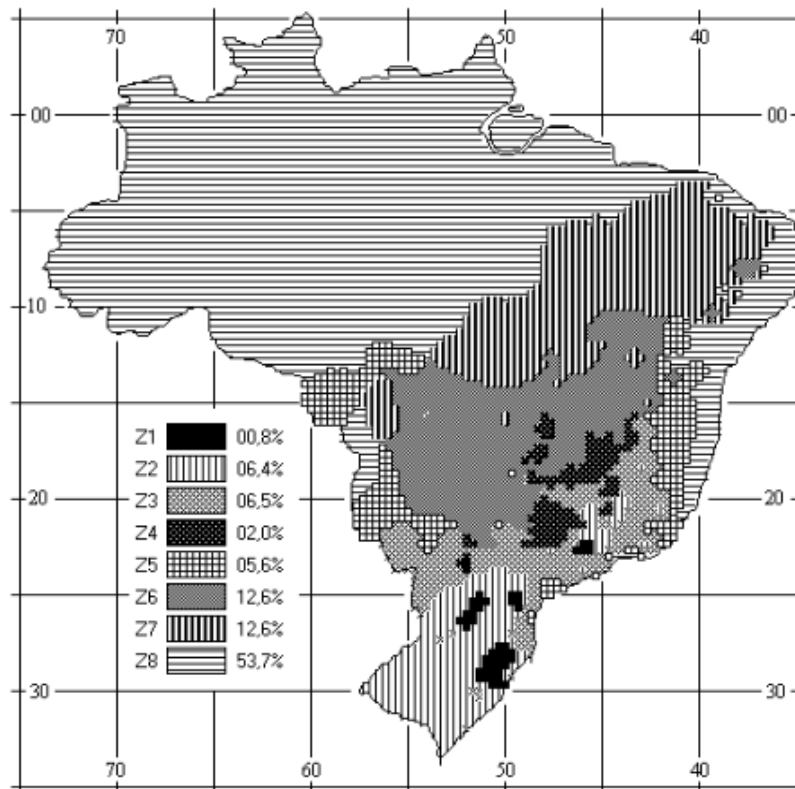
3.4. NORMAS DE DESEMPENHO E CONFORTO TÉRMICO

3.4.1. NBR 15.220

Publicada em 2005, a NBR 15220 (ABNT, 2005) apresenta recomendações quanto ao desempenho térmico de habitações unifamiliares de interesse social aplicáveis na fase de projeto. A norma estabelece também o Zoneamento Bioclimático Brasileiro e sugere uma série de diretrizes construtivas e estratégias de condicionamento térmico passivo a serem aplicadas para cada uma das zonas definidas.

O Zoneamento Bioclimático apresentado pela normativa propõe a divisão do território brasileiro em oito zonas relativamente homogêneas quanto ao clima. Como descrito no anexo B da NBR 15220 (ABNT, 2005), essa divisão teve como base a caracterização de 6500 células segundo sua posição geográfica e médias mensais de temperaturas máximas e mínimas, bem como as médias mensais das umidades relativas do ar. A figura 2 apresenta a divisão de zonas bioclimáticas indicada na NBR 15.220 (ABNT, 2005).

Figura 2 - Zoneamento Bioclimático Brasileiro

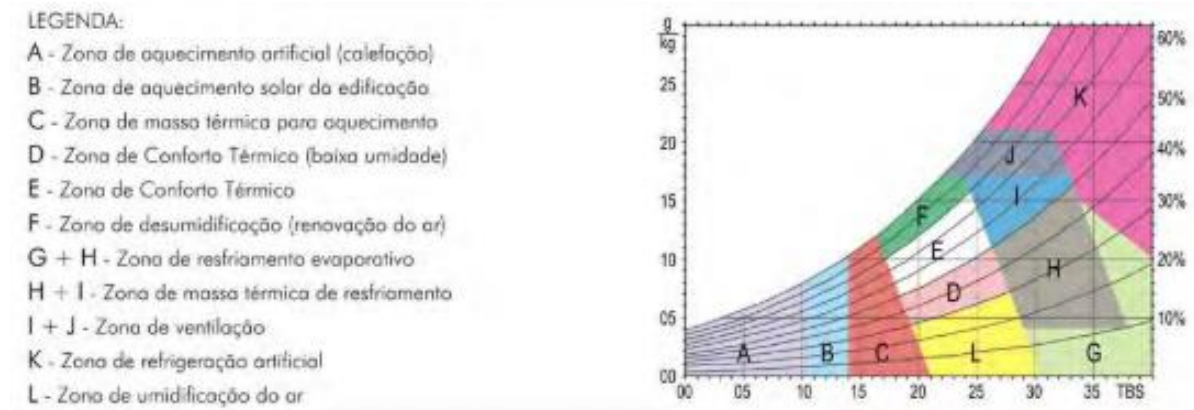


Fonte: NBR 15.220 (ABNT, 2005)

Para cada uma das zonas definidas pela norma, um conjunto de recomendações técnico-construtivas é apresentado visando a otimização do desempenho térmico das edificações através

de sua melhor adaptação climática (ABNT, 2005). As recomendações são apresentadas pela normativa com base na carta bioclimática adaptada a partir da sugerida por Givoni (1992). A figura 3 apresenta a carta de Givoni com o detalhamento de cada zona.

Figura 3 - Zonas da Carta de Givoni



Fonte: Kinsel (2009)

A partir da disposição das normais climatológicas referentes a determinado local sobre a carta bioclimática e da avaliação do gráfico gerado, é possível verificar os fatores que exercem maior influência sobre o conforto térmico em cada lugar. Para cada uma das zonas indicadas na carta, a norma apresenta também um conjunto de estratégias de condicionamento térmico, apresentadas no Quadro 1, para melhoria do desempenho térmico da edificação.

Quadro 1 - Estratégias de condicionamento térmico passivo - NBR 15.220 (2005)

Estratégia	Detalhamento
A	O uso de aquecimento artificial será necessário para amenizar a eventual sensação de desconforto térmico por frio.
B	A forma, a orientação e a implantação da edificação, além da correta orientação de superfícies envidraçadas, podem contribuir para otimizar o seu aquecimento no período frio através da incidência de radiação solar. A cor externa dos componentes também desempenha papel importante no aquecimento dos ambientes através do aproveitamento da radiação solar.
C	A adoção de paredes internas pesadas pode contribuir para manter o interior da edificação aquecido.
D	Caracteriza a zona de conforto térmico (a baixas umidades).
E	Caracteriza a zona de conforto térmico.
F	As sensações térmicas são melhoradas através da desumidificação dos ambientes. Esta estratégia pode ser obtida através da renovação do ar interno por ar externo através da ventilação dos ambientes.
G e H	Em regiões quentes e secas, a sensação térmica no período de verão pode ser amenizada através da evaporação da água. O resfriamento evaporativo pode ser obtido através do uso de vegetação, fontes de água ou outros recursos que permitam a evaporação da água diretamente no ambiente que se deseja resfriar.
H e I	Temperaturas internas mais agradáveis também podem ser obtidas através do uso de paredes (externas e internas) e coberturas com maior massa térmica, de forma que o calor armazenado em seu interior durante o dia seja devolvido ao exterior durante a noite, quando as temperaturas externas diminuem.
I e J	A ventilação cruzada é obtida através da circulação de ar pelos ambientes da edificação. Isto significa que se o ambiente tem janelas em apenas uma fachada, a porta deveria ser mantida aberta para permitir a ventilação cruzada. Também deve-se atentar para os ventos predominantes da região e para o entorno, pois o entorno pode alterar significativamente a direção dos ventos.
K	O uso de resfriamento artificial será necessário para amenizar a eventual sensação de desconforto térmico por calor.
L	Nas situações em que a umidade relativa do ar for muito baixa e a temperatura do ar estiver entre 21°C e 30°C, a umidificação do ar proporcionará sensações térmicas mais agradáveis. Essa estratégia pode ser obtida através da utilização de recipientes com água e do controle da ventilação, pois esta é indesejável por eliminar o vapor proveniente de plantas e atividades domésticas.

Fonte: NBR 15.220 (ABNT, 2005)

Um resumo das principais estratégias recomendadas pela normativa, no que diz respeito ao tamanho das aberturas, sombreamento, estratégias de condicionamento passivo, tipo ideal e propriedades de paredes e coberturas para cada uma das 8 zonas definidas, é apresentado no Quadro 2, elaborado por Lamberts, et al. (2014, p. 99):

Quadro 2- Estratégias de Condicionamento Térmico para cada zona Bioclimática

zona	estratégias		aberturas para ventilação A (em % da área de piso)	sombreamento das aberturas	parede			cobertura		
	verão	inverno			U	ϕ	FS ₀	U	ϕ	FS ₀
1		aquecimento solar da edificação / vedações internas pesadas (inércia térmica)	médias 15% < A < 25%	permitir sol apenas durante o inverno	≤ 3,0 (parede leve)	≤ 4,3	≤ 5,0	≤ 2,0 (leve isolada)	≤ 3,3	≤ 6,5
2	ventilação cruzada	aquecimento solar da edificação / vedações internas pesadas (inércia térmica)	médias 15% < A < 25%	permitir sol apenas durante o inverno	≤ 3,0 (parede leve)	≤ 4,3	≤ 5,0	≤ 2,0 (leve isolada)	≤ 3,3	≤ 6,5
3	ventilação cruzada	aquecimento solar da edificação / vedações internas pesadas (inércia térmica)	médias 15% < A < 25%	permitir sol apenas durante o inverno	≤ 3,6 (parede leve refletor a)	≤ 4,3	≤ 4,0	≤ 2,0 (leve isolada)	≤ 3,3	≤ 6,5
4	Resfriamento evaporativo e inércia térmica para resfriamento / ventilação seletiva nos períodos quentes, em que a temperatura interna seja superior à externa	aquecimento solar da edificação / vedações internas pesadas (inércia térmica)	médias 15% < A < 25%	sombrear aberturas	≤ 2,2 (parede pesada)	≥ 6,5	≤ 3,5	≤ 2,0 (leve isolada)	≤ 3,3	≤ 6,5
5	ventilação cruzada	vedações internas pesadas (inércia térmica)	médias 15% < A < 25%	sombrear aberturas	≤ 3,6 (parede leve refletor a)	≤ 4,3	≤ 4,0	≤ 2,0 (leve isolada)	≤ 3,3	≤ 6,5
6	Resfriamento evaporativo e inércia térmica para resfriamento / ventilação seletiva nos períodos quentes, em que a temperatura interna seja superior à externa	vedações internas pesadas (inércia térmica)	médias 15% < A < 25%	sombrear aberturas	≤ 2,2 (parede pesada)	≥ 6,5	≤ 3,5	≤ 2,0 (leve isolada)	≤ 3,3	≤ 6,5
7	Resfriamento evaporativo e inércia térmica para resfriamento / ventilação seletiva nos períodos quentes, em que a temperatura interna seja superior à externa		pequenas 10% < A < 15%	sombrear aberturas	≤ 2,2 (parede pesada)	≥ 6,5	≤ 3,5	≤ 2,0 (pesada)	≤ 6,5	≤ 6,5
8	ventilação cruzada permanente OBS: o condicionamento passivo será insuficiente durante as horas mais quentes		grandes A > 40%	sombrear aberturas	≤ 3,6 (parede leve refletor a)	≤ 4,3	≤ 4,0	≤ 2,3.FT (leve refletor a)	≤ 3,3	≤ 6,5

Fonte: Eficiência Energética na Arquitetura (LAMBERTS et al., 2014, pg. 99)

A NBR 15.220 (ABNT, 2005) não apresenta, no entanto, procedimentos para avaliação do desempenho térmico de edificações, citando apenas que estes podem ser elaborados através de cálculos, de medições in loco ou de simulações computacionais.

3.4.2. NBR 15.575

A norma NBR 15.575 (ABNT, 2013), publicada pela primeira vez em 2008 e revisada em 2013, foi desenvolvida com o intuito de balizar o desenvolvimento tecnológico e orientar a avaliação da eficiência técnica e econômica das edificações construídas no Brasil. Denominada como uma norma de desempenho, tem seu foco nas exigências do usuário para o edifício

habitacional e seus sistemas, quanto ao seu comportamento em uso e não na prescrição de como os sistemas são construídos.

Trata-se de uma norma bastante abrangente, estabelecendo critérios e requisitos de desempenho, bem como métodos de avaliação e evidenciando a importância do atendimento das exigências do usuário desde as primeiras fases de concepção do produto (Okamoto, 2015).

No que diz respeito ao desempenho térmico, a NBR 15.575 (ABNT, 2013a) determina que a edificação habitacional deve reunir características que atendam às exigências de desempenho considerando a zona bioclimática definida na NBR 15.220-3 (ABNT, 2005) para o local no qual a edificação se encontra. Além disso, estabelece um procedimento normativo e outro informativo para a avaliação da adequação das habitações aos requisitos da normativa.

3.4.2.1. Procedimento 1A (normativo)

No procedimento 1A é verificado o atendimento às exigências definidas pela norma para o envelopamento da edificação. Essa verificação se dá por meio da definição de critérios de avaliação da adequação dos materiais aos requisitos mínimos estabelecidos pela normativa.

No caso das paredes externas, a NBR 15575 (ABNT, 2013b) determina como critério de adequação o atendimento a valores máximos admissíveis para a transmitância térmica (U) e capacidade térmica (CT) dos sistemas de vedação vertical. Os valores indicados pela norma são apresentados nas tabelas 2 e 3:

Tabela 2 - Valores máximos admissíveis para a transmitância térmica das paredes externas

Transmitância Térmica U		
$W/m^2.K$		
Zonas 1 e 2	Zonas 3, 4, 5, 6, 7 e 8	
$U \leq 2,5$	$\alpha^a \leq 0,6$	$\alpha^a > 0,6$
	$U \leq 3,7$	$U \leq 2,5$

^a α é absorvância à radiação solar da superfície externa da parede.

Fonte: NBR 15.575 (ABNT, 2013b)

Tabela 3 – Valores máximos admissíveis para a capacidade térmica de paredes externas

Capacidade térmica (CT)	
$kJ / m^2.K$	
Zona 8	Zonas 1,2, 3, 4, 5, 6 e 7
Sem exigência	≥ 130

Fonte: NBR 15.575 (ABNT, 2013b)

Para a cobertura da edificação, a NBR 15.575 (2013c) afirma que o sistema deve apresentar transmitância térmica e absorvância à radiação solar que proporcionem um desempenho térmico apropriado para cada zona bioclimática. Na sequência, indica como critério de adequação, assim como no caso das paredes externas, o atendimento a valores máximos admissíveis para a transmitância térmica (U) dos sistemas de cobertura. Os valores disponibilizados pela norma são apresentados abaixo na tabela 4.

Tabela 4 - Valores máximos admissíveis para a transmitância térmica da cobertura

Transmitância térmica (U)				
W/m ² K				
Zonas 1 e 2	Zonas 3 a 6		Zonas 7 e 8	
$U \leq 2,30$	$\alpha \leq 0,6$	$\alpha > 0,6$	$\alpha \leq 0,4$	$\alpha > 0,4$
		$U \leq 2,3$	$U \leq 1,5$	$U \leq 2,3$ FV

α é absorvância à radiação solar da superfície externa da cobertura.
 NOTA O fator de ventilação (FV) é estabelecido na ABNT NBR 15220-2.

Fonte: NBR 15.575 (ABNT, 2013c)

3.4.2.2. Procedimento 1B (normativo)

O procedimento 1B é indicado como uma alternativa para casos nos quais os valores obtidos para a transmitância térmica ou capacidade térmica se mostrarem insatisfatórios frente aos critérios e métodos estabelecidos nas partes 4 e 5 da norma. Nestes casos, é sugerido que o desempenho térmico global da edificação seja avaliado por simulação computacional. Para a realização das simulações computacionais, a norma NBR 15.575 (ABNT, 2013a) recomenda o emprego do programa *EnergyPlus*.

O critério de avaliação adotado pela normativa tem como base valores máximos e mínimos de temperatura a serem atendidos, para condições de verão e de inverno, no interior de ambientes de permanência prolongada, como salas de estar e dormitórios.

Os critérios de avaliação de desempenho térmico fornecidos pela normativa para cada zona bioclimática nos períodos de verão e de inverno são apresentados nas tabelas 5 e 6.

Tabela 5 - Critério de avaliação de desempenho térmico para as condições de verão

Nível de desempenho	Critério	
	Zonas 1 a 7	Zona 8
M	$T_{i,max} \leq T_{e,max}$	$T_{i,max} \leq T_{e,max}$

$T_{i,max}$ é o valor máximo diário da temperatura do ar no interior da edificação, em graus Celsius;

$T_{e,max}$ é o valor máximo diário da temperatura do ar exterior à edificação, em graus Celsius;

$T_{i,min}$ é o valor mínimo diário da temperatura do ar no interior da edificação, em graus Celsius;

$T_{e,min}$ é o valor mínimo diário da temperatura do ar exterior à edificação, em graus Celsius.

NOTA: Zonas bioclimáticas de acordo com a ABNT NBR 15220-3.

Fonte: NBR 15.575 (ABNT, 2013a)

Tabela 6 - Critério de desempenho térmico para as condições de inverno

Nível de desempenho	Critério	
	Zonas bioclimáticas 1 a 5)	Zonas bioclimáticas 6, 7 e 8
M	$T_{i,min} \geq (T_{e,min} + 3\text{o C})$	Nestas zonas, este critério não deve ser verificado.

$T_{i,min}$ é o valor mínimo diário da temperatura do ar no interior da edificação, em graus Celsius;

$T_{e,min}$ é o valor mínimo diário da temperatura do ar exterior à edificação, em graus Celsius.

NOTA: Zonas bioclimáticas de acordo com a ABNT NBR 15220-3.

Fonte: NBR 15.575 (ABNT, 2013a)

3.4.2.3. Procedimento 2 (informativo)

O procedimento 2 é apresentado pela norma apenas com caráter informativo, não se sobrepondo aos procedimentos A e B descritos acima. O procedimento prevê a verificação do atendimento dos requisitos e critérios estabelecidos pela normativa por meio da realização de medições em edificações existentes ou protótipos construídos com esta finalidade. O próprio Guia Orientativo para Atendimento da norma NBR 15575 (ABNT, 2013) destaca, entretanto, que o procedimento 2 esbarra em séria dificuldade, tendo em vista que as medições devem ser realizadas em período que corresponda ao dia típico de verão ou de inverno, precedido por, pelo menos, um dia com características semelhantes.

Tendo em vista que este trabalho tem como objetivo avaliar o conforto térmico proporcionado aos usuários de uma edificação que atende apenas aos requisitos mínimos impostos pela norma, o método a ser utilizado para avaliação do desempenho térmico da habitação será a análise computacional com auxílio do programa *EnergyPlus*. Esse procedimento, recomendado pela NBR 15.575 (ABNT, 2013a) para casos nos quais os valores

obtidos pelo método simplificado se mostram insuficientes, permite uma análise mais profunda e precisa do desempenho térmico global da edificação.

3.4.3. ASHRAE 55

A normativa ASHRAE 55 tem como propósito especificar as combinações de fatores pessoais e ambientais relacionados a espaços internos, de maneira que estes venham a promover condições térmicas aceitáveis a maioria dos ocupantes do ambiente (ASHRAE, 2017).

Os fatores ambientais contemplados na norma para o processo de verificação do conforto térmico dos ocupantes de uma edificação são a temperatura, a radiação térmica, a umidade e a velocidade do ar. Os fatores pessoais avaliados são, por sua vez, a atividade realizada pelos ocupantes do espaço interno e a vestimenta utilizada por eles.

A seção 5.4 do documento traz orientações referentes à determinação das condições térmicas aceitáveis para espaços ocupados e naturalmente condicionados e impõe 4 itens de restrição para a aplicabilidade da metodologia sugerida:

- a) Não há nenhum sistema mecânico de refrigeração instalado. Não há nenhum sistema de aquecimento em operação.
- b) Os ocupantes representativos possuem uma taxa metabólica na faixa de 1.0 a 1.3 met,
- c) Os ocupantes representativos são livres para adaptar suas vestimentas de acordo com as condições térmicas do ambiente interno ou externo, dentro de uma faixa de variação entre 0.5 e 1.0 clo.
- d) A temperatura externa predominante é maior do que 10°C e menor do que 33.5°C.

A metodologia proposta pela ASHRAE para a verificação do conforto térmico experimentado pelo usuário de uma edificação é baseada no modelo adaptativo. Essa abordagem considera o homem como um agente ativo, que interage com o ambiente de acordo com suas sensações e preferências térmicas (LAMBERTS, 2016). O método utiliza-se da temperatura operativa como principal indicador de conforto, relacionando a faixa de temperatura de conforto à ocorrência de temperaturas externas predominantes (SILVEIRA, 2014).

Para a definição da temperatura operativa permitida para o ambiente em estudo, a normativa apresenta duas opções. Como primeira alternativa, é fornecido um conjunto de

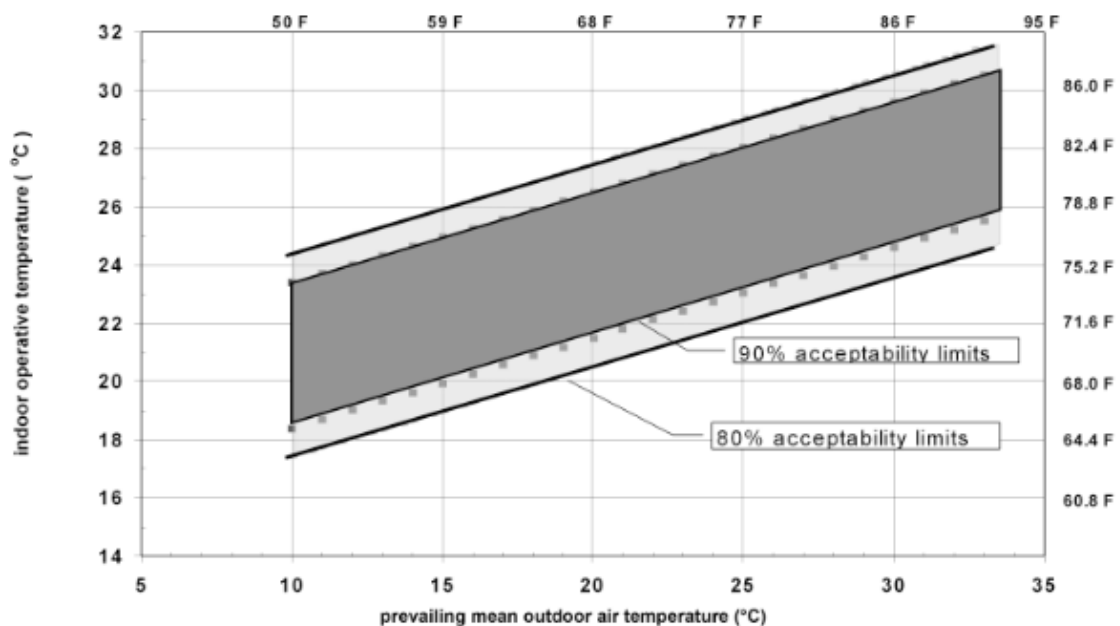
equações com os quais é possível calcular as temperaturas de referência considerando os limites de aceitabilidade para 80% dos ocupantes.

$$\text{Limite Superior para 80\% de aceitabilidade (}^{\circ}\text{C)} = 0,31 * tpma(out) + 21.3 \quad \text{Eq. 1}$$

$$\text{Limite Inferior para 80\% de aceitabilidade (}^{\circ}\text{C)} = 0,31 * tpma(out) + 14.3 \quad \text{Eq. 2}$$

A segunda alternativa indicada pela norma para a verificação da temperatura operativa é a utilização de um gráfico (Figura 4) que correlaciona a temperatura média do ar exterior aos limites de aceitabilidade para 80% e 90% dos ocupantes.

Figura 4 - Limites de Aceitabilidade para Metodologia de Conforto Adaptativo - ASHRAE 55 (2017)



Fonte: ASHRAE Standard 55 (2017)

A sigla $tpma(out)$ presente nas equações acima corresponde a “temperatura média prevalecente do ar exterior”, dado necessário também para a obtenção da temperatura operativa por meio do uso do recurso gráfico fornecido pela norma. Ela deve ser determinada com base em “não menos do que 7 e não mais do que 30 subsequentes anteriores ao dia em questão” e pode ser “uma média aritmética simples das temperaturas médias de bulbo seco medidas para todos os dias subsequentes verificados”. (ASHRAE, 2017)

A norma salienta que as medidas de temperatura do ar exterior devem ser obtidas a partir da estação meteorológica mais próxima, pública ou privada, ou por meio de um arquivo climático do tipo TMY (*Typical Meteorological Year*).

3.5. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Como uma tarefa complexa que envolve a consideração de uma série de variáveis interdependentes e conceitos multidisciplinares, a avaliação do desempenho térmico de edificações tem na simulação computacional um advento fundamental para o desenvolvimento de modelos físicos que representam o comportamento energético das edificações em diferentes cenários (MENDES et al, 2008).

A simulação de desempenho por meio de softwares especializados funciona, portanto, como uma ferramenta tecnológica para viabilizar estudos que apresentam resultados numéricos, avaliar o clima interno de edificações e dar suporte às tomadas de decisões dos profissionais que buscam a economia de energia nos edifícios (KINSEL, 2009).

No Brasil, a norma NBR 15575 sugere a utilização da simulação computacional para a avaliação do desempenho térmico global da edificação em casos nos quais os valores obtidos a partir do procedimento simplificado de avaliação da envoltória da construção se mostrarem insatisfatórios. O software recomendado pela normativa para realização das simulações computacionais é o *EnergyPlus*.

3.5.1. EnergyPlus

O *EnergyPlus* é um programa de simulação computacional gratuito utilizado para a avaliação de edificações, sob um ponto de vista global, no que diz respeito ao consumo energético – aquecimento, resfriamento, ventilação, iluminação e cargas térmicas - e uso de água. O programa, desenvolvido pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos, tem suas raízes nos programas *BLAST* e *DOE-2*, criados no final da década de setenta e início da década de oitenta como ferramentas de simulação de carga térmica e energia.

O Manual de Conceitos Básicos do *EnergyPlus* (2018) destaca, no entanto, que o software não possui uma interface com o usuário. Na verdade, seu propósito é funcionar apenas como o “motor da simulação”, atuando sempre em conjunto com um programa de terceira parte que, por sua vez, possa fornecer uma interface gráfica ao operador da simulação. O Manual salienta ainda que, enquanto outros programas auxiliam os usuários refinando dados e corrigindo possíveis erros em informações inseridas, o *EnergyPlus* opera sob um padrão de “*garbage in, garbage out*”, ou ainda, “entra lixo, sai lixo”, reforçando a importância da qualidade dos dados inseridos no produto final fornecido pelo software. Esse conceito reforça

ainda mais a importância dos arquitetos e engenheiros como parte vital do processo de simulação computacional.

3.5.2. OpenStudio SketchUp Plug-in

Como a introdução de dados e obtenção dos resultados no *EnergyPlus* é feita em formato de texto, na extensão IDF (Input Data File), outros programas auxiliares são utilizados como interface gráfica para o usuário ao longo do processo de modelagem de uma edificação.

O *OpenStudio* é uma coleção de ferramentas de software de plataforma cruzada (Windows, Mac e Linux) desenvolvido para suportar a modelagem de energia global de um edifício usando o programa *EnergyPlus*. O plug-in *OpenStudio SketchUp* é uma extensão da popular ferramenta de modelagem *SketchUp* 3D da *Trimble* que permite aos usuários criar rapidamente a geometria necessária para o *EnergyPlus*, funcionando como uma interface gráfica completa para os modelos *OpenStudio*, incluindo informações referentes ao envelope, cargas, ocupação e sistemas de HVAC.

4. METODOLOGIA

Como citado anteriormente, o presente trabalho tem como objetivo principal a avaliação do conforto térmico fornecido aos usuários de uma residência representativa das habitações de interesse social no país, cujo desempenho térmico atenda aos requisitos mínimos estabelecidos pela NBR 15575 (ABNT, 2013), normativa brasileira que regula o desempenho geral das edificações construídas no Brasil.

Para tanto, o trabalho foi dividido em três partes, sendo a primeira delas a caracterização da edificação padrão escolhida para avaliação, a segunda a verificação de conformidade dessa residência com os requisitos mínimos da NBR 15.575 (ABNT, 2013) e a terceira parte a avaliação do conforto térmico fornecido por essa edificação segundo os parâmetros apresentados pela ASHRAE 55 (2017).

Para a escolha da edificação a ser adotada como padrão de análise neste trabalho, uma pesquisa bibliográfica foi realizada buscando identificar as tipologias e materiais construtivos mais representativos das habitações de interesse social construídas no país. Após a realização da pesquisa citada, optou-se por adotar como base neste estudo a tipologia do tipo “casa unifamiliar” identificada por Montes (2016) em sua tese de doutorado como a tipologia mais representativa para a Faixa 1 do PMCMV, que contempla famílias com renda inferior a R\$ 1.800,00. As características da edificação adotada são descritas no item 4.1.

4.1. EDIFICAÇÃO ESCOLHIDA

Como parte de sua dissertação de doutorado, Montes (2016) desenvolveu uma pesquisa de caracterização das Habitações de Interesse Social no Brasil com base no Censo 2010. A autora realizou o levantamento e caracterização das tipologias mais representativas do Programa Minha Casa Minha Vida de acordo com diferentes faixas de renda salarial.

A autora concluiu que, para domicílios particulares permanentes urbanos e considerando todas as faixas de renda, a edificação do tipo “casa” representa 85% do total de habitações no país, enquanto o apartamento representa 12,5% (BRASIL; IBGE, 2010, apud MONTES, 2016). Se analisados os domicílios em relação à renda familiar mensal e faixas do PMCMV, a casa unifamiliar tem a maior porcentagem na Faixa 1.

Na amostra avaliada, Montes (2016) verificou que a área útil para a tipologia mais representativa do estudo, a “casa unifamiliar térrea”, variou entre 36 e 38m², enquanto a composição dos cômodos manteve-se regular, com todas as casas apresentando sala de jantar,

cozinha, dois quartos e 1 banheiro. Além das características arquitetônicas relacionadas a essa tipologia, a autora verificou também os materiais mais frequentes na composição das paredes, forro e cobertura das edificações, bem como as dimensões das janelas em cada um dos cômodos. Um quadro resumo das características gerais da tipologia mais representativa da Faixa 1, realizado pela autora do estudo, é apresentado no Quadro 3:

Quadro 3- Características do projeto representativo para casa unifamiliar térrea

CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS DO PROJETO REPRESENTATIVO PARA CASA UNIFAMILIAR TÉRREA	
Características da Envoltória:	
Paredes:	Reboco (2 cm) + Bloco de tijolo cerâmico 9x14x19 cm + Reboco (2 cm) -> $U = 2,57 \text{ W/m}^2.\text{K}$
Cobertura:	Telha cerâmica + Ático + Forro de PVC (inclinação de 23,6º) -> $U = 2,45 \text{ W/m}^2.\text{K}$
Piso:	Piso cerâmico (1 cm) + argamassa (2 cm) + contrapiso (5 cm) + brita (3cm)
Características das Janelas*:	
Sala de Estar:	2 folhas de correr, peitoril = 1,10 m, $A = 1,50 \text{ m}^2$
Quartos:	2 folhas de correr, peitoril = 1,10 m, $A = 1,50 \text{ m}^2$
Cozinha:	2 folhas de correr, peitoril = 1,10 m, $A = 1,20 \text{ m}^2$
Banheiro:	Janela basculante; peitoril = 1,50 m, $A = 0,48 \text{ m}^2$
*Todas com vidro transparente de 4 mm e $U = 5,78 \text{ W/m}^2.\text{K}$	
Características Gerais:	
Beiral:	50 cm
Pé direito:	2,50 m
Portas internas:	Portas de madeira de 0,80 x 2,10 m
Portas externas:	Portas metálicas de 0,80 x 2,10 m
Planta Baixa e Esquemáticação:	

Fonte: Adaptado de Montes (2016, pg. 161)

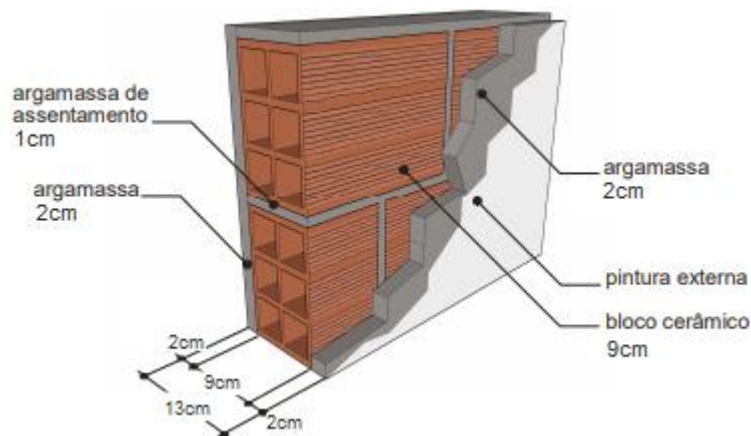
4.2. AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO

A avaliação do desempenho térmico da casa unifamiliar térrea, adotada como edificação padrão neste trabalho, seguiu as recomendações apresentadas pela NBR 15.575 (ABNT, 2013). Dessa forma, realizou-se, inicialmente, a avaliação da edificação a partir do método simplificado e então a avaliação por meio de simulação computacional.

4.2.1. Método simplificado (NBR 15.575)

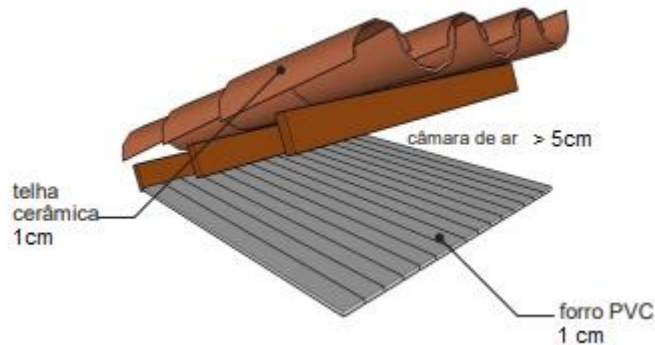
Para a obtenção dos valores de transmitância térmica (U) e capacidade térmica (CT) dos elementos constituintes da edificação avaliada, foram definidas as configurações das paredes e do telhado da residência a partir das espessuras e materiais indicados por Montes (2016) em sua pesquisa. Tendo em vista que a NBR 15.220 (ABNT, 2005) indica, para casos nos quais a densidade aparente do material varia significativamente, diferentes propriedades térmicas para um mesmo material, optou-se por adotar como base deste estudo os valores indicados por Morishita et al. (2010) no trabalho intitulado “Catálogo de propriedades térmicas de paredes e coberturas”. A metodologia de cálculo empregada foi obtida a partir da NBR 15.220 (ABNT, 2005). Os detalhes esquemáticos dos elementos de fachada e cobertura adotados bem como as propriedades térmicas adotadas para cada material são apresentados nas figuras 5 e 6 e no quadro 4.

Figura 5 - Detalhe Esquemático da Parede Externa adotada



Fonte: Adaptado de Morishita et al. (2010)

Figura 6 - Detalhe esquemático da cobertura adotada



Fonte: Adaptado de Morishita et al. (2010)

Quadro 4 - Propriedades térmicas adotadas para o cálculo da transmitância (U) e capacidade térmica (CT) dos componentes construtivos utilizados

Materiais - Propriedades Adotadas				
Material				
	Material	Condutividade (W/mK)	Densidade (kg/m ³)	Calor esp. (J/kgK)
Cobertura	Telha cerâmica	1.05	2000	920
	Forro PVC	0.2	1300	960
Parede	Reboco	1.15	2000	1000
	Tijolo cerâmico	0.9	1600	920

Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

4.2.2. Simulação computacional (NBR 15.575)

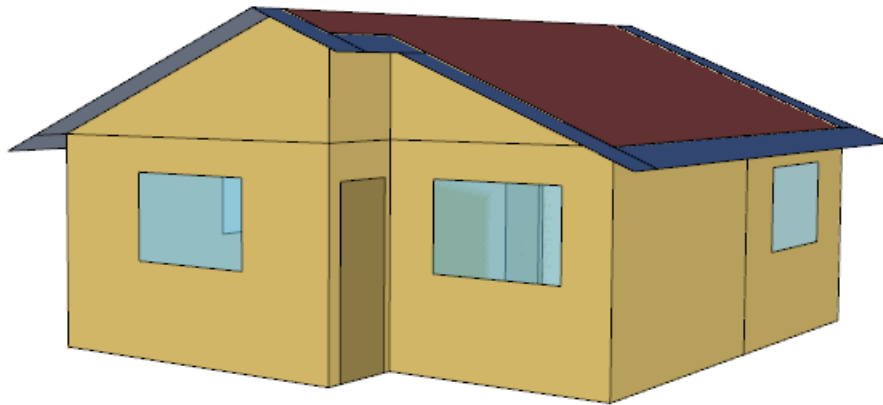
A avaliação por meio do método de simulação computacional indicado na NBR 15.575 (ABNT, 2013) teve início a partir da construção de um modelo tridimensional da edificação a ser estudada com uso do software de modelagem *SketchUp Make* versão 2017. Para possibilitar a criação de zonas térmicas no modelo, fator imprescindível para a análise termo energética da edificação, bem como a conversão dos dados inseridos no desenho para o formato “idf”, único legível pelo programa *EnergyPlus*, foi utilizada uma extensão do programa *SketchUp*, o plugin *Openstudio* versão 2.7.0. A partir dos dados de modelagem obtidos, utilizou-se o programa *EnergyPlus* versão 9.1 para inserir as informações referentes aos materiais, clima, orientação e ocupação da residência estudada e, por fim, realizar a simulação do comportamento da edificação para os dias típicos de inverno e verão na cidade de Porto Alegre.

4.2.2.1. Modelagem

O desenho da edificação a ser estudada teve como base a planta baixa indicada por Montes (2016) em seus estudos como a configuração mais representativa dentre as habitações

de interesse social para a faixa 1 do programa “Minha Casa Minha Vida”. A partir da planta baixa referida, um modelo tridimensional foi construído no qual cada ambiente foi definido como uma zona térmica. Dessa forma, cada ambiente fechado representado no modelo apresenta um comportamento térmico único. As figuras 7 e 8 ilustram a aparência e distribuição de zonas térmicas no modelo construído.

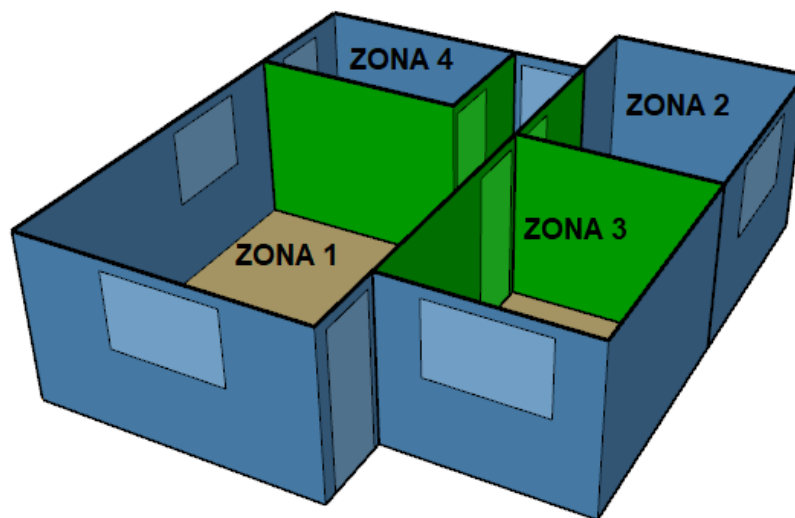
Figura 7 - Modelo Tridimensional da Edificação



Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

Após a definição das diferentes zonas térmicas para cada ambiente, foram representadas também as aberturas, translúcidas e opacas, presentes na edificação, respeitando, novamente, as dimensões apresentadas por Montes (2016) em seus estudos.

Figura 8 - Distribuição das zonas térmicas no modelo



Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

4.2.2.2. Parâmetros de entrada no programa de simulação

O primeiro parâmetro a ser inserido no programa de simulação termo energética diz respeito aos dados climáticos da região para o período em estudo. Os dados utilizados neste trabalho foram inseridos por meio de um arquivo TRY (*Test Reference Year*) disponibilizado pelo LABEEE (Laboratório de Eficiência Energética das Edificações). Este tipo de arquivo compila as informações climáticas de uma região por um período de cerca de 10 anos, apresentando dados referentes à localização, precipitação, ventos, radiação solar e temperatura do local.

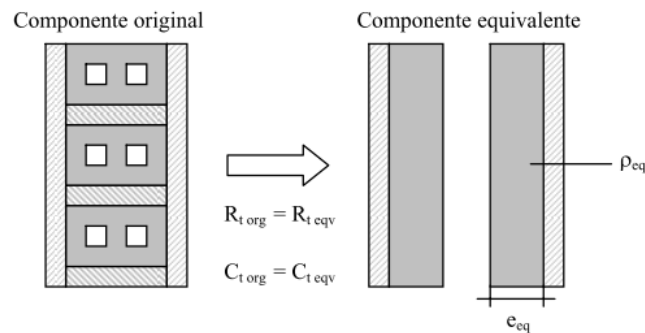
Tendo em vista que a normativa NBR 15.575 (ABNT, 2013) solicita a análise do comportamento térmico de uma edificação somente para um dia típico de verão e um dia típico de inverno, dois cenários iniciais foram configurados. Os dados referentes aos dias típicos de inverno e verão para a cidade de Porto Alegre foram obtidos no Anexo A da NBR 15.575 (ABNT, 2013).

A configuração do modelo estudado teve início a partir da definição das propriedades térmicas dos materiais a serem utilizados na construção da edificação. Tendo em vista que este trabalho se propõe a avaliar o comportamento de uma edificação ainda em sua fase de projeto, na qual ainda não há, necessariamente, definição sobre os fornecedores de material para a execução da obra, os valores referentes à condutividade térmica, densidade de massa aparente, capacidade térmica, absorvância e emissividade dos materiais adotados foram definidos a partir dos dados apresentados nas Tabelas B.2 e B.3 da NBR 15220 (ABNT, 2005). Após a definição dos materiais e suas propriedades, foi possível especificar a configuração das “construções” do modelo, detalhando as espessuras e materiais constituintes dos elementos construtivos como paredes, coberturas e aberturas presentes na edificação.

A maior parte das construções inseridas no programa de simulação manteve a mesma configuração utilizada nos cálculos de transmitância e capacidade térmica para o método simplificado da NBR 15.575 (ABNT, 2013). Para alguns elementos da envoltória, no entanto, foi necessário realizar a construção de elementos equivalentes aos originais. Isso ocorreu devido a algumas limitações do programa, sendo a principal delas, como sugerido por Ordenes et al. (2003), o fato de o programa considerar que todos os componentes inseridos são formados por camadas transversais ao fluxo de calor, não permitindo o cálculo de resistências térmicas em paralelo. Logo, para casos nos quais o elemento construtivo apresenta uma configuração mais elaborada, como no caso do tijolo furado utilizado, é necessário desenvolver um componente

equivalente à parede original. O elemento equivalente desenvolvido para substituir a parede de alvenaria em tijolo furado que compõe a edificação avaliada, seguiu a metodologia apresentada por Ordenes et al. (2003) em seus estudos, na qual é proposta uma alternativa em que se variam as espessuras e densidades de massa aparente dos materiais, mantendo-se constante a resistência térmica (R_t) e a capacidade térmica (C_t) entre as superfícies do componente. A figura 9 ilustra a adaptação sugerida pelo autor. O detalhamento dos cálculos realizados para elaboração do componente equivalente é apresentado no Apêndice B.

Figura 9 - Adaptação de elemento de parede externa para simulação computacional



Fonte: Ordenes et al. (2003)

A lista de materiais utilizados na construção do modelo tridimensional representativo da edificação estudada, bem como suas respectivas propriedades térmicas são apresentadas no quadro 5.

Quadro 5 - Lista de materiais e propriedades térmicas adotadas para simulação

Materiais - Propriedades Adotadas (EnergyPlus)						
Material						
	Material	Espessura (m)	Condutividade (W/mK)	Densidade (kg/m³)	Calor esp. (J/kgK)	Absortância (α)
Piso	Piso cerâmico	0.01	0.9	1500	920	-
	Contrapiso	0.05	1.15	2000	1000	-
	Argamassa (regularização)	0.02	1.15	2000	1000	-
	Camada de Brita	0.03	1.6	2850	840	-
Cobertura	Telha cerâmica	0.01	1.05	2000	920	0.8
	Forro PVC	0.01	0.2	1300	960	-
Parede	Reboco	0.02	1.15	2000	1000	0.5
	Tijolo cerâmico	0.007	0.9	1600	920	-
	Cerâmica Tijolo Sim. (eq)	0.02	0.6	1291	920	-
Outros	Metal porta externa	0.04	55	7800	460	-
	Madeira porta interna	0.025	0.15	600	1340	-
Material: AirGap						
	Material	Espessura (m)	Resistência Térmica (m²K/W)			
Parede	Camada de Ar Horizontal	0.03	0.16			

Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

4.3. AVALIAÇÃO DO CONFORTO TÉRMICO

A avaliação do conforto térmico propiciado aos usuários da residência padrão adotada seguiu as recomendações apresentadas pela normativa americana ASHRAE 55 (2017). Dessa forma, realizou-se, para a mesma edificação modelada anteriormente, uma avaliação por meio de simulação computacional incluindo os fatores de ocupação, cargas internas e ventilação, itens desconsiderados pela NBR 15.575 (ABNT, 2013) na análise de desempenho sugerida pela norma.

Como parte da avaliação de conforto térmico realizada pelo software, o programa *EnergyPlus* inclui a possibilidade de habilitação de notificações referentes à avaliação das condições de conforto segundo a metodologia proposta pela ASHRAE Standard 55 (2017). Tendo em vista que um dos objetivos deste trabalho diz respeito ao atendimento das condições de conforto estabelecidas pela normativa citada, esta opção foi habilitada, o que permitiu também a inclusão de algumas definições automáticas do software quanto a fatores que apresentam requisitos específicos na ASHRAE 55, como o padrão de uso de roupas e condições de abertura de janelas e portas a partir da variação das temperaturas operativas internas e temperaturas externas.

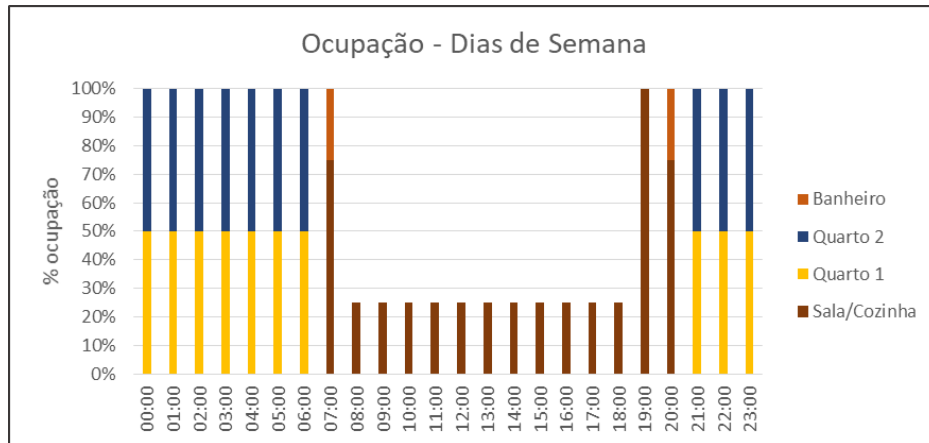
4.3.1. Parâmetros da Simulação

4.3.1.1. Uso e Ocupação

A ocupação proposta para a edificação padrão adotada considerou uma família de quatro pessoas, composta por um casal e dois filhos. Para cada um dos quartos, foi definida uma ocupação máxima de 2 pessoas, enquanto no banheiro a ocupação fica restrita a apenas uma pessoa. O espaço comum destinado à sala e cozinha da residência, por sua vez, pode comportar todos os quatro ocupantes da residência ao mesmo tempo.

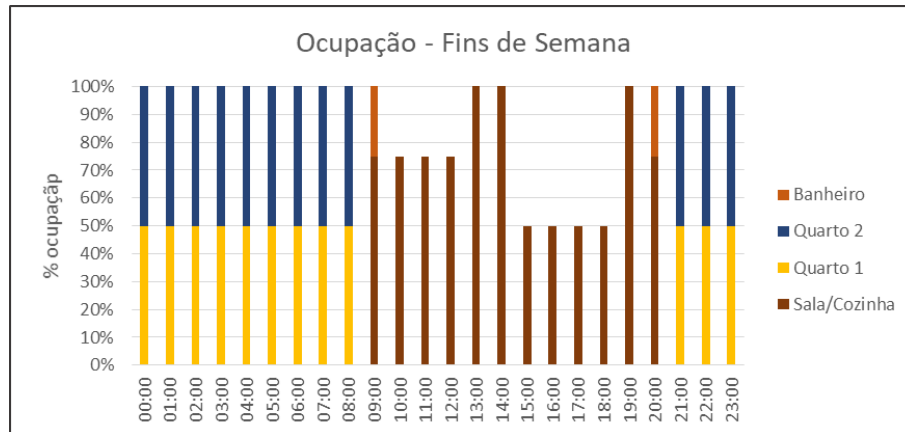
Dois cenários diferentes foram construídos, o primeiro considerando a ocupação e usos da edificação durante os dias de semana e o segundo considerando apenas o final de semana. As figuras 10 e 11 apresentam as duas configurações de ocupação citadas. Os gráficos demonstram o percentual de ocupação da edificação (eixo das ordenadas) e a distribuição dos habitantes em cada uma das zonas – representadas por diferentes cores - para intervalos de uma hora (eixo das abscissas).

Figura 10 - Rotina de ocupação da edificação - Dias de semana



Fonte: Elaborado pelo Autor (2019)

Figura 11 - Rotina de ocupação da edificação - Finais de semana



Fonte: Elaborado pelo Autor (2019)

4.3.1.2. Atividade metabólica

Como requisito para a avaliação de edificações naturalmente ventiladas, a normativa da ASHRAE 55 (2017) apresenta limites de atividade metabólica para os usuários da edificação, fixando a variação desse parâmetro entre 1.0 e 1.3 met. É importante ressaltar que a unidade de medida MET apresentada pela norma americana diz respeito ao índice de atividade metabólica de uma pessoa por metro quadrado de pele, apresentando valores equivalentes também em Watt por metro quadrado de pele (W/m^2), onde 1.0 met equivale a aproximadamente $58.2 W/m^2$. Tendo em vista que o corpo humano possui em média cerca de $1,8 m^2$ de pele (ASHRAE, 2017), os dados em MET obtidos a partir da norma devem ser multiplicados por esse valor, para que seja possível obter a potência de atividade em Watts dissipada por cada ocupante da edificação

em estudo. Como demonstrado na tabela 7 disponibilizada a seguir, a faixa de valores considerada pela normativa inclui apenas atividades de caráter sedentário.

Tabela 7 - Taxas metabólicas para diferentes atividades - ASHRAE 55 (2017)

Table 5.2.1.2 Metabolic Rates for Typical Tasks

Activity	Metabolic Rate		
	Met Units	W/m ²	Btu/h-ft ²
Resting			
Sleeping	0.7	40	13
Reclining	0.8	45	15
Seated, quiet	1.0	60	18
Standing, relaxed	1.2	70	22
Walking (on level surface)			
0.9 m/s, 3.2 km/h, 2.0 mph	2.0	115	37
1.2 m/s, 4.3 km/h, 2.7 mph	2.6	150	48
1.8 m/s, 6.8 km/h, 4.2 mph	3.8	220	70
Office Activities			
Reading, seated	1.0	55	18
Writing	1.0	60	18
Typing	1.1	65	20
Filing, seated	1.2	70	22
Filing, standing	1.4	80	26
Walking about	1.7	100	31
Lifting/packing	2.1	120	39

Fonte: ASHRAE 55 (2017, pg. 6)

Dessa forma, os valores adotados para a atividade metabólica dos ocupantes da edificação foram definidos de acordo com as atividades previstas para cada um dos ambientes da residência. Para o ambiente comum, que compreende a sala e cozinha da residência, foi prevista uma atividade de 108 W por ocupante, enquanto para os quartos os valores de atividade ficaram restritos a 81 W por ocupante.

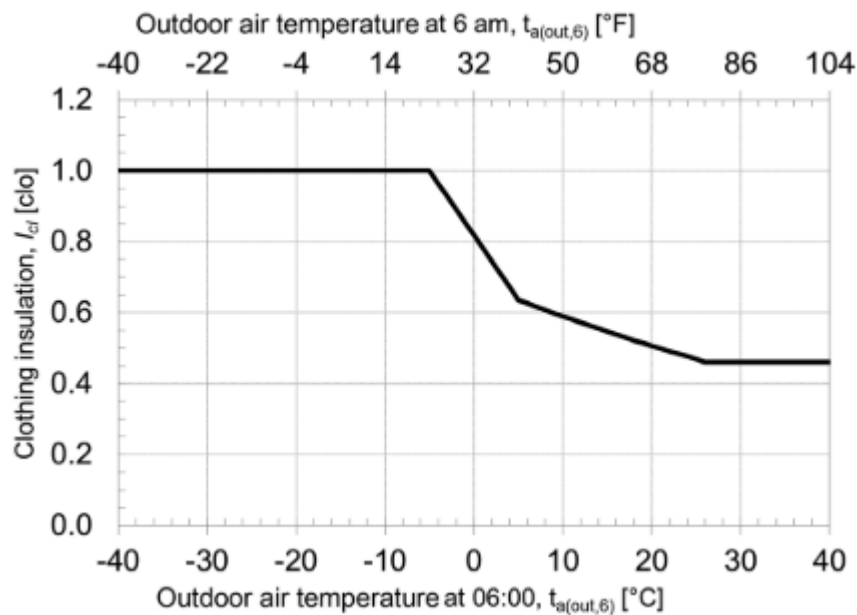
4.3.1.3. Isolamento térmico por vestimenta

Assim como no caso da atividade metabólica, a normativa da ASHRAE 55 também restringe a variação de nível de isolamento térmico de vestimenta para os usuários de uma edificação naturalmente ventilada. Para a avaliação do conforto térmico dos usuários segundo os critérios da norma americana, o nível de vestimenta de um indivíduo deve ficar restrito entre os valores de 0,5 a 1,0 clo.

A inserção dos requisitos de vestimenta no software de simulação computacional EnergyPlus se deu por meio da habilitação do “comportamento dinâmico de vestimenta”, item disponível na seção “*People*” durante a definição dos ganhos internos da edificação requerida

pelo software. Segundo o “Guia de Referência de Inputs e Outputs”, cujo acesso é realizado dentro do software EnergyPlus, o comportamento dinâmico de vestimenta segue o padrão de comportamento apresentado na norma da ASHRAE 55, na qual a vestimenta de um ocupante é estabelecida com base na temperatura local externa para o horário de 6h da manhã. O gráfico apresentado abaixo, na figura 12 ilustra o padrão citado.

Figura 12 - Metodologia dinâmica de determinação da vestimenta para a temperatura externa às 6 horas da manhã - ASHRAE 55



Fonte: ASHRAE 55 (2017, pg. 9)

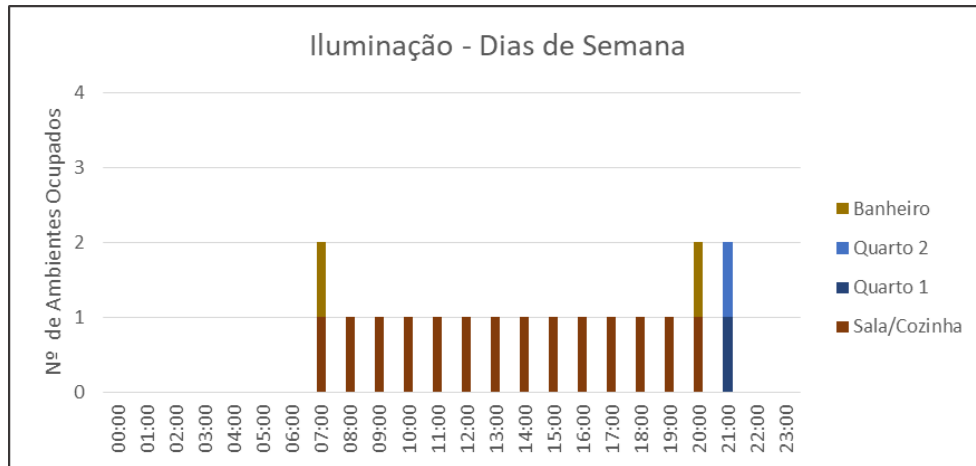
4.3.1.4. Iluminação

A distribuição dos elementos de iluminação, bem como suas potências e padrões de uso foram determinados em função da ocupação e da área de cada um dos ambientes da edificação. A fim de considerar a situação mais crítica possível no que diz respeito à carga interna, foi definido que, para o período entre as 07h e 22h, todas as zonas com pelo menos um ocupante contavam com o uso de iluminação na máxima potência para aquele ambiente.

A potência de iluminação adotada considerou as taxas típicas de dissipação de calor por iluminação fornecidas pela norma NBR 16401 (ABNT, 2008) para residências. Dessa forma, foi considerado o uso de lâmpadas fluorescentes compactas com potência dissipada de 9 W/m² para todos os ambientes. A fração radiante adotada foi de 0,09, valor indicado no “*Input Output Reference Guide*” do *Energyplus* com base nos valores fornecidos pela ASHRAE-RP-1282

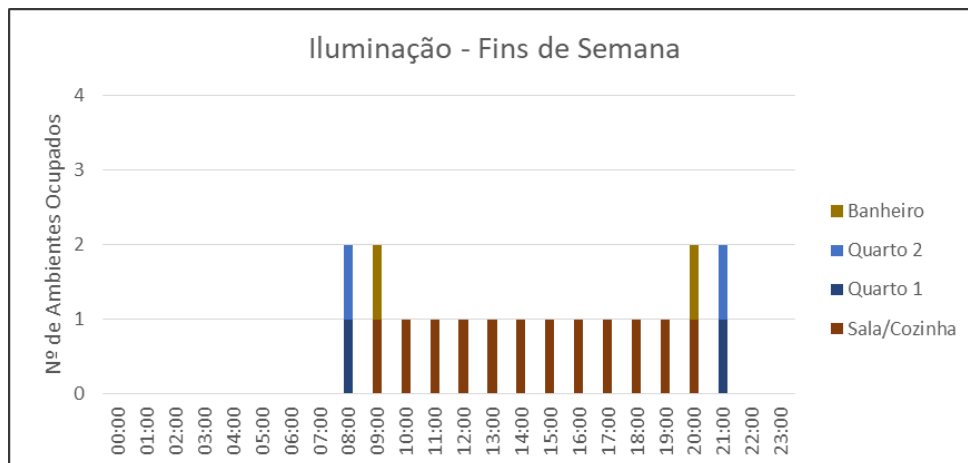
(2006) para lâmpadas fluorescentes compactas. A rotina de uso de iluminação, para os dias de semana e fins de semana, é apresentada nas Figura 13 e 14, respectivamente.

Figura 13 - Rotina de uso da iluminação - Dias de semana



Fonte: Elaborado pelo Autor (2019)

Figura 14 - Rotina de uso da iluminação - Finais de semana



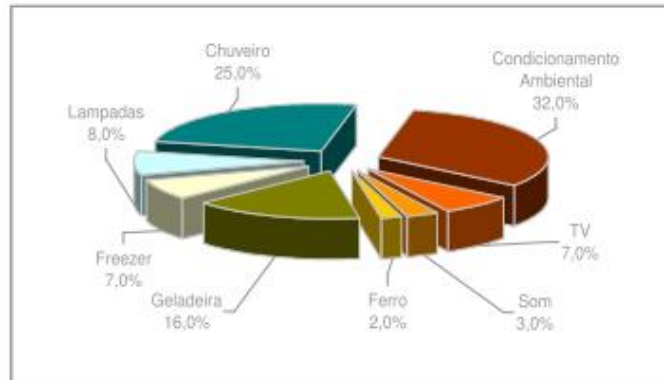
Fonte: Elaborado pelo Autor (2019)

4.3.1.5. Equipamentos

Os equipamentos considerados nesse trabalho levaram em consideração dados obtidos a partir do Relatório da Pesquisa de Posse de Eletrodomésticos e Hábitos de uso – Classe residencial – Região Sul (2007) conduzida pela Eletrobrás. No âmbito do Plano de Aplicação de Recursos do Procel – PAR 2017, encontra-se em curso, na presente data de realização deste trabalho, uma nova Pesquisa de Posse e Hábitos de Uso de Equipamentos Elétricos na Classe Residencial (PPH), entretanto, como os resultados, com divulgação inicialmente prevista para o segundo semestre de 2019, ainda não foram disponibilizados, considerou-se os resultados da

pesquisa anterior divulgada em 2007. Um resumo da participação dos eletrodomésticos no consumo residencial da região Sul é apresentado na Figura 15.

Figura 15 - Participação dos eletrodomésticos no consumo residencial da região Sul

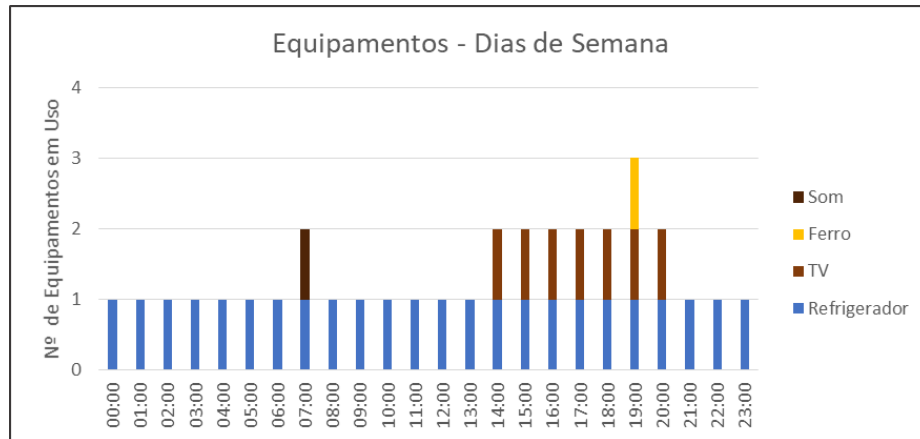


Fonte: Procel (2007)

Considerando a data de realização da pesquisa do Procel (2007) e tendo em vista que o equipamento “Freezer” se encontra, atualmente, integrado aos equipamentos de refrigeração na maioria dos casos, o uso deste eletrodoméstico foi desconsiderado no presente trabalho. É importante destacar que esse trabalho avalia o comportamento de residências naturalmente ventiladas, tendo sido desconsiderado também o uso e o consumo de equipamentos de condicionamento de ar. Para os equipamentos utilizados, foi considerada uma potência de 1200 W para o ferro de passar roupa, 200 W para o refrigerador, 20 W para o som e 90 W para a televisão. Para todos os equipamentos, foi adotada uma fração radiante de 0,2.

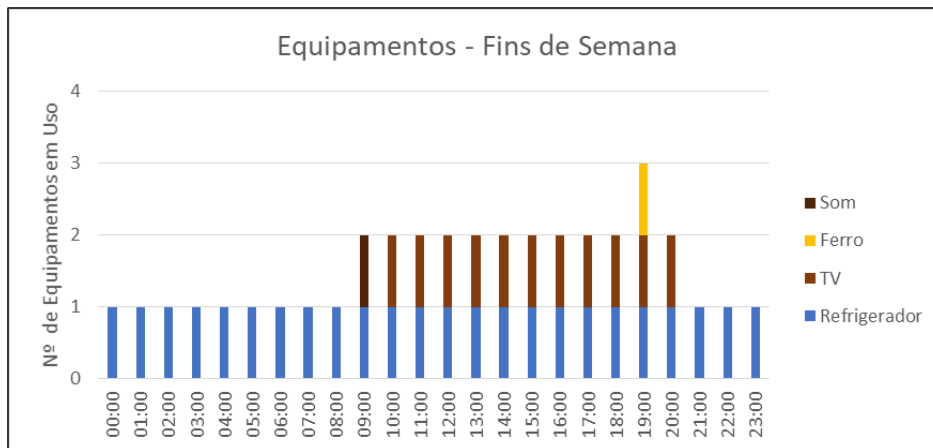
Após a definição dos equipamentos, foram construídas rotinas de utilização para esses eletrodomésticos em cada uma das quatro zonas definidas para a edificação, considerando sua média de utilização diária. Essas rotinas são apresentadas nas figuras 16 e 17, considerando os usos nos dias da semana e fins de semana, respectivamente.

Figura 16 - Rotina de uso dos equipamentos - Dias de semana



Fonte: Elaborado pelo Autor (2019)

Figura 17 - Rotina de uso dos equipamentos - Finais de semana



Fonte: Elaborado pelo Autor (2019)

É importante destacar que as cargas instaladas dos equipamentos foram consideradas também para o ganho de calor interno dos ambientes. Foi aplicada uma fração radiante de 0,2 para os equipamentos da sala de estar (zona 1). O chuveiro localizado no banheiro (zona 4), no entanto, não foi considerado no ganho interno da edificação, pois grande parte do calor gerado por ele seria devido a correntes convectivas, que não são devidamente modeladas pelo software *EnergyPlus* (MATOS, 2007 apud SILVEIRA, 2014).

4.3.1.6. Ventilação

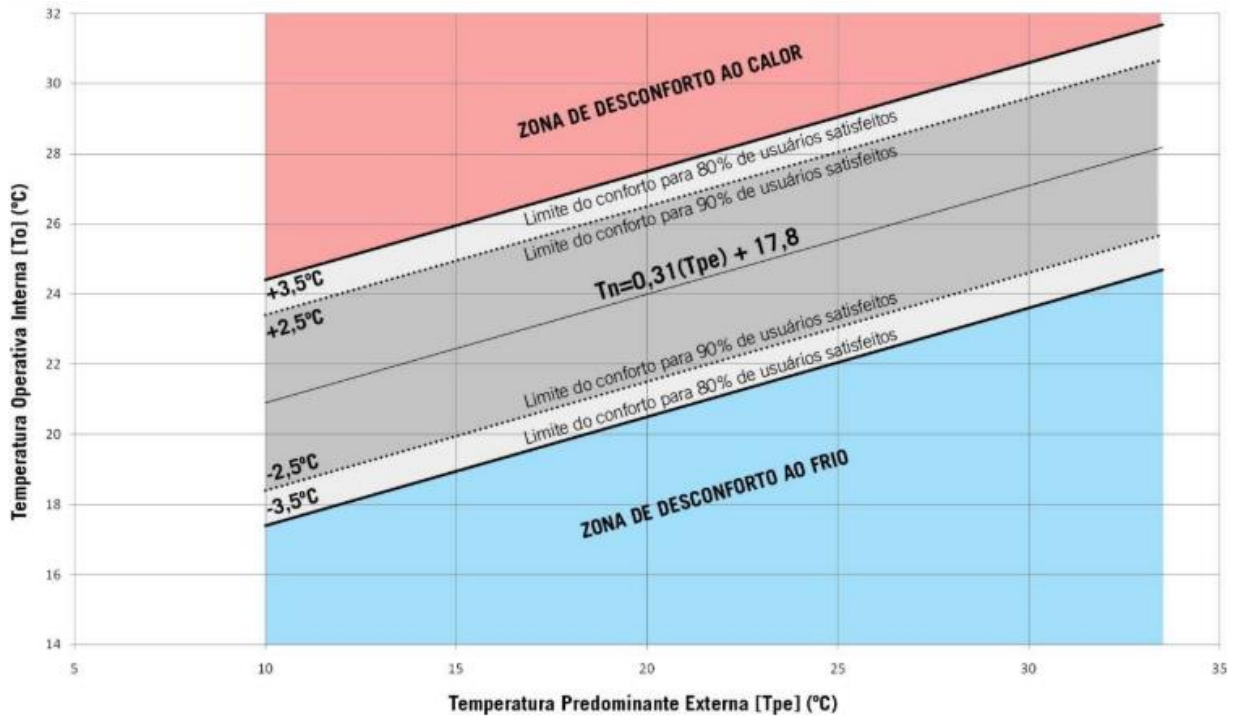
As informações referentes ao comportamento do sistema de ventilação natural da residência, fator determinante para o conforto térmico dos usuários, também foram inseridas no programa de simulação termo energética. Os dados referentes ao comportamento da ventilação para a edificação padrão selecionada foram inseridos por meio do “*Airflow Network*”,

componente integrante do programa *EnergyPlus*. O preenchimento dos itens requeridos pelo programa foi realizado com base no “Manual de simulação computacional de edifícios naturalmente ventilados” desenvolvido por Veiga et al (2019). O guia citado traz orientações quanto ao preenchimento dos itens mínimos requeridos para a simulação das condições de ventilação natural de uma residência padrão.

4.3.2. Atendimento das condições de conforto térmico

A avaliação de atendimento quanto as condições de conforto térmico para os usuários da edificação se deu com base nos critérios apresentados pela norma ASHRAE Standard 55 de 2017. A normativa da ASHRAE considera, para a avaliação de edificações naturalmente ventiladas, o modelo adaptativo de conforto térmico, no qual o usuário é apresentado como um agente ativo de mudança. Dessa maneira, o principal critério de avaliação de conformidade de conforto térmico na edificação está relacionado ao comportamento da temperatura operativa no interior da residência. Para que os parâmetros de conforto sejam atingidos para pelo menos 80% dos usuários da edificação, a temperatura operativa medida no interior da residência, relacionada à temperatura média exterior prevalecente, deve estar contida nos limites do gráfico de conforto adaptativo. Uma adaptação do gráfico disponibilizado pela normativa ASHRAE 55 (2017) é apresentada na figura 18. A figura apresentada, elaborada por Silveira (2014) em sua dissertação de mestrado, traz as informações do gráfico traduzidas para o português e ilustra as zonas de desconforto por frio e por calor.

Figura 18 - Relação entre temperatura operativa interna e temperatura média mensal externa



Fonte: Silveira (2014, pg. 27)

O atendimento aos requisitos de conforto impostos pela ASHRAE 55 é então verificado com base na conformidade das condições de conforto térmico com os limites estabelecidos pela normativa ao longo do ano. Caso esses limites sejam extrapolados, o percentual de horas de desconforto também pode ser obtido, indicando a Frequência de Desconforto Térmico (FDT) na edificação para os períodos ocupados. Além disso, outro indicador utilizado será a Intensidade do Desconforto Térmico (IDT) experimentado pelos usuários ao longo do período de uso da edificação.

5. RESULTADOS

Os resultados obtidos para os procedimentos de avaliação de desempenho segundo os requisitos da norma NBR 15575 (ABNT, 2013), bem como os resultados da avaliação do conforto térmico segundo os requisitos da normativa americana ASHRAE 55 (2017) são apresentados a seguir.

5.1. PROCEDIMENTO SIMPLIFICADO (NBR 15575)

A primeira etapa indicada pela norma brasileira para a análise de desempenho de uma edificação consiste na execução do procedimento simplificado. Como já destacado anteriormente, esse procedimento avalia o comportamento dos elementos da envoltória da edificação, utilizando como critério de análise valores mínimos a serem obtidos para a transmitância térmica (U) e a capacidade térmica (CT) dos elementos de vedação vertical e de cobertura adotados.

Os resultados dos cálculos para as transmitâncias e capacidades térmicas dos elementos da envoltória previstos para a edificação em estudo são apresentados no quadro 6 juntamente dos requisitos da NBR 15575 (ABNT, 2013) para edificações localizadas na zona bioclimática 3. O detalhamento dos cálculos realizados é apresentado no Apêndice A.

Quadro 6 - Verificação de conformidade dos elementos da envoltória para os requisitos de transmitância (U) e capacidade térmica (CT) da NBR 15.575

REQUISITOS NBR 15.575 - PROCEDIMENTO SIMPLIFICADO					
Elemento construtivo	Requisitos - Zona Bioclimática 3		Valores calculados		NBR 15.575
	Transmitância (U)	Capac. Térmica (CT)	Transmitância (U)	Capac. Térmica (CT)	Conformidade
Cobertura	U < 1,50	-	U = 2,08	-	NÃO ATENDE
Paredes Externas ($\alpha < 0,6$)	U ≤ 3,70	CT ≥ 130,00	U = 2,45	CT = 130,22	ATENDE
Paredes Externas ($\alpha > 0,6$)	U ≤ 2,50	CT ≥ 130,00	U = 2,45	CT = 130,22	ATENDE

A absorvância à radiação solar (α) considerada para a cobertura foi de 0,75, valor correspondente à telha cerâmica.
Como ainda não há definição de cor das paredes externas, foi verificada a conformidade das paredes considerando absorvância à radiação solar (α) maior e menor que 0,6.

Fonte: Elaborado pelo Autor (2019)

Como demonstrado no quadro acima, o valor da transmitância para a configuração de cobertura adotada não atende ao valor mínimo estabelecido pela NBR 15.575 (ABNT, 2013) para coberturas com absorvância solar maior do que 0,6 localizadas na zona bioclimática 3. As paredes externas, por outro lado, atendem aos requisitos da normativa tanto em relação ao valor

mínimo de transmitância quanto à capacidade térmica para absorvências menores e maiores do que 0,6.

Tendo em vista o não atendimento do sistema de cobertura, a NBR 15.575 (ABNT, 2013) exige, para comprovação de conformidade da envoltória aos requisitos mínimos da norma, a realização de uma nova análise de desempenho da edificação, desta vez segundo a metodologia de simulação termo energética.

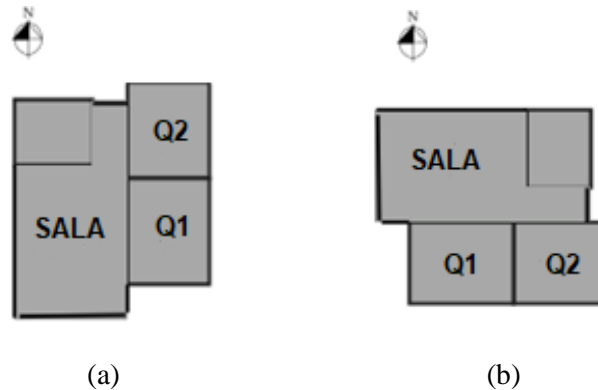
5.2. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL (NBR 15.575)

O método de avaliação de desempenho por meio da análise computacional permite uma análise global, mais abrangente e realista do comportamento da edificação, avaliando a construção como conjunto único formado por zonas com diferentes comportamentos térmicos.

O modelo construído para a simulação termo energética da edificação levou em consideração a mesma configuração para os elementos da envoltória utilizados nos cálculos de desempenho segundo o método simplificado. Entretanto, como já citado anteriormente, uma adaptação no elemento de vedação vertical teve de ser adotada devido à limitação do programa *EnergyPlus* para a realização da análise de transferência de calor em elementos complexos, como no caso de blocos cerâmicos furados.

O posicionamento da edificação foi considerado de acordo com as orientações críticas de análise sugeridas pela NBR 15.575 (ABNT, 2013) para o dia típico de verão e de inverno. Dessa forma, a orientação crítica de inverno considerou a edificação posicionada de maneira que o dormitório 1, local com maior ocupação no período noturno e, conseqüentemente mais suscetível a desconforto por frio, tivesse sua janela voltada para sul e a outra parede exposta voltada para leste, como sugerido pela normativa. A orientação crítica de verão, por sua vez, considerou a rotação horária de 90° da edificação em relação a primeira orientação, permitindo que a sala de estar, local com maior ocupação diurna, tivesse uma janela voltada para oeste e a outra parede exposta voltada para norte. As orientações críticas adotadas são apresentadas na figura 19.

Figura 19- Orientação crítica de inverno (a) e orientação crítica de verão (b) segundo os critérios da NBR 15.575



Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

Tendo em vista que a edificação estudada foi considerada em fase de projeto e por isso ainda não possui uma definição para a cor das paredes externas, a simulação computacional foi realizada para três alternativas de cor conforme as orientações fornecidas pela NBR 15.575 (ABNT, 2013). Dessa maneira, diferentes simulações foram realizadas para os dias típicos de inverno e de verão, considerando uma cor clara, uma média e uma escura para as paredes externas, com absorvâncias solares de 0,3, 0,5 e 0,7, respectivamente. Em todos os cenários simulados, a cobertura da edificação manteve a mesma absorvância de 0,75, correspondente à cor da telha cerâmica.

A avaliação de conformidade com os requisitos da norma se deu por meio da comparação das temperaturas internas da edificação com as temperaturas externas no local. Os três cenários montados para as situações de verão e de inverno, bem como a verificação de conformidade com os requisitos da norma de desempenho são apresentados nos Quadros 7 e 8.

Quadro 7 - Verificação de atendimento dos requisitos da NBR 15.575 para diferentes absorvâncias solares – Dia típico de verão

DIA TÍPICO DE VERÃO - COR DAS PAREDES EXTERNAS					
Critério de Atendimento: $T_{int. máx} \leq T_{ext. máx}$					
SIMULAÇÃO	COR	α	$T_{ext. máx}$ (°C)	$T_{int. máx}$ (°C)	NBR 15.575
1	Clara	0,3	35.90	31.74	ATENDE
2	Média	0,5	35.90	32.19	ATENDE
3*	Escura	0,7	35.90	32.70	ATENDE

*Situação mais crítica para o período de verão.

Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

Quadro 8 - Verificação de atendimento dos requisitos da NBR 15.575 para diferentes absorptâncias solares - Dia típico de inverno

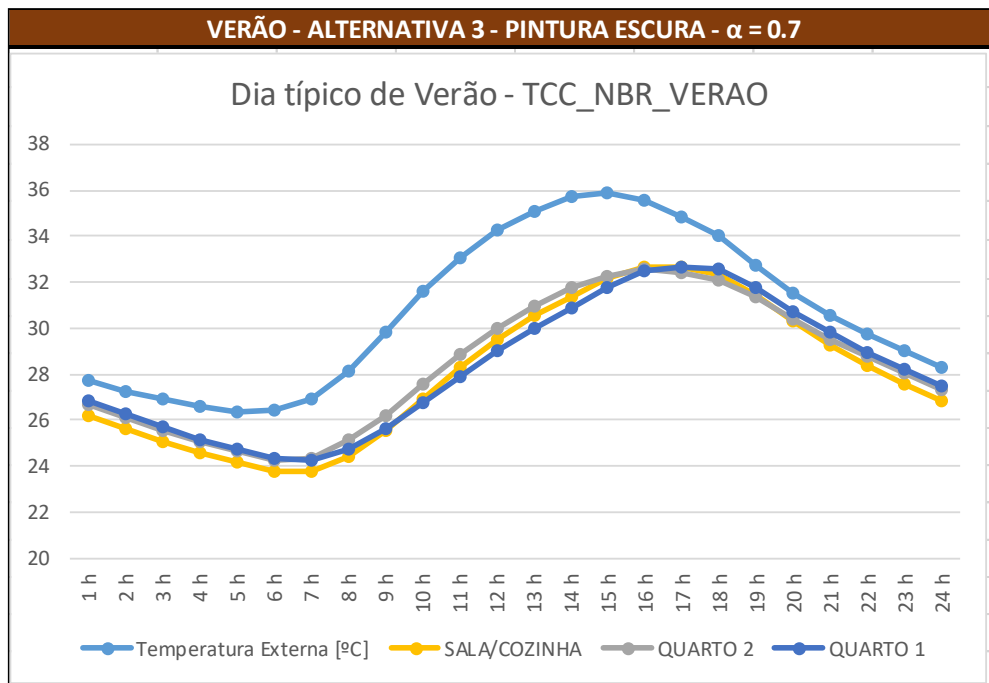
DIA TÍPICO DE INVERNO - COR DAS PAREDES EXTERNAS					
Critério de Atendimento: $T_{\text{int. mín}} > T_{\text{ext mín}} + 3^{\circ}\text{C}$					
SIMULAÇÃO	COR	α	T ext. mín (°C)	T int. mín (°C)	NBR 15.575
1*	Clara	0,3	4.37	9.53	ATENDE
2	Média	0,5	4.37	9.64	ATENDE
3	Escura	0,7	4.37	9.74	ATENDE

*Situação mais crítica para o período de inverno.

Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

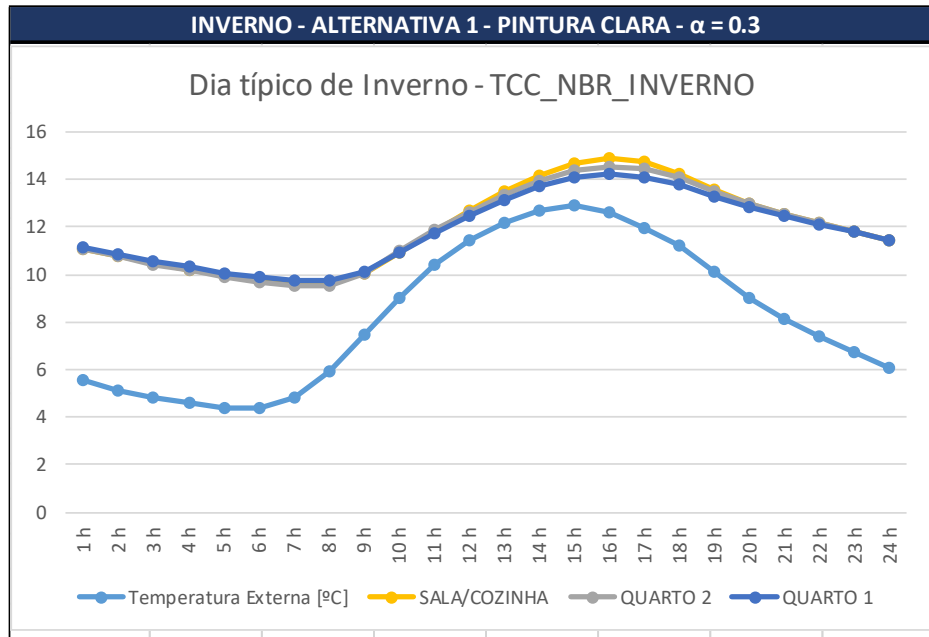
Todas as alternativas simuladas, para condição de verão e de inverno, atenderam aos requisitos de desempenho da norma. Enquanto o resultado mais crítico para o dia típico de verão foi o da alternativa de cor escura, com absorptância de 0,7, o resultado com pior desempenho para o dia típico de inverno foi o cenário de cor clara, com absorptância de 0,3. As variações das temperaturas internas e externas nos dois cenários mais críticos são apresentadas nas figuras 20 e 21.

Figura 20 - Evolução das temperaturas externas e internas ao longo de um dia típico de verão



Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

Figura 21 - Evolução das temperaturas externas e internas ao longo de um dia típico de inverno



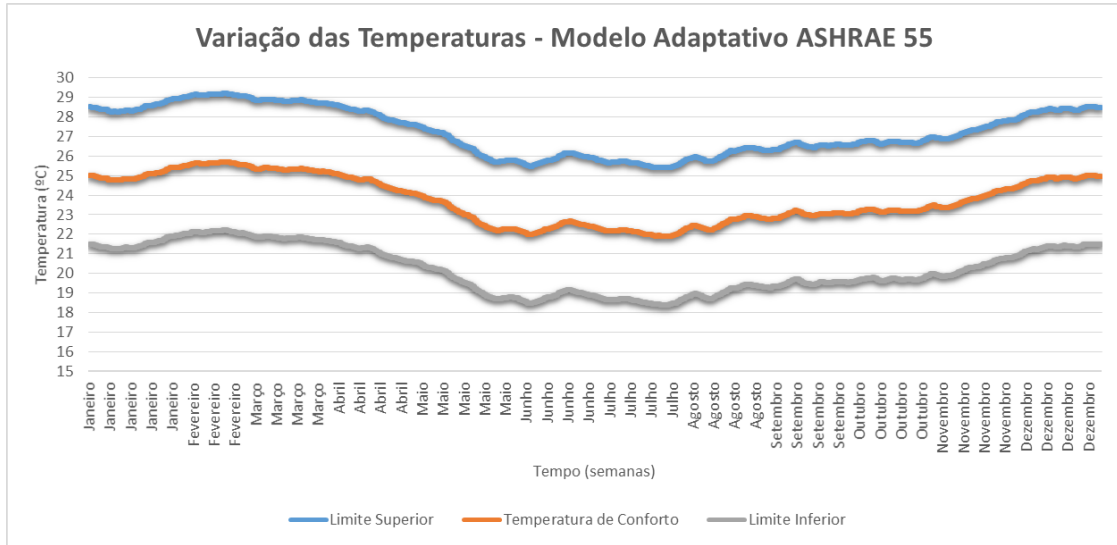
Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

5.3. CONFORTO TÉRMICO (ASHRAE 55)

Os resultados obtidos para a avaliação do conforto térmico fornecido pela residência padrão adotada seguiram os critérios de análise indicados pela normativa americana ASHRAE Standard 55 (2017). As temperaturas de conforto, bem como os limites de conforto térmico segundo a metodologia adaptativa, foram determinadas com base na avaliação da temperatura operativa interna para cada uma das zonas térmicas do modelo. Os indicadores citados foram configurados como dados de saída da simulação e tiveram, assim, seus valores fornecidos pelo programa *EnergyPlus* para cada período de uma hora ao longo dos 365 dias do ano.

A metodologia de avaliação de conforto utilizada neste trabalho considera a adaptação do usuário ao clima local como fator importante na sensação de conforto experimentada por ele. Dessa forma, enquanto outros métodos apresentam faixas de conforto constantes ao longo do ano, a temperatura ideal de conforto, e consequentemente a faixa de conforto, para a metodologia adaptativa varia com base nas oscilações da temperatura externa. O gráfico apresentado na figura 22 demonstra a variação da temperatura de conforto e dos limites superior e inferior da faixa de conforto térmico considerando os limites de aceitabilidade para 80% dos ocupantes. Os limites superior e inferior da faixa de conforto são dados com base na temperatura ideal de conforto térmico acrescida de 3,5 graus e subtraída de 3,5 graus, respectivamente.

Figura 22 - Evolução dos limites da faixa de conforto térmico do modelo adaptativo para a região estudada



Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

Após a obtenção das temperaturas de limite da faixa de conforto, foi possível verificar os períodos de adequação de cada uma das zonas regularmente ocupadas da edificação através da avaliação do comportamento da temperatura operativa interna das zonas ao longo do ano. Essa verificação foi realizada para as condições de verão e de inverno, considerando as mesmas configurações e orientações definidas para as análises de desempenho da envoltória segundo a NBR 15.575 (ABNT, 2013).

Dessa forma, dois cenários foram analisados: o primeiro considerou a orientação crítica de verão sugerida pela NBR 15.575 (ABNT, 2013) e uma absorvância solar das paredes externas de 0.7, enquanto o segundo cenário considerou a orientação crítica de inverno sugerida pela norma brasileira e uma absorvância solar das paredes externas de 0.3. A avaliação dos dois cenários críticos foi realizada para cada uma das três zonas regularmente ocupadas da edificação. Os dois cenários citados são apresentados no quadro 9.

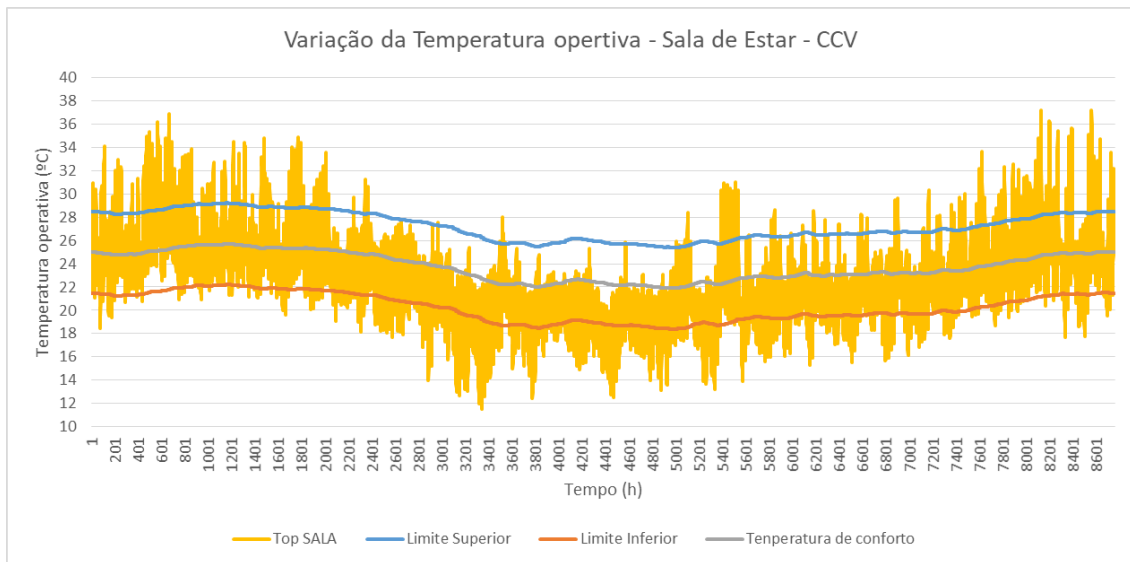
Quadro 9 - Cenários de avaliação de conforto térmico

CENÁRIOS DE AVALIAÇÃO DE CONFORTO TÉRMICO		
SIMULAÇÃO	ORIENTAÇÃO	ABSORT. PAREDES EXT.
Condição Crítica de Verão		$\alpha = 0.7$
Condição Crítica de Inverno		$\alpha = 0.3$

Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

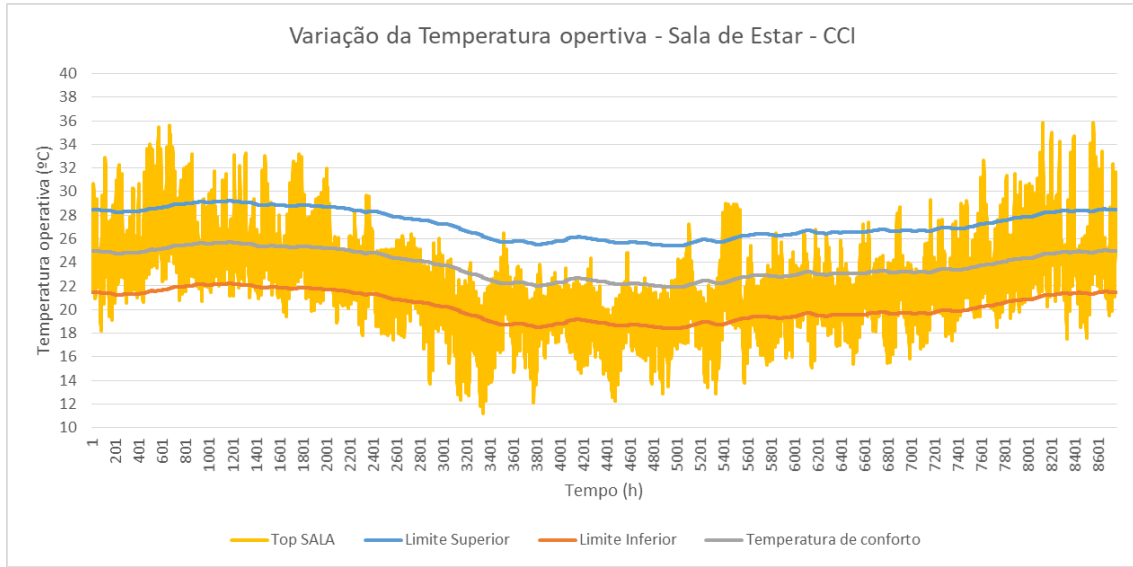
O comportamento das temperaturas internas nas três zonas estudadas, considerando as situações críticas de verão e de inverno é apresentado nos gráficos 23, 24, 25, 26, 27 e 28.

Figura 23 - Evolução da temperatura operativa interna para a zona “Sala de Estar” ao longo do ano – Condição crítica de verão



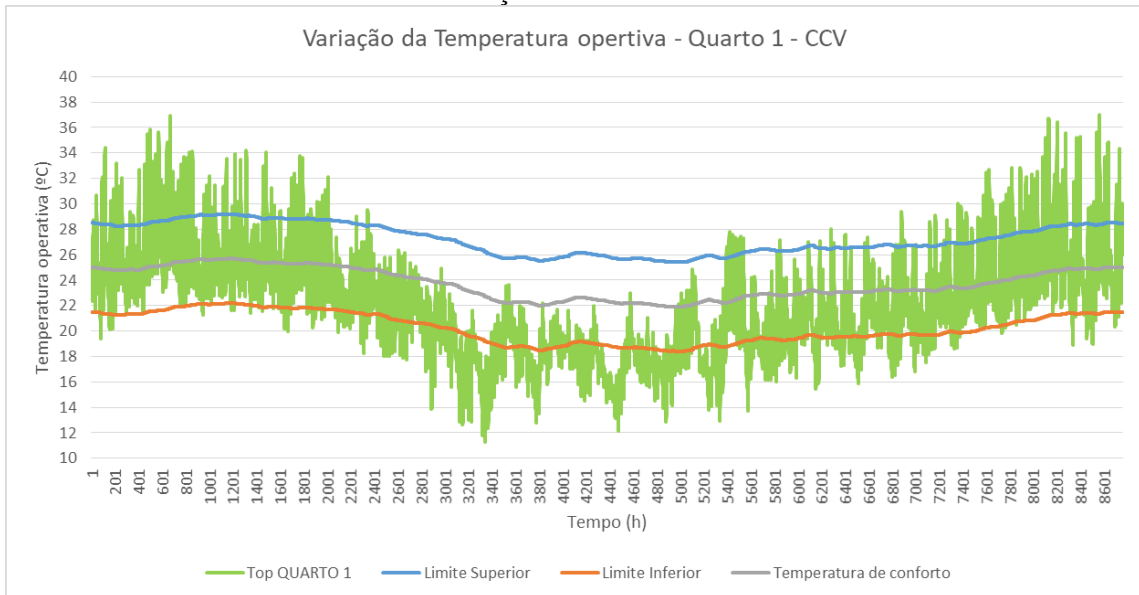
Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

Figura 24 - Evolução da temperatura operativa interna para a zona “Sala de Estar” ao longo do ano – Condição crítica de inverno



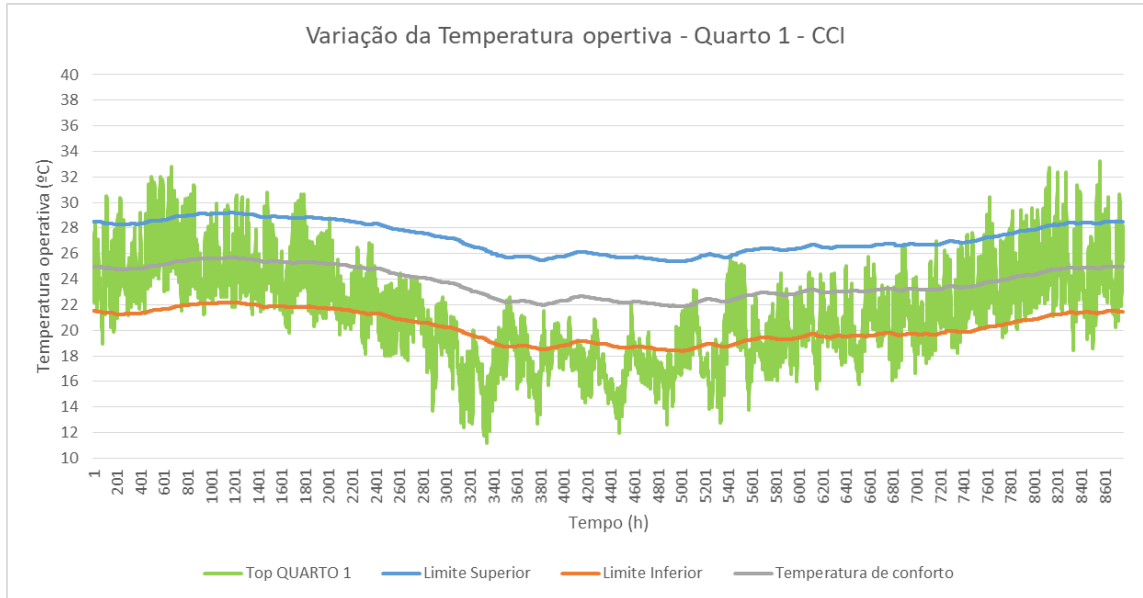
Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

Figura 25 - Evolução da temperatura operativa interna para a zona “Quarto 1” ao longo do ano – Condição crítica de verão



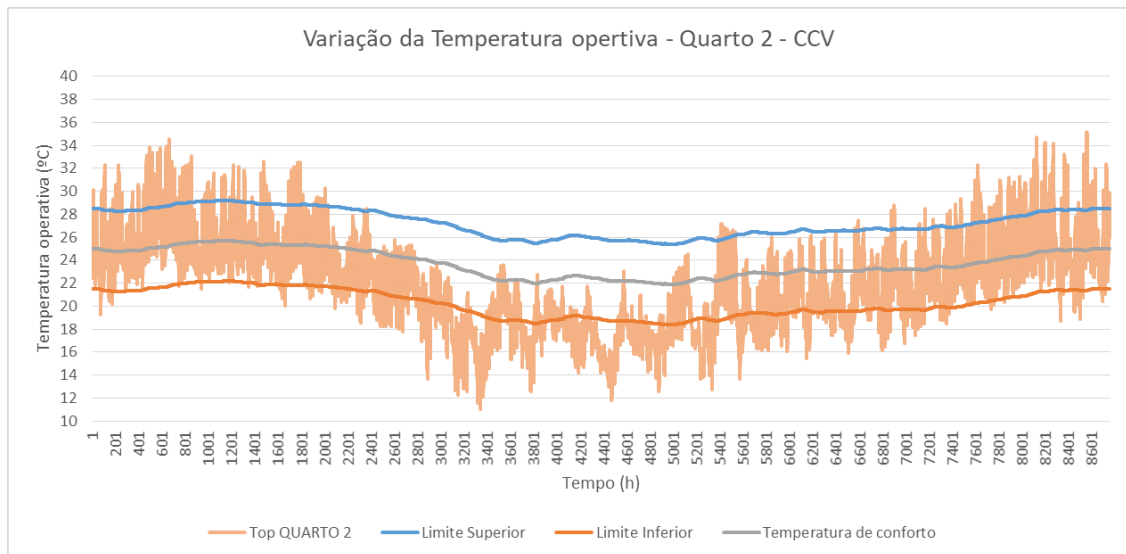
Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

Figura 26 - Evolução da temperatura operativa interna para a zona “Quarto 1” ao longo do ano – Condição crítica de inverno



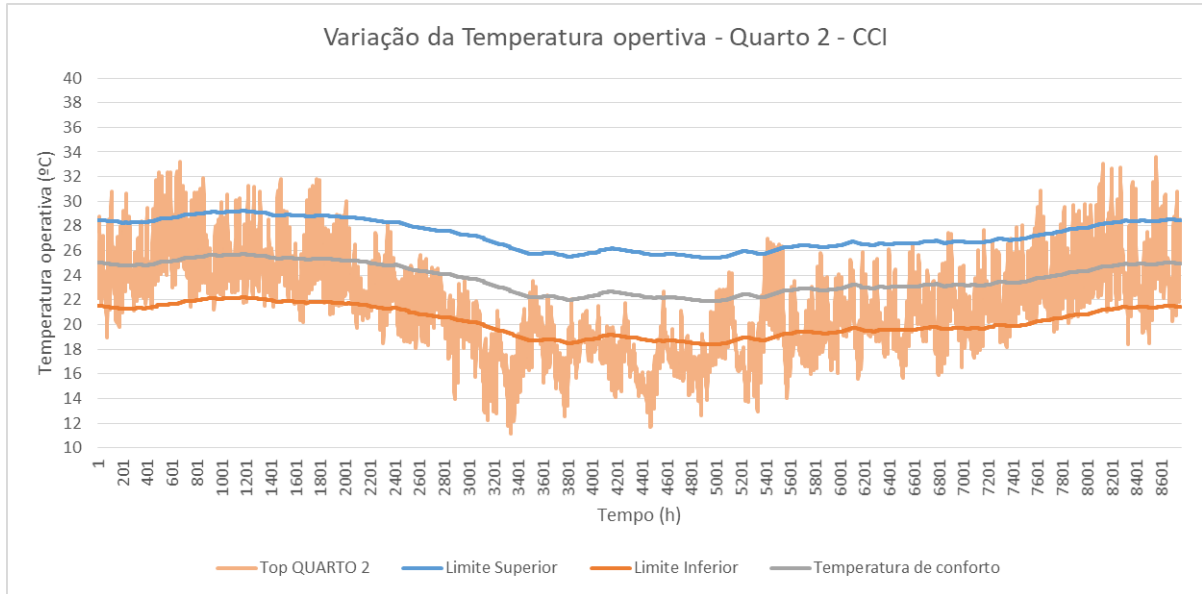
Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

Figura 27 - Evolução da temperatura operativa interna para a zona “Quarto 2” ao longo do ano – Condição crítica de verão



Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

Figura 28 - Evolução da temperatura operativa interna para a zona “Quarto 2” ao longo do ano – Condição crítica de inverno



Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

Os gráficos apresentados demonstram uma variação significativa da temperatura operativa interna ao longo do ano para todas as zonas analisadas, revelando também uma série de períodos nos quais as temperaturas internas excedem os limites de aceitabilidade para 80% dos ocupantes tanto para a condição crítica de inverno quanto para a de verão. Os pontos nos quais a temperatura operativa interna ultrapassa o limite superior da faixa de conforto indicam a ocorrência de períodos de desconforto por calor, enquanto os pontos que apresentam temperaturas abaixo do limite inferior dessa faixa revelam a ocorrência de desconforto por frio.

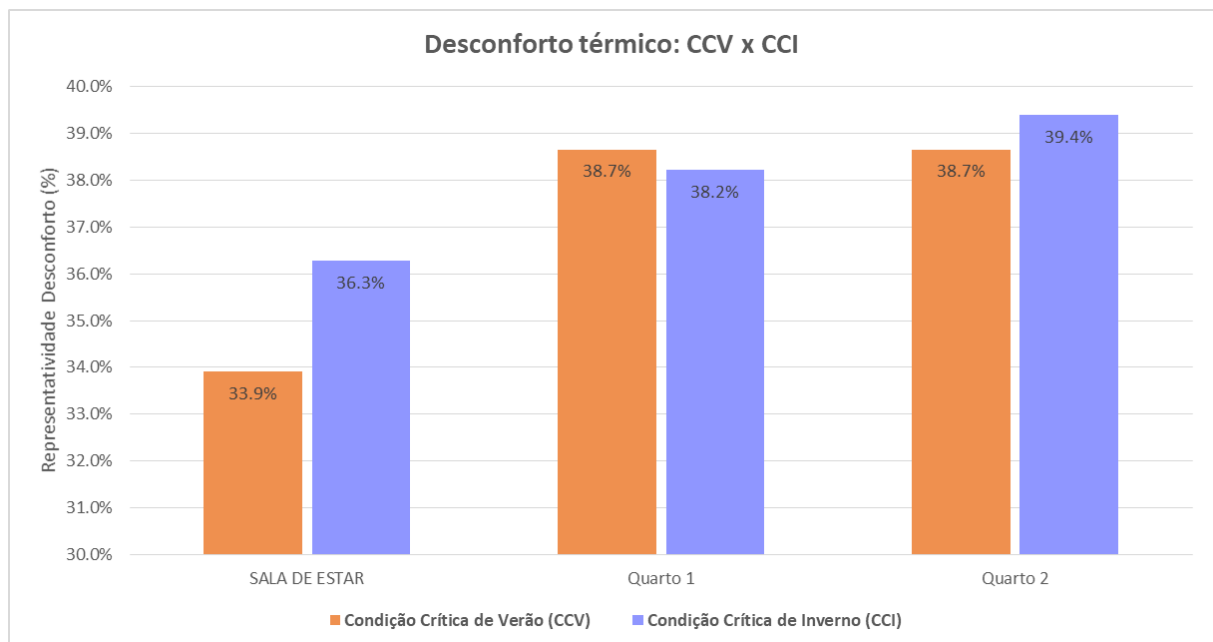
Um resumo do total das horas fora da faixa de conforto em cada zona é apresentado no quadro 10, destacando os resultados obtidos para as condições críticas de verão (CCV) e condições críticas de inverno (CCI). A figura 29 apresenta também um gráfico de comparação entre os resultados obtidos em cada zona para as duas condições críticas citadas.

Quadro 10 - Total de horas de desconforto nas zonas regularmente ocupadas no período de um ano

DESCONFORTO TOTAL				
ORIENTAÇÃO	ZONA TÉRMICA	HORAS DE DESCONFORTO	HORAS/ANO	REPRESENTATIVIDADE DESCONFORTO (%)
CCV	Sala de Estar	2970	8760	33.90%
CCV	Quarto 1	3386	8760	38.65%
CCV	Quarto 2	3386	8760	38.65%
CCI	Sala de Estar	3178	8760	36.28%
CCI	Quarto 1	3348	8760	38.22%
CCI	Quarto 2	3451	8760	39.39%

Fonte: elaborado pelo autor (2019)

Figura 29 - Desconforto térmico total sob as condições críticas de inverno e de verão



Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

O gráfico apresentado demonstra um maior número de horas de desconforto para a edificação configurada sob a condição crítica de inverno em duas das três zonas regularmente ocupadas da edificação. Para a condição crítica de inverno, as temperaturas internas na zona da sala de estar, por exemplo, se encontram fora da faixa de conforto estipulada para mais de 36% das 8760 horas de um ano, enquanto para a condição crítica de verão as horas de desconforto se limitam a 34% das horas do ano.

A análise apresentada indica, no entanto, apenas o total de horas de desconforto frente às 8760 horas de um ano, não fazendo distinção entre os períodos ocupados e não ocupados,

bem como ao tipo de desconforto (frio ou calor) experimentado pelos usuários da residência. Tendo isso em vista, uma análise mais aprofundada foi realizada no capítulo 5.3.1, buscando identificar a distribuição das horas de desconforto por frio e por calor na edificação ao longo do ano.

5.3.1. Distribuição do desconforto

Os quadros 11, 12 e 13 demonstram, para a condição crítica de verão (CCV) e condição crítica de inverno (CCI), o somatório e distribuição das horas de desconforto por frio e por calor para cada uma das 3 zonas regularmente ocupadas.

Quadro 11 - Horas de desconforto por frio e calor considerando apenas os períodos ocupados na zona “Sala de Estar”

DESCONFORTO (h) - SALA DE ESTAR														
Condição Crítica	Desconforto	Jan	Feb	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total (h)
CCV	Calor	184	115	127	20	10	0	10	66	22	37	128	179	1253
	Frio	1	0	3	30	80	58	102	49	22	8	0	2	
CCI	Calor	167	92	91	11	4	0	0	50	3	27	104	167	1233
	Frio	1	0	4	43	128	79	144	70	35	11	0	2	

Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

Quadro 12 - Horas de desconforto por frio e calor considerando apenas os períodos ocupados na zona “Quarto 1”

DESCONFORTO (h) - QUARTO 1														
Condição Crítica	Desconforto	Jan	Feb	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total (h)
CCV	Calor	15	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	7	1375
	Frio	15	10	41	123	240	212	252	175	130	95	21	37	
CCI	Calor	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1609
	Frio	23	18	65	163	258	234	267	194	162	125	39	55	

Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

Quadro 13 - Horas de desconforto por frio e calor considerando apenas os períodos ocupados na zona “Quarto 2”

DESCONFORTO (h) - QUARTO 2														
Condição Crítica	Desconforto	Jan	Feb	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total (h)
CCV	Calor	10	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1408
	Frio	16	11	42	130	245	219	255	182	136	102	21	36	
CCI	Calor	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1594
	Frio	26	17	65	153	253	234	265	194	161	126	40	55	

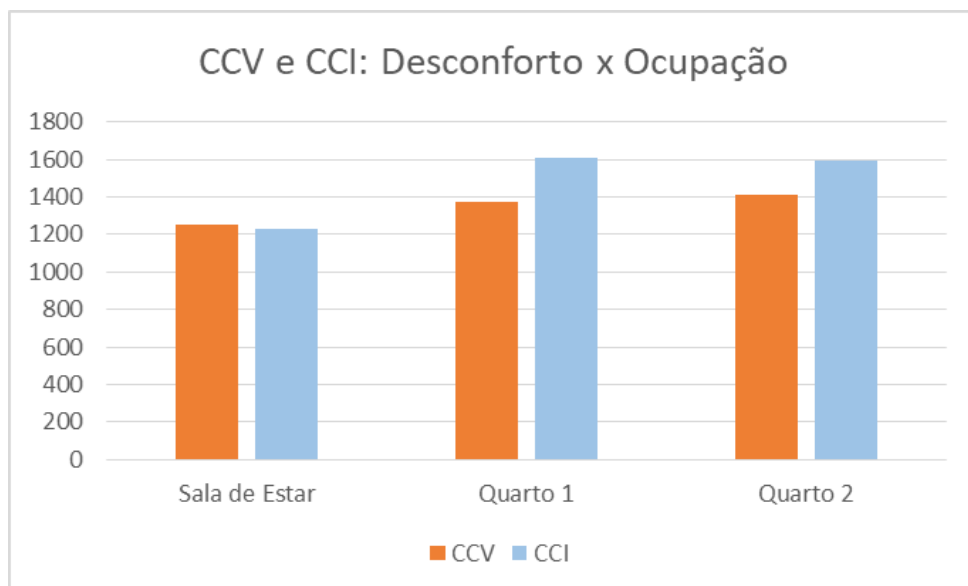
Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

Para os períodos ocupados na zona “Sala de Estar”, os resultados demonstram uma maior relevância do desconforto por calor do que por frio. Esse resultado era esperado, tendo em vista que a ocupação desse ambiente é principalmente diurna, período mais suscetível ao desconforto por calor devido a influência da radiação solar. Da mesma forma, esperava-se também que a condição crítica de verão (CCV), na qual a orientação da edificação posiciona a sala de estar com uma parede voltada para oeste e outra para o norte, apresentasse mais horas de desconforto por calor do que a condição crítica de inverno (CCI), como de fato ocorreu.

Para os períodos ocupados nas zonas “Quarto 1” e “Quarto 2”, por outro lado, os resultados demonstram relevância significativamente maior do desconforto por frio do que por calor. Esses resultados também eram esperados, tendo em vista que a ocupação desses ambientes é apenas noturna, período mais suscetível ao desconforto por frio. O maior número de horas de desconforto encontrado para a CCI quando comparada à CCV também era esperado, tendo em vista que a orientação e absorvância adotadas para a condição crítica de inverno resultam em uma redução dos ganhos por influência da radiação solar nos quartos.

Uma comparação entre o total de horas de desconforto para as duas configurações críticas da edificação (CCV e CCI), considerando agora apenas os períodos ocupados de cada ambiente é apresentado na figura 30.

Figura 30 - Total de horas de desconforto para a Condição crítica de verão (CCV) e de inverno (CCI)



Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

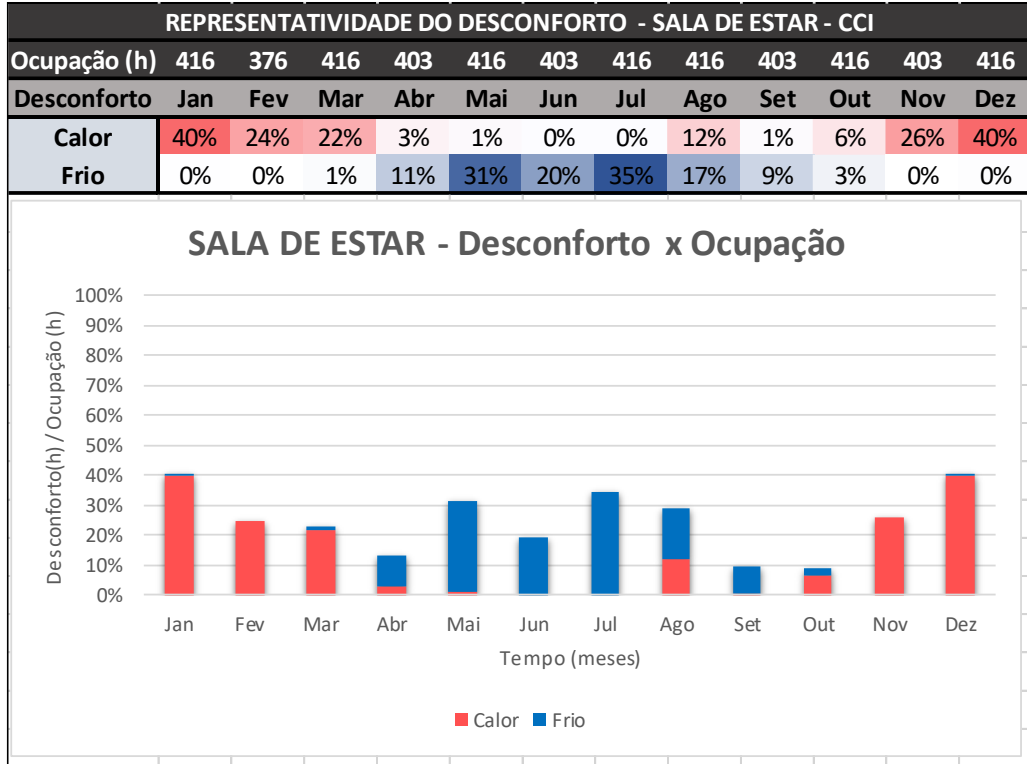
Enquanto a quantidade de horas de desconforto durante os períodos ocupados na “Sala de estar” é semelhante para as duas condições críticas, os resultados demonstram um número significativamente maior de horas de desconforto nos quartos para a configuração da edificação sob as condições críticas de inverno.

Os resultados apresentados permitem a interpretação de que, para a edificação e localização consideradas, a “Condição crítica de inverno” (CCI) é a mais desfavorável dentre as duas condições analisadas.

5.3.2. Frequência de Desconforto Térmico (FDT)

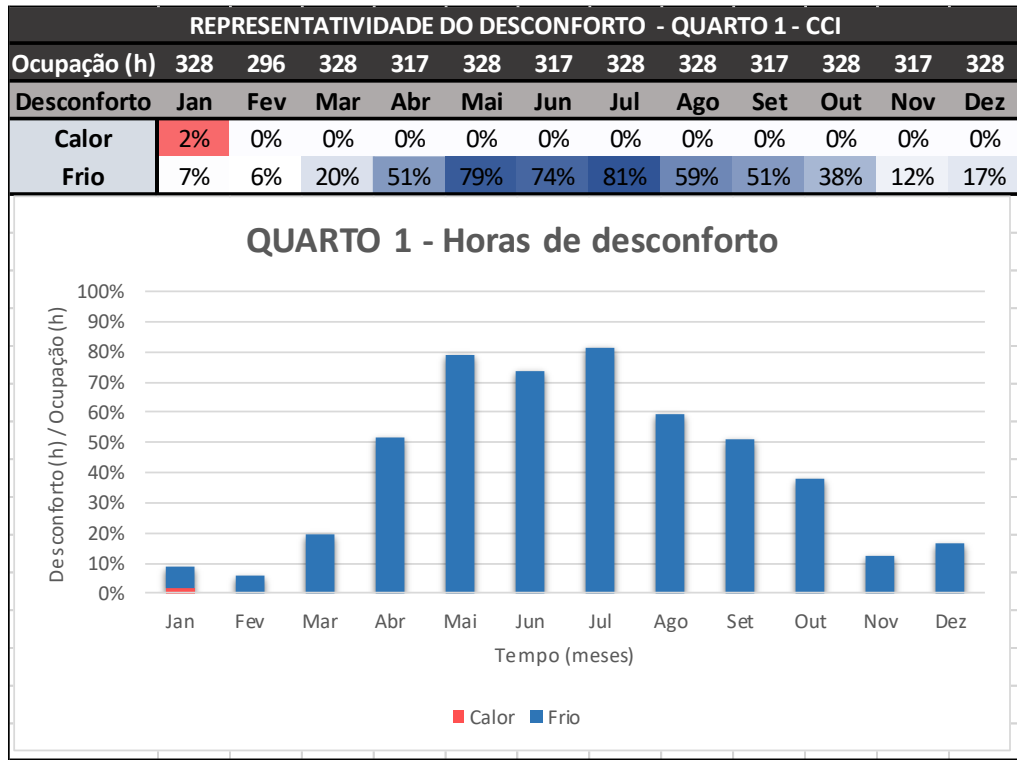
Com o intuito de mensurar a representatividade e real influência das horas de desconforto identificadas frente aos períodos de ocupação dos ambientes, foi avaliada também a frequência de desconforto térmico (FDT) para cada uma das zonas sob a CCI, condição mais crítica dentre as avaliadas. Os resultados encontrados para a frequência de desconforto térmico em cada uma das zonas regularmente ocupadas da edificação são apresentados nas figuras 31, 32 e 33.

Figura 31 - Frequência de Desconforto Térmico no ambiente “Sala de Estar”



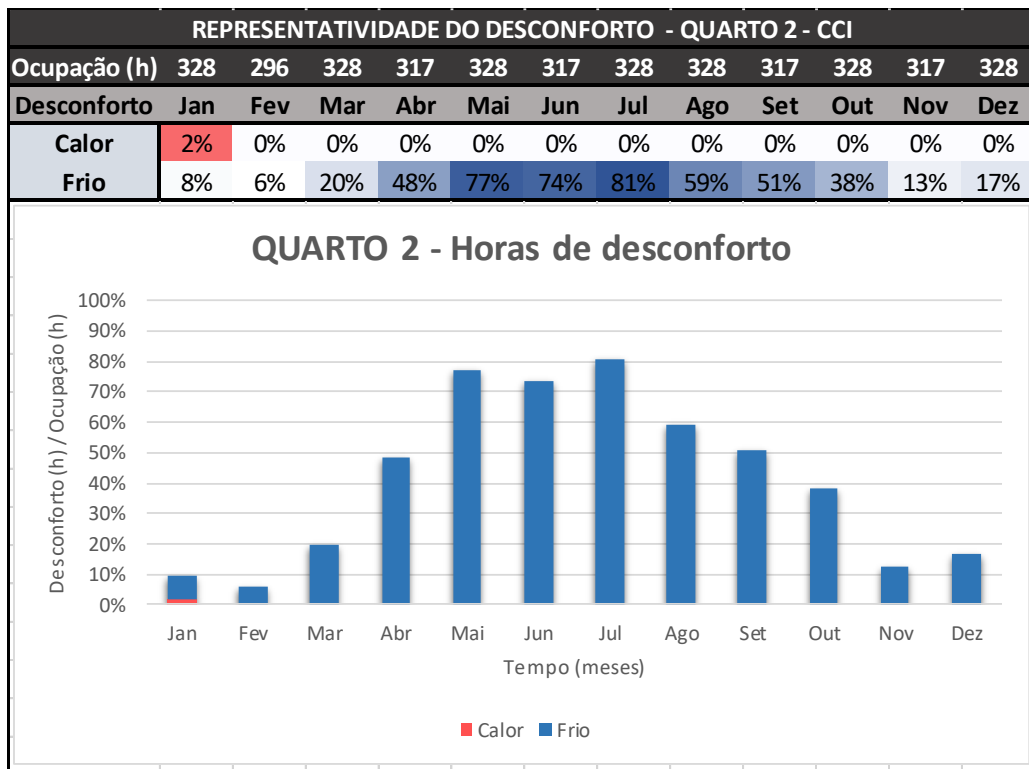
Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

Figura 32 - Frequência de Desconforto Térmico no ambiente “Quarto 1”



Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

Figura 33- Frequência de Desconforto Térmico no ambiente “Quarto 2”



Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

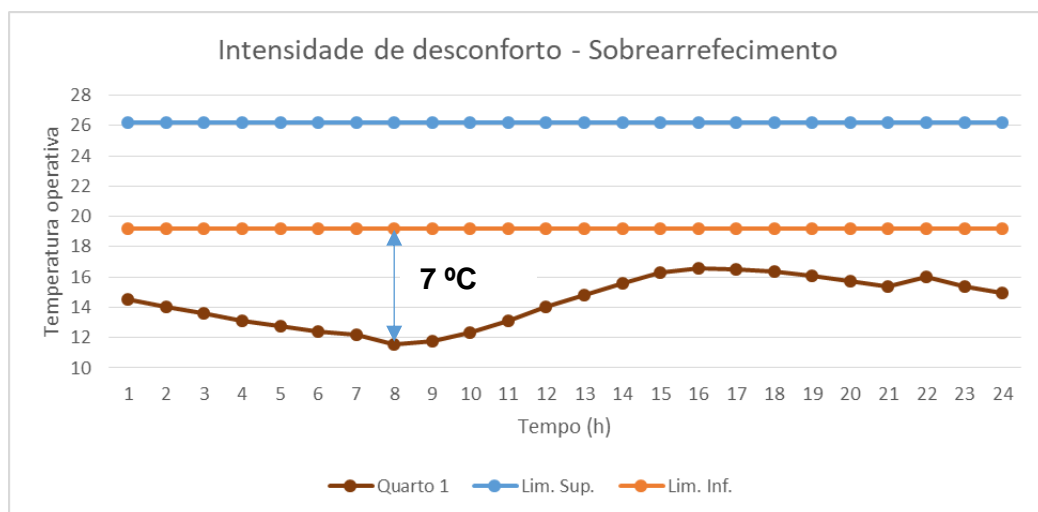
As figuras apresentadas demonstram, para alguns meses do ano, frequências de desconforto térmico extremamente elevadas. Para o ambiente “Sala de Estar”, no qual o desconforto por calor é mais presente do que o por frio, a frequência de desconforto experimentada pelos usuários da edificação chega a 40% dos períodos ocupados para os meses de janeiro e dezembro. Enquanto isso, no mês de julho, a frequência de desconforto térmico por frio ultrapassa 80% dos períodos ocupados nos quartos 1 e 2.

5.3.3. Intensidade do Desconforto Térmico (IDT)

Considerando os elevados valores obtidos para a frequência de desconforto dos usuários na edificação, optou-se por verificar, ainda para a condição crítica de inverno, a intensidade do desconforto térmico nos ambientes regularmente ocupados da residência. Essa avaliação foi feita através da identificação dos graus de sobreaquecimento e sobrearrefecimento, ou seja, a diferença entre as temperaturas operativas medidas e os limites da faixa de conforto, para os períodos ocupados de cada ambiente.

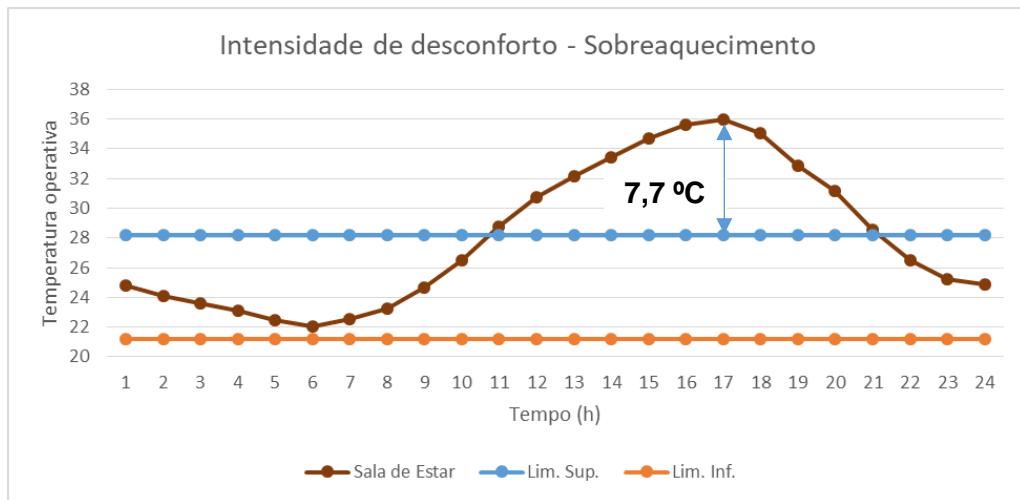
O maior grau de sobrearrefecimento foi medido para o dia vinte de maio, no quarto 1, com cerca de 7 graus abaixo do limite inferior da faixa de conforto adaptativo. O maior grau de sobreaquecimento, por sua vez, foi verificado no dia cinco de dezembro na sala de estar e também com cerca de 7,7 graus acima do limite superior da faixa de conforto. As figuras 34 e 35 ilustram o comportamento da temperatura operativa interna dos ambientes citados em comparação à faixa de conforto térmico.

Figura 34 - Intensidade máxima de desconforto por frio



Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

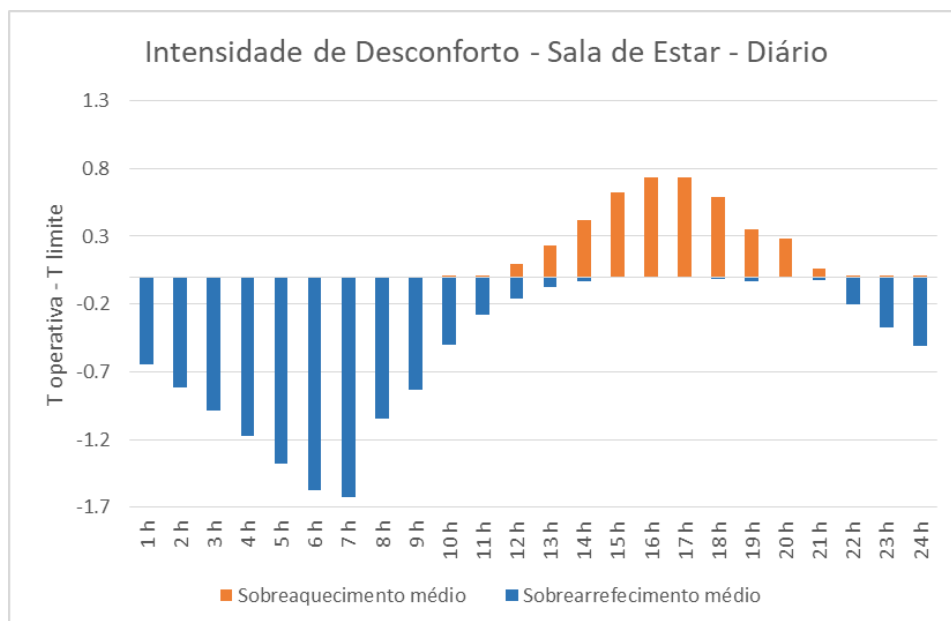
Figura 35 - Intensidade máxima do desconforto por calor



Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

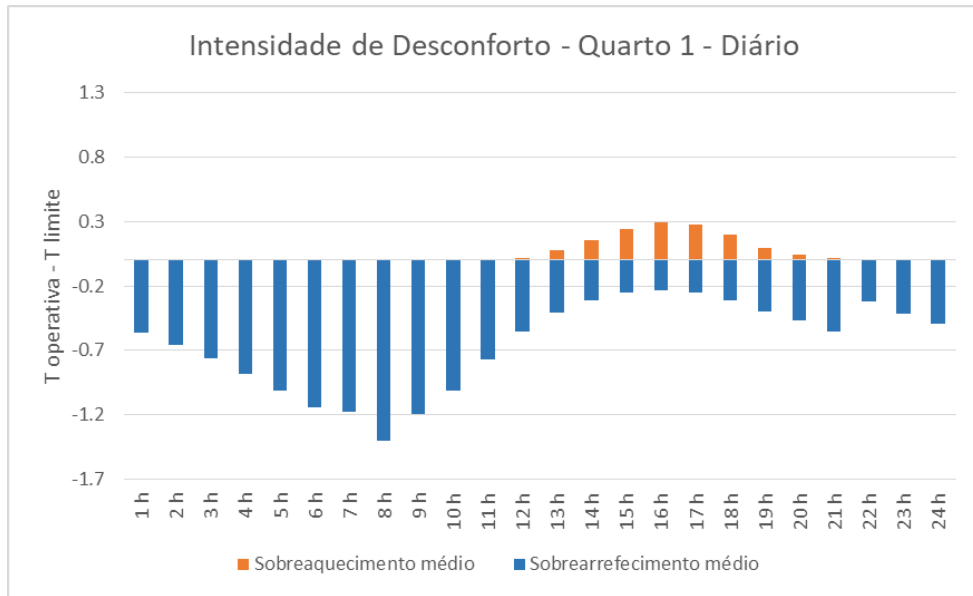
Além disso, foram verificadas também as intensidades médias de desconforto diário e mensal para cada uma das zonas. A partir dessa verificação foi possível identificar os horários de desconforto mais intenso em um dia bem como os meses com desconforto mais intenso. Os valores médios apresentados foram calculados a partir das temperaturas medidas ao longo de um ano inteiro. Os resultados da avaliação da IDT diário para a “Sala de Estar”, “Quarto 1” e “Quarto 2” são apresentados nas figuras 36, 37 e 38, enquanto os resultados mensais são demonstrados nas figuras e 39, 40 e 41.

Figura 36 - Intensidade de Desconforto Térmico diário médio – Sala de Estar



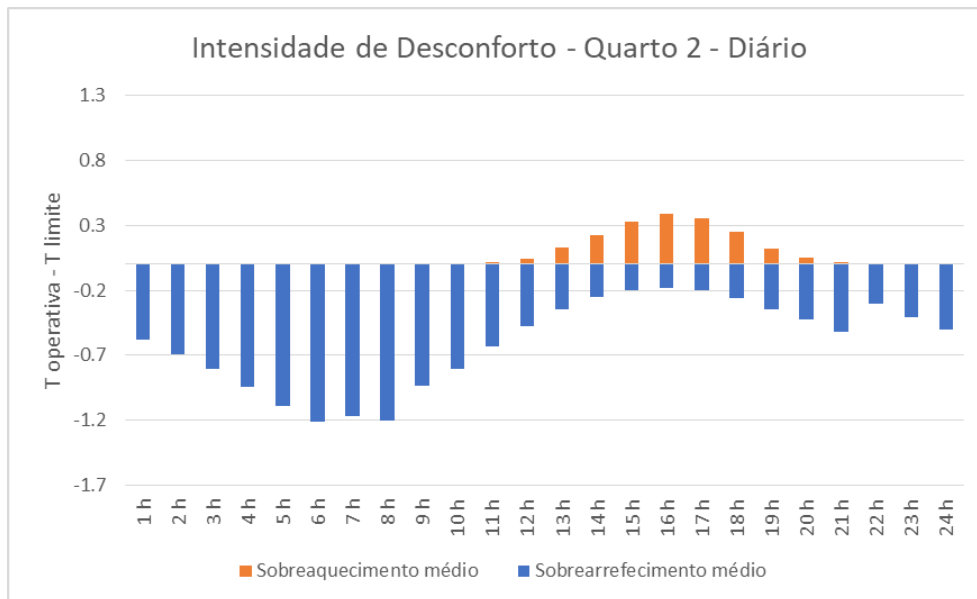
Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

Figura 37 - Intensidade de Desconforto Térmico – Diário – Quarto 1



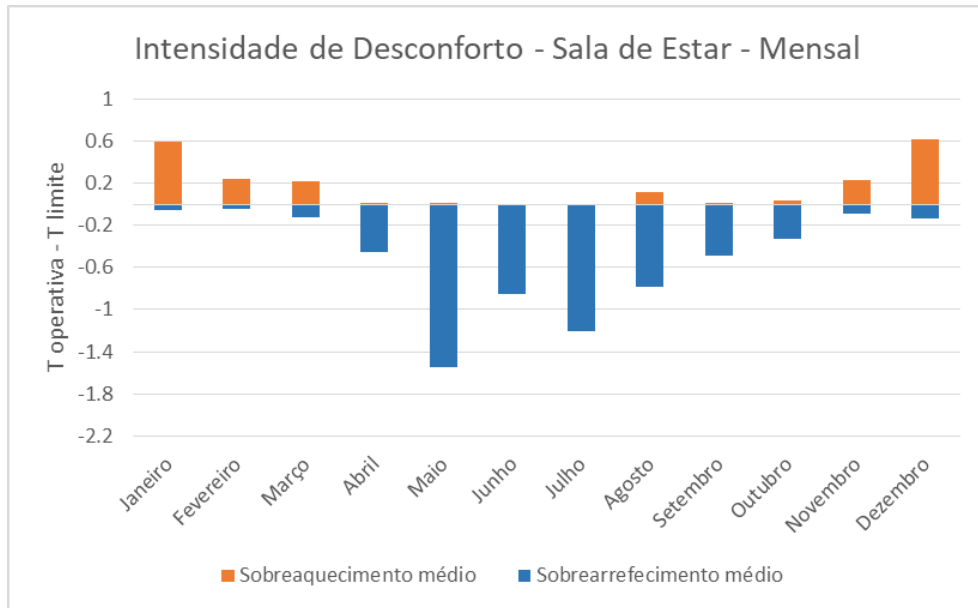
Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

Figura 38 - Intensidade de Desconforto Térmico diário médio – Quarto 2



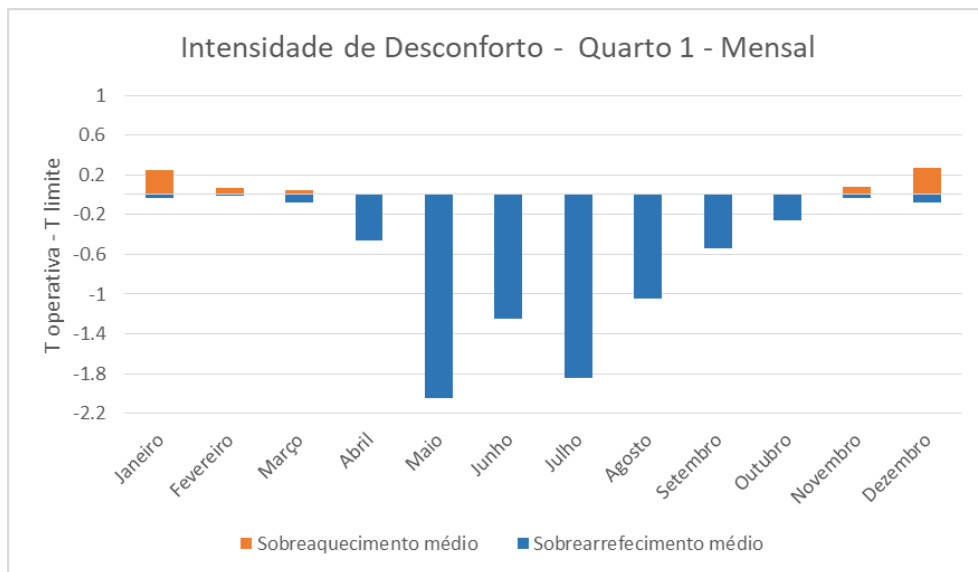
Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

Figura 39 - Intensidade de desconforto térmico mensal – Sala de Estar



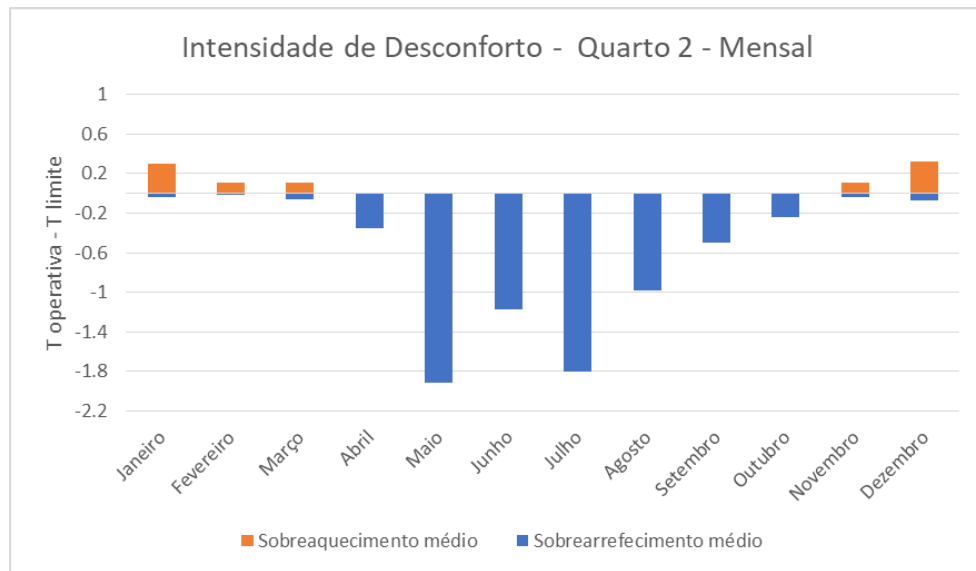
Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

Figura 40 - Intensidade do desconforto térmico mensal - Quarto 1



Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

Figura 41 - Intensidade do desconforto térmico mensal - quarto 2



Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

Os resultados apresentados demonstram intensidades de desconforto significativas tanto para a sala de estar quanto para os quartos 1 e 2. É interessante perceber, mais uma vez, a relevância dos períodos de desconforto por frio experimentados pelos usuários da edificação. Os resultados obtidos demonstram que além de mais frequentes do que os períodos de calor, os períodos de desconforto por frio são mais intensos na edificação estudada.

A análise da intensidade média de desconforto diário demonstrou o período das oito horas da manhã como o horário de desconforto mais intenso na edificação, com valores médios de sobreaquecimento acima de 1,5 graus. Já a avaliação da intensidade do desconforto médio mensal, por sua vez, evidenciou o mês de maio como o período de desconforto mais intenso no ano, com um valor médio de quase 2 graus de sobreaquecimento.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1. CONCLUSÕES

Este trabalho se propôs a analisar o nível de conforto térmico fornecido por uma residência cujo desempenho térmico estivesse em concordância com os requisitos apresentados pela NBR 15.575 (ABNT, 2013). Através de uma análise de verificação de concordância das temperaturas operativas internas da edificação com os limites de aceitabilidade para 80% dos ocupantes, foi possível identificar os períodos em que a edificação esteve fora dos limites de conforto sugeridos pelo modelo de conforto adaptativo, além da frequência de desconforto experimentada pelos usuários da edificação e a intensidade do desconforto nesses períodos.

A análise de conforto térmico segundo os critérios da normativa americana ASHRAE Standard 55 (2017) demonstrou uma falta de compatibilidade entre os critérios de desempenho apresentados pela norma brasileira NBR 15.575 (ABNT, 2013) e a real influência das variações de temperatura sobre os usuários de uma edificação.

Apesar de estar de acordo com as exigências da normativa brasileira, como demonstrado pela análise computacional realizada segundo os critérios da NBR 15575 (ABNT, 2013), a edificação adotada apresenta resultados insatisfatórios sob o ponto de vista de conforto térmico. Os limites de aceitabilidade para 80% dos ocupantes, estabelecidos pela metodologia adaptativa da ASHRAE 55 (2017), foram extrapolados em todos os ambientes analisados ao longo de todos os meses do ano. Os períodos de ocupação da edificação, pontos mais relevantes da análise, tendo em vista que o foco da residência deve ser sempre o bem-estar de seus ocupantes, chegaram a apresentar mais de 80% de frequência de desconforto térmico por frio nos meses de inverno e 40% de das horas ocupadas nos meses de verão com desconforto por calor.

Além da frequência de desconforto térmico muito além dos limites aceitáveis, a intensidade de desconforto térmico verificada também se mostrou relevante. Os dias mais críticos identificados apresentaram intensidades de desconforto por frio de mais de 7 graus de sobrearrefecimento e intensidades de desconforto por calor da mesma magnitude, com quase 8 graus de sobreaquecimento.

Apesar dos valores médios de sobreaquecimento e sobrearrefecimento encontrados parecerem baixos, chegando no máximo a 2 graus, é importante ressaltar que esses valores têm como base os limites finais de conforto térmico do modelo adaptativo e não as temperaturas de conforto do modelo. Tendo em vista que o método adaptativo é mais tolerante às variações de

temperatura externa e por isso apresenta temperaturas de conforto mais flexíveis e com maior amplitude do que outros métodos, mesmo sobreaquecimentos e sobrearrefecimentos de magnitude pequena podem se tornar relevantes no conforto experimentado pelos ocupantes da edificação.

A edificação utilizada como caso padrão neste trabalho foi escolhida a partir da verificação do estudo de Montes (2016), que identificou as tipologias mais frequentes de habitação de interesse social no país, bem como os materiais de construção mais utilizados na execução deste tipo de edificação. Dessa forma, é possível considerar que a análise de conforto térmico realizada para a residência adotada neste trabalho representa a realidade de conforto experimentada por grande parte dos usuários de edificações de interesse social pertencentes a este mesmo contexto.

O fato de a edificação em estudo ter sido considerada adequada sob os critérios da norma de desempenho brasileira demonstram a falta de conexão desta normativa com a realidade do comportamento térmico das edificações. A não consideração de fatores como a ocupação da edificação, equipamentos e cargas internas nas exigências para simulação termoenergética do edifício torna a análise pouco representativa das reais condições experimentadas pelos usuários ao longo do período de operação da edificação. Somado a isso, os limites de aceitabilidade da norma brasileira são extremamente simplificados e pouco rigorosos, permitindo, por exemplo, que uma edificação com temperaturas internas extremamente elevadas e sem condições de habitabilidade seja considerada adequada apenas por apresentar temperaturas internas mais baixas ou iguais às do ambiente externo.

Outro fator de grande influência nas condições de conforto térmico da edificação é a orientação. Os resultados obtidos para este trabalho demonstraram que, para edificações de tipologia semelhante à estudada e localizadas na cidade de Porto Alegre, os períodos de desconforto por frio são mais relevantes para o conforto térmico dos ocupantes do que os períodos de desconforto por calor. Dessa forma, a escolha da orientação e das soluções de otimização de conforto para edificações em Porto Alegre, cujas condições de ocupação se assemelhem às analisadas neste trabalho, devem priorizar estratégias que propiciem a melhoria das condições térmicas da edificação principalmente nos períodos de inverno. Um exemplo seria a utilização de vedações internas pesadas, que colaboram para a inércia térmica da edificação. Apesar de importantes, os períodos de desconforto por calor se mostraram menos frequentes e intensos do que os por frio. Entretanto, algumas estratégias simples, como a

utilização de dispositivos de sombreamento, poderiam ser utilizadas para diminuir os ganhos solares em ambientes de ocupação majoritariamente diurna, como a sala de estar.

A utilização de dispositivos de condicionamento artificial de ar poderia ser uma solução para a diminuição das horas de desconforto experimentadas pelos ocupantes da edificação. Entretanto, considerando a elevada quantidade de horas nas quais o equipamento de ar condicionado precisaria estar em funcionamento para conferir condições de conforto razoáveis aos ocupantes da edificação, o consumo energético e os custos decorrentes do uso deste tipo equipamento tornariam seu uso inviável, principalmente em um cenário de habitação de interesse social com rendas familiares abaixo de R\$ 1.800,00.

6.2. SUGESTÕES DE PESQUISA

Tendo em vista a relevância do tema abordado para a evolução da qualidade das edificações construídas no país e, conseqüentemente, da qualidade de vida das pessoas, é de suma importância que novas pesquisas sejam realizadas buscando identificar os fatores mais relevantes a serem considerados nas análises de conforto térmico. Dessa maneira, algumas sugestões de pesquisas futuras são apresentadas a seguir:

- a) Avaliação do consumo de energia e custos associados ao resfriamento e aquecimento de uma habitação de interesse social com a mesma tipologia utilizada neste estudo considerando o uso de equipamento de ar condicionado.
- b) Análise da influência do uso de dispositivos de sombreamento, massa térmica e outras estratégias passivas e de baixo custo para a otimização das condições de conforto em habitações de interesse social.
- c) Comparação do conforto térmico em residências de mesma tipologia com o uso de diferentes materiais na execução das paredes e cobertura da edificação.
- d) Verificação da influência de simplificações, como a desconsideração do caixilho das esquadrias nas aberturas, nos resultados obtidos através de simulações computacionais.

REFERÊNCIAS

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15.220-1**: desempenho térmico de edificações – parte 1: definição, símbolos e unidades. Rio de Janeiro, 2005a.
- _____. **NBR 15.220-2**: Desempenho Térmico De Edificações – Parte 2: métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro, 2005b.
- _____. **NBR 15.220-3**: Desempenho Térmico De Edificações – Parte 3: zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro, 2005c.
- _____. **NBR 16401-2**: Instalações de ar-condicionado - Sistemas centrais e unitários - Parte 2: Parâmetros de conforto térmico. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2008.
- _____. **NBR 15.575-1**: Edificações Habitacionais – Desempenho – Parte 1: requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2013a.
- _____. **NBR 15.575-4**: Edificações Habitacionais – Desempenho – Parte 4: sistemas de vedações verticais externas e internas. Rio de Janeiro, 2013b.
- _____. **NBR 15.575-5**: Edificações Habitacionais – Desempenho – Parte 5: sistemas de cobertura. Rio de Janeiro, 2013c.
- Agência IBGE Notícias. **Síntese de Indicadores Sociais: indicadores apontam aumento da pobreza entre 2016 e 2017**. Disponível em: <<https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de-noticias/releases/23298-sintese-de-indicadores-sociais-indicadores-apontam-aumento-da-pobreza-entre-2016-e-2017>>. Acesso em: 03 mai. 2019.
- ANDRADE, A. C. C. DE; GOMES, C. F. S. **O conceito de desempenho de edificações e a sua importância para o setor da construção civil no Brasil**. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Programa de Pós-Graduação em Construção Civil e Urbana, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.
- ASHRAE - AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS, INC. **Standard 55: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy**. Atlanta, 2017.
- ASHRAE - AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS, INC. **1282-RP: Lighting Heat Gain Distribution in Buildings**. Daniel E. Fisher and Chanvit, 2006.
- BLACHERE, G. Savoir bâtir, Paris, Eyrolles, 1974 apud Jean-Luc CHEVALIER (a), Julien HANS (a). Performance Based Approach French State of Art, 2003. 343
- CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO. Desempenho de edificações habitacionais: guia orientativo para atendimento à norma ABNT NBR 15.575/2013. Fortaleza: Gadioli Cipolla Comunicação, 2013.

CORBELLA, O.; YANNAS, S. **Em busca de uma arquitetura sustentável para os trópicos: conforto ambiental**. 2ed. Rio de Janeiro: Revan, 2010.

FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. R. **Manual de conforto térmico**. São Paulo: Studio Nobel, 2001.

GRAF, H. F. **Transmitância Térmica & Energia Incorporada na Arquitetura: sua relação nas superfícies do invólucro de uma edificação residencial unifamiliar conforme a norma NBR 12.721**. 2011. 167 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

ISO Standard 7730. **Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria**, Geneva International Standards Institution, 2005.

KINSEL, L. S. **Avaliação do Conforto e da Energia em Edifícios Residenciais em Porto Alegre**. 2009. 212 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) – Programa de Pesquisa e Pós-Graduação em Arquitetura, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009

LAMBERTS, R.; DUARTE, V. C. P. **Desempenho Térmico de Edificações**. 7.ed. Florianópolis: UFSC/LabEEE, 2016.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F.O.R.. **Eficiência Energética na Arquitetura**. 3. Ed. Rio de Janeiro, 2014.

MENDES, N.; WESTPHAL, F. S.; LAMBERTS, R.; CUNHA NETO, J. A. **Uso de instrumentos computacionais para análise do desempenho térmico e energético de edificações no Brasil**. Ambiente Construído, v. 5, n. Porto Alegre, 2005.

MILAN, V. B. **Desempenho Térmico: análise de uma edificação escolar padrão próinfância instalada no município de Camaquã**. 2015. 108 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

MORISHITA, Claudia; SORGATO, Marcio J.; VERSAGE, Rogério; TRIANA, Maria A.; MARINOSKI, Deivis L.; LAMBERTS, Roberto. **Catálogo de propriedades térmicas de paredes e coberturas (v. 4)**. Florianópolis: Laboratório de Eficiência Energética em Edificações - Universidade Federal de Santa Catarina, 2010.

O Estado de S. Paulo. **Déficit Habitacional É Recorde No País**. Disponível em: <<https://economia.estadao.com.br/noticias/geral,deficit-habitacional-e-recorde-no-pais,70002669433>>. Acesso em: 03 mai. 2019.

OKAMOTO, Patricia Seiko. **Os impactos da norma brasileira de desempenho sobre o processo de projeto de edificações residenciais**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) - Escola Politécnica, University of São Paulo, São Paulo, 2015. doi:10.11606/D.3.2016.tde-19072016-083350. Acesso em: 2019-12-13.

ONU. **Declaração Universal dos Direitos Humanos**. 1948. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/wp-content/uploads/2018/10/DUDH.pdf>>. Acesso em: 03 mai. 2019.

ORDENES, M. et al. **Metodologia utilizada na elaboração da biblioteca de materiais e componentes construtivos brasileiros para simulações no visualdoe-3**. LabEEE, UFSC. Florianópolis. Disponível em: <http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/publicacoes/relatorios_pesquisa/RP_Biblioteca_Materiais_VisualDOE.pdf>. 2003.

SICURELLA, F.; EVOLA, G.; WURTZ, E. **A statistical approach for the evaluation of thermal and visual comfort in free-running buildings**. Energy and Buildings, v. 47, p. 402-410, 2012.

SILVEIRA, F. M. **Análise do desempenho térmico de edificações residenciais ventiladas naturalmente**: NBR 15575 e ASHRAE 55. Universidade Estadual de Campinas, 2014.

**APÊNDICE A – MEMÓRIA DE CÁLCULO PARA O PROCEDIMENTO
SIMPLIFICADO DA NBR 15.575**

- 1) Cálculo da transmitância térmica da cobertura. Cobertura composta por telha cerâmica ($\alpha=0,75$), estrutura em madeira, camada de ar não ventilada e forro de PVC.

Tabela A. 1- Critérios de coberturas quanto à transmitância térmica

Transmitância térmica (U)				
W/m ² K				
Zonas 1 e 2	Zonas 3 a 6		Zonas 7 e 8	
$U \leq 2,30$	$\alpha \leq 0,6$	$\alpha > 0,6$	$\alpha \leq 0,4$	$\alpha > 0,4$
	$U \leq 2,3$	$U \leq 1,5$	$U \leq 2,3 FV$	$U \leq 1,5 FV$

α é absorvância à radiação solar da superfície externa da cobertura.
 NOTA O fator de ventilação (FV) é estabelecido na ABNT NBR 15220-2.

Fonte: NBR 15.575 (ABNT, 2013)

Obs: O método simplificado da NBR 15.575 considera a avaliação da cobertura apenas para fluxo térmico descendente (caso de verão).

Condutividade térmica dos materiais da cobertura

Tabela A. 2 - Propriedades dos materiais adotados para cobertura

Materiais	λ [W/m.K]
Telha cerâmica	0,9
PVC	0,2

Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

Resistência Térmica da Telha cerâmica:

$$R_t = \frac{e_{telha}}{\lambda_{cerâmica}}$$

$$R_t = \frac{0,01}{1,05} = 0,0095 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

Resistência Térmica do Forro de PVC:

$$R_f = \frac{e_{forro}}{\lambda_{pvc}}$$

$$R_t = \frac{0,01}{0,2} = 0,05 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

Resistência do Ar:

$$R_{ar_{verão}} = 0,21$$

Cálculo da Resistência Térmica Total:

$$R_{T_{ver\tilde{a}o}} = R_{SE} + R_{telha} + R_{ar_{ver\tilde{a}o}} + R_{forro} + R_{SI}$$

$$R_{T_{ver\tilde{a}o}} = 0,04 + 0,011 + 0,21 + 0,05 + 0,17 = 0,4795 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$$

Cálculo da Transmitância Térmica Total:

$$U_{ver\tilde{a}o} = \frac{1}{R_{T_{ver\tilde{a}o}}}$$

$$U_{ver\tilde{a}o} = \frac{1}{0,4795} = 2,08 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} < 1,5 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \text{ (N\tilde{A}O OK)}$$

- 2) Cálculo da transmitância e capacidade térmica das paredes externas. Paredes compostas por duas camadas de revestimento argamassado e uma camada de bloco cerâmico com camadas de ar não ventiladas. Considerou-se a parede pintada na cor branca ($\alpha=0,2$).

Critérios de Avaliação da NBR 15.575:

Tabela A. 3 - Transmitância térmica de paredes externas

Transmitância Térmica U		
W/m ² .K		
Zonas 1 e 2	Zonas 3, 4, 5, 6, 7 e 8	
U ≤ 2,5	$\alpha^a \leq 0,6$	$\alpha^a > 0,6$
	U ≤ 3,7	U ≤ 2,5

^a α é absorvância à radiação solar da superfície externa da parede.

Fonte: NBR 15.575 (ABNT, 2013)

Tabela A. 4 - Capacidade térmica das paredes externas

Capacidade térmica (CT)	
kJ / m ² .K	
Zona 8	Zonas 1,2, 3, 4, 5, 6 e 7
Sem exigência	≥ 130

Fonte: NBR 15.575 (ABNT, 2013)

Condutividade térmica dos materiais das paredes externas:

Tabela A. 5 - Condutividade térmica dos materiais adotados para as paredes externas

Materiais	λ [W/m.K]
Argamassa comum	1.15
Cerâmica	0.9

Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

Para o cálculo dos valores de transmitância e capacidade térmica, a estrutura da parede foi dividida em 3 camadas, tendo em vista sua configuração não homogênea.

Camada A: 2 cm de revestimento argamassado + 9 cm de cerâmica + 2 cm de revestimento argamassado

Camada B: 2cm de revestimento argamassado + 9 cm de argamassa de assentamento + 2cm de revestimento argamassado

Camada C: 2cm de revestimento argamassado + 0,7 cm de cerâmica + ar + 0,7 cm de cerâmica + ar + 0,7 cm de cerâmica + 2 cm de revestimento argamassado

Cálculo da Resistência Térmica das Camadas:

Camada A:

$$R_A = \frac{e_{reboco}}{\lambda_{reboco}} + \frac{e_{argamassa}}{\lambda_{argamassa}} + \frac{e_{reboco}}{\lambda_{reboco}}$$

$$R_A = \frac{0,02}{1,15} + \frac{0,09}{1,15} + \frac{0,02}{1,15} = 0,113 \frac{m^2 \cdot K}{W}$$

Camada B:

$$R_B = \frac{e_{reboco}}{\lambda_{reboco}} + \frac{e_{cerâmica}}{\lambda_{cerâmica}} + \frac{e_{reboco}}{\lambda_{reboco}}$$

$$R_B = \frac{0,02}{1,15} + \frac{0,09}{0,9} + \frac{0,02}{1,15} = 0,135 \frac{m^2 \cdot K}{W}$$

Camada C:

$$R_C = \frac{e_{reboco}}{\lambda_{reboco}} + \frac{e_{cerâmica}}{\lambda_{cerâmica}} + R_{ar} + \frac{e_{cerâmica}}{\lambda_{cerâmica}} + R_{ar} + \frac{e_{cerâmica}}{\lambda_{cerâmica}} + \frac{e_{reboco}}{\lambda_{reboco}}$$

$$R_C = \frac{0,02}{1,15} + \frac{0,007}{0,9} + 0,16 + \frac{0,007}{0,9} + 0,16 + \frac{0,007}{0,9} + \frac{0,02}{1,15} = 0,378 \frac{m^2 \cdot K}{W}$$

Cálculo do componente (parede) considerando que o bloco tem largura de 19cm.

$$R_p = \frac{A_A + 4A_B + 3A_C}{\frac{A_A}{R_A} + \frac{4A_B}{R_B} + \frac{3A_C}{R_C}}$$

Onde:

$$A_A = 0,01 * 0,19 + 0,01 * 0,15 = 0,0034$$

$$A_B = 0,007 * 0,19 = 0,0013$$

$$A_C = 0,037 * 0,19 = 0,0071$$

$$R_p = \frac{0,0034 + 4 * 0,0013 + 3 * 0,0071}{\frac{0,0034}{0,113} + \frac{4 * 0,0013}{0,135} + \frac{3 * 0,0071}{0,378}} = 0,239 \frac{m^2 \cdot K}{W}$$

Resistência térmica total:

$$R_T = R_{SE} + R_p + R_{SI}$$

$$R_T = 0,04 + 0,239 + 0,13 = 0,409 \frac{m^2 \cdot K}{W}$$

Transmitância Térmica

$$U_{parede} = \frac{1}{R_T}$$

$$U_{parede} = \frac{1}{0,409} = 2,45 \frac{W}{m^2 \cdot K} < 3,7 \frac{W}{m^2 \cdot K} \text{ (OK)}$$

Cálculo da Capacidade Térmica das paredes externas:

Tabela A. 6 - Propriedades térmicas dos materiais adotados para as paredes externas

Materiais	c [kJ/kg.K]	ρ [kg/m³]
Argamassa comum	1	2000
Cerâmica	0,92	1600

Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

Camada A:

$$C_{T_A} = \sum(e * c * \rho)_{reboco}$$

$$C_{T_A} = (0,13 * 1 * 2000) = 260 \frac{kJ}{m^2.K}$$

Camada B:

$$C_{T_B} = (0,04 * 1 * 2000) + (0,09 * 0,92 * 1600) = 212,48 \frac{kJ}{m^2.K}$$

Camada C:

$$C_{T_C} = (0,04 * 1 * 2000) + (0,021 * 0,92 * 1600) = 110,91 \frac{kJ}{m^2.K}$$

Cálculo da capacidade térmica do componente (parede):

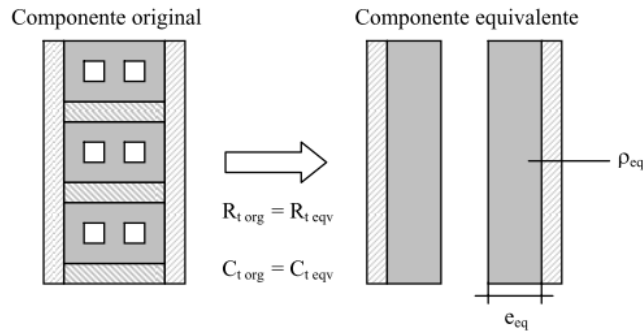
$$C_T = \frac{A_A + 4A_B + 3A_C}{\frac{A_A}{C_{T_A}} + \frac{4A_B}{C_{T_B}} + \frac{3A_C}{C_{T_C}}}$$

$$C_T = \frac{0,0034 + 4 * 0,0013 + 3 * 0,0071}{\frac{0,0034}{260} + \frac{4 * 0,0013}{212,48} + \frac{3 * 0,0071}{110,91}} = 130,22 \frac{kJ}{m^2.K} > 130 \frac{kJ}{m^2.K} (OK)$$

**APÊNDICE B – MEMÓRIA DE CÁLCULO PARA O DESENVOLVIMENTO DE
COMPONENTES EQUIVALENTES SEGUNDO METODOLOGIA APRESENTADA
POR ORDENES ET AL. (2003)**

- 1) Cálculo do componente equivalente à parede de alvenaria em tijolos furados com $U = 2,48 \text{ W/m}^2$ e $C_t = 125,5 \text{ kJ/m}^2 \cdot \text{K}$ para uso no programa de simulação termo energética.

Figura B. 1 - Equivalência de componentes construtivos para simulação computacional



Fonte: Ordenes et al. (2003)

Cálculo da espessura (e_{eq}) para as camadas de cerâmica do elemento equivalente:

$$R_{orig.}^* = R_{eq} = 0,239 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

$$R_{eq} = 2 * \frac{e_{reboco}}{\lambda_{argamassa}} + 2 * \frac{e_{eq}}{\lambda_{cerâmica}} + R_{ar}$$

$$0,239 = 2 * \frac{0,02}{1,15} + 2 * \frac{e_{eq}}{0,9} + 0,16$$

$$e_{eq} = 0,02 \text{ m}$$

* A $R_{orig.}$ apresentada representa apenas a resistência térmica dos elementos constituintes do tijolo furado, desprezando as resistências superficiais externa e interna.

Cálculo da densidade de massa aparente equivalente (ρ_{eq}) para as camadas de cerâmica do elemento equivalente:

$$C_T = C_{T_{eq}} = 130,22 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

$$C_{T_{eq}} = 2 * e_{reb} * c_{reb} * \rho_{reb} + 2 * e_{eq} * c_{cerâmica} * \rho_{eq}$$

$$130,22 = 2 * 0,02 * 1 * 2000 + 2 * 0,02 * 0,92 * \rho_{eq}$$

$$\rho_{eq} = \frac{130,22 - 2 * 0,02 * 1 * 2000}{2 * 0,02 * 0,92}$$

$$e_{eq} = 1364,67 \frac{kg}{m^3}$$