

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO



# O IMPACTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO DESEMPENHO TÉRMICO DE EDIFÍCIOS RESIDENCIAIS DO DISTRITO FEDERAL EM CENÁRIOS FUTUROS

**Autora: Luísa Coutinho Puntel**

Orientador: Caio Frederico e Silva

Área de concentração: Tecnologia, Ambiente e Sustentabilidade (TAS)

Linha de pesquisa: Sustentabilidade, Qualidade e Eficiência do Ambiente Construído.

Brasília, agosto 2024

Universidade de Brasília – UnB

Faculdade de Arquitetura e Urbanismo – FAU

Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo – PPG/FAU

**O IMPACTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO DESEMPENHO TÉRMICO  
DE EDIFÍCIOS RESIDENCIAIS DO DISTRITO FEDERAL EM CENÁRIOS FUTUROS**

**THE IMPACT OF CLIMATE CHANGE ON THERMAL PERFORMANCE OF  
RESIDENTIAL BUILDINGS IN THE FEDERAL DISTRICT IN FUTURE SCENARIOS**

**Luísa Coutinho Puntel**

Dissertação de mestrado

Brasília, agosto de 2024

**Luísa Coutinho Puntel**

**O IMPACTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO DESEMPENHO TÉRMICO  
DE EDIFÍCIOS RESIDENCIAIS DO DISTRITO FEDERAL EM CENÁRIOS FUTUROS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Arquitetura e Urbanismo.

Orientador: Prof. Dr. Caio Frederico e Silva

Banca Examinadora:

---

Prof. Dr. Caio Frederico e Silva (1º membro – presidente)  
Universidade de Brasília

---

Prof. Dra. Vanda Alice Garcia Zanoni (2º membro)  
Universidade de Brasília

---

Prof. Dr. Marcio Sorgato (3º membro)  
Universidade Federal do Paraná - UFPR

---

Prof. Dr. Joára Cronemberger (4º membro - suplente)  
Universidade de Brasília

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

PUNTEL, L. C. (2024). **O impacto das mudanças climáticas no desempenho térmico de edifícios residenciais do DF**. Dissertação de Mestrado em Arquitetura e Urbanismo. Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 95p.

## CESSÃO DE DIREITOS

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização do autor.

---

Luísa Coutinho Puntel  
SQN 116, Bloco A, Apto. 410  
CEP: 70.773-010, Brasília-DF – Brasil  
e-mail: [luisapuntel@gmail.com](mailto:luisapuntel@gmail.com)

“Quem me dera ao menos uma vez  
que o mais simples fosse visto como o mais importante.  
Mas nos deram espelhos e vimos um mundo doente.”  
Renato Russo, 1986 - Índios

## AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu eterno orientador, Caio Silva, que me acompanha desde a graduação, pela competência e paciência que foram essenciais para este trabalho.

Ao meu marido, Guilherme Sampaio, que me apoiou em todos os momentos desde que decidi iniciar o mestrado. Obrigada por vibrar comigo nos momentos de euforia, mas principalmente por me acolher nos momentos de exaustão e fazer de tudo para que eu pudesse me dedicar ao máximo à pesquisa.

Aos meus pais, Simone Coutinho e Ricardo Puntel, que colocaram a educação como um dos pilares mais preciosos da minha criação. As minhas conquistas são deles também, que me trouxeram até aqui.

Aos meus colegas de curso, que estiveram ao meu lado compartilhando conhecimento, experiências e desafios, deixo meu sincero agradecimento.

À minha sócia, Isabella Botelho, por suprir meus momentos de ausência na empresa e por ser essa “máquina do saber” capaz de sanar incontáveis dúvidas e me direcionar no caminho certo sempre que precisei.

Ao Matheus Bracht e à equipe do LabEEE da UFSC, que disponibilizaram os arquivos climáticos futuros antes mesmo da publicação para que eu pudesse utilizá-los.

Agradeço também pelo apoio financeiro à realização desta pesquisa. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Por fim, agradeço ao apoio da minha família e amigos, que me ouviram falar incessantemente sobre mudanças climáticas ou simulações computacionais de edifícios, e me supriram de incentivos em momentos difíceis.

A todos vocês, meu mais sincero obrigada por fazerem parte desta conquista e por tornarem esta jornada mais significativa e enriquecedora.

## RESUMO

Vivemos o contexto das alterações climáticas em que climatologistas indicam que o aumento de temperatura resultará em consequências catastróficas de fenômenos extremos. Neste contexto, o uso de simulações termoenergéticas enquanto ferramentas auxiliares no processo projetual permitem a obtenção de estimativa de conforto térmico e de consumo energético o que possibilita testar estratégias de melhorias antes mesmo da construção, ou em cenários hipotéticos e futuros. Assim, esta pesquisa tem o objetivo de avaliar o impacto das mudanças climáticas no desempenho térmico de edifícios residenciais em cenários futuros para o clima atual, clima futuro a curto prazo (2050) e clima futuro a longo prazo (2090). Além disso, foram testadas diferentes variáveis de projeto para compreender quais seriam as combinações mais adequadas para os cenários climáticos avaliados no contexto climático do Distrito Federal (DF). Busca-se comparar temperaturas de ambientes internos considerando o contexto do aquecimento global e quantificar o aumento na carga térmica dos edifícios residenciais como previsão e alerta relativo ao aumento de consumo energético por equipamentos condicionadores de ar. Para tal, foi desenvolvida a modelagem e simulação termoenergética de um edifício residencial representativo de alto padrão localizado no DF utilizando a metodologia de estimativa de desempenho térmico estabelecida pela NBR 15575. Para as simulações, foi utilizado o software DesigBuider (versão 7.0.2.006) e foram utilizados arquivos climáticos futuros (HadGEM2, regcm, RCP 8.5) considerando o pior cenário preditivo para Brasília. As simulações consideraram a condição de ventilação natural e a condição de climatização artificial. Os resultados demonstraram que o percentual de horas dentro de uma faixa de temperatura operativa considerada como aceitável (PHFT) reduzirá de forma expressiva no futuro. Este indicador apresentou queda de 51% para 2050 e 87% para 2090 em relação ao valor estimado para o clima atual. A carga térmica prevista será quase 5 vezes maior em 2050 e quase 8 vezes maior em 2090 quando comparada com o mesmo indicador no clima atual para o objeto de estudo em questão. Ao testar diferentes combinações de variáveis bioclimáticas, identificou-se que os cenários mais efetivos consideram vidro mais eficiente, aberturas menores, uso de venezianas e paredes externas em blocos cerâmicos para modelos ventilados ou paredes mais isoladas para modelos não ventilados naturalmente. Os resultados de modelos propostos com as variáveis projetuais mais adequadas para cada caso geraram aumento relevante no PHFT do clima atual, alcançando valor de 97,79% e indicando alto nível de conforto sem o uso de ar-condicionado. Em relação aos cenários climáticos futuros, pondera-se que as estratégias bioclimáticas não foram suficientes para estabelecer o conforto mesmo provocando aumento do PHFT. Em 2050 este critério alcançou 49,94%, e em 2090 apenas 11,48%, o que demonstra a necessidade de uso de estratégias ativas para alcançar o conforto. Em relação à carga térmica, o modelo proposto se mostrou muito eficiente e indicou reduções de 94% para o clima atual, 56% para 2050 e 62% para 2090 em relação aos modelos originais. Por fim, o trabalho traz um alerta para que a construção civil repense as técnicas e estratégias implementadas atualmente visando o bem estar dos moradores em longo prazo.

**Palavras-chave:** aquecimento global, BEM – Building Energy Model, estratégias passivas de conforto térmico, adaptação climática.

## ABSTRACT

*We live in the context of climate change in which climatologists indicate that the increase in temperature will result in catastrophic consequences of extreme phenomena. In this context, the use of thermoenergetic simulations as auxiliary tools in the design process allow obtaining estimates of thermal comfort and energy consumption, which makes it possible to test improvement strategies even before construction, or in hypothetical and future scenarios. Therefore, this research aims to evaluate the impact of climate change on the thermal performance of residential buildings in future scenarios for the current climate, short-term future climate (2050) and long-term future climate (2090). Furthermore, different project variables were tested to understand which would be the most appropriate combinations for the climate scenarios evaluated in the climate context of the Federal District (DF). The aim is to compare temperatures in indoor environments considering the context of global warming and quantify the increase in the thermal load of residential buildings as a prediction and warning regarding the increase in energy consumption by air conditioning equipment. To this end, thermoenergetic modeling and simulation of a representative high-end residential building located in DF was developed using the thermal performance estimation methodology established by NBR 15575. For the simulations, the DesigBuider software (version 7.0.2.006) and future climate files (HadGEM2, regcm, RCP 8.5) were used considering the worst predictive scenario for Brasília. The simulations considered the natural ventilation condition and the artificial air conditioning condition. The results demonstrated that the percentage of hours within an operating temperature range considered acceptable (PHFT) will reduce significantly in the future. This indicator showed a drop of 51% for 2050 and 87% for 2090 in relation to the estimated value for the current climate. The predicted thermal load will be almost 5 times greater in 2050 and almost 8 times greater in 2090 when compared to the same indicator in the current climate for the study object in question. When testing different combinations of bioclimatic variables, it was identified that the most effective scenarios consider more efficient glass, smaller openings, use of shutters and external walls in ceramic blocks for ventilated models or more insulated walls for non-naturally ventilated models. The results of proposed models with the most appropriate design variables for each case generated a relevant increase in the PHFT in the current climate, reaching a value of 97.79% and indicating a high level of comfort without the use of air conditioning. In relation to future climate scenarios, it is considered that bioclimatic strategies were not sufficient to establish comfort even though they caused an increase in PHFT. In 2050 this criterion reached 49.94%, and in 2090 only 11.48%, which demonstrates the need to use active strategies to achieve comfort. In relation to thermal load, the proposed model proved to be very efficient and indicated reductions of 94% for the current climate, 56% for 2050 and 62% for 2090 in relation to the original models. Finally, the work brings a warning to civil construction to rethink the techniques and strategies currently implemented with a view to the well-being of residents in the long term.*

**Keywords:** global warming, BEM, thermal performance, climate adaptation.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Linha do tempo da evolução de estratégias de eficiência energética em edifícios no Brasil .....	34
Figura 2- Mapa Brasil e DF com localização Noroeste .....	40
Figura 3 - Perímetro tombado de Brasília .....	41
Figura 4 - Foto de edifícios residenciais no Setor Noroeste .....	42
Figura 5- Carta solar de Brasília .....	45
Figura 6- Publicações de artigos por países.....	55
Figura 7- Projeções de mudança máxima de temperatura (°C) considerando o cenário de aquecimento global pessimista de 4°C.....	57
Figura 8- Autores com mais publicações de artigos .....	58
Figura 9- Palavras-chave mais recorrentes em arquivos.....	59
Figura 10- Zonas climáticas do mundo .....	61
Figura 11- Dias por ano em que as condições combinadas de temperatura e umidade representam um risco de mortalidade para os indivíduos .....	63
Figura 12- Histórico de emissões de GEE por principais causadores demonstrando aumento elevado desde a década de 1950 .....	74
Figura 13- Relação entre as emissões cumulativas de CO2 e o aumento da temperatura global da superfície .....	75
Figura 14- Projeção de emissões de GEE futuras para evitar o aumento de temperatura acima de 1,5°C e 2°C.....	77
Figura 15 – Organograma método.....	81
Figura 16 - Imagem aérea Setor Noroeste .....	82
Figura 17- Planta Setor Noroeste com divisão entre as duas etapas de construção .....	83
Figura 18- Locação do edifício em relação ao entorno .....	85
Figura 19 - Cortes edifício analisado .....	86
Figura 20- Pavimento tipo: apartamentos de canto em azul e de centro em verde .....	87

Figura 21 - Percurso solar sobre o edifício avaliado. Imagem à esquerda representando fachada Norte com radiação solar direta durante o inverno. Imagem à direita representando fachada Norte sombreada durante o verão. ....	88
Figura 22 - Cronograma de ocupação de dormitórios modelados .....	96
Figura 23 - Cronograma de ocupação de salas de estar modeladas .....	96
Figura 24 - Configurações gerais de ganhos térmicos .....	97
Figura 25 - Configuração de taxa metabólica por pessoa em dormitórios .....	97
Figura 26 - Configuração de taxa metabólica por pessoa em sala de estar .....	97
Figura 27 - Configuração de número de pessoas e fração latente por dormitório .....	97
Figura 28 - Configuração de número de pessoas e fração latente por dormitório .....	97
Figura 29 - Configurações de iluminação artificial para dormitórios e salas de estar modelados.....	98
Figura 30 - Configurações de equipamentos de salas de estar modelados .....	98
Figura 31 - Cronograma de iluminação de dormitórios modelados .....	98
Figura 32 - Cronograma de iluminação de dormitórios modelados .....	98
Figura 33 - Cronograma de equipamentos de salas de estar modeladas .....	99
Figura 34 –Edifício modelado em <i>software</i> DesignBuilder, fachadas Sul e Oeste ilustradas .....	100
Figura 35 - Edifício modelado em <i>software</i> DesignBuilder, fachadas Norte e Oeste ilustradas .....	100
Figura 36 - UH de centro avaliada .....	101
Figura 37 - Planta de UH de centro avaliada .....	102
Figura 38 - Configurações de paredes.....	105
Figura 39 - Configuração de lajes entrespisos .....	106
Figura 40 - Configurações de vidros.....	106
Figura 41 - Configurações de portas .....	107
Figura 42 - Configurações de fenestrações de portas e janelas .....	107
Figura 43 – Configuração de ventilação natural .....	108
Figura 44 - Configuração de ar-condicionado e aquecedores .....	109

Figura 45 - Zona de conforto para edifícios naturalmente ventilados da ASHRAE 55 .....	116
Figura 46 - Configuração de objetivo de conforto térmico da ferramenta de otimização para o modelo ventilado naturalmente .....	117
Figura 47 - Configuração de objetivo de carga térmica da ferramenta de otimização para o modelo sem ventilação natural.....	117
Figura 48 -Modelo Simplificado para simulações simultâneas de variáveis .....	118
Figura 49 - Configuração de todas as variáveis.....	118
Figura 50 - Configuração variável janelas – dimensões de aberturas (WWR)...	118
Figura 51 - Configuração variável sombreamento venezianas .....	119
Figura 52 - Configuração variável paredes externas .....	120
Figura 53 - Configuração variável tipo de vidro .....	120
Figura 54- Temperatura de bulbo seco nos cenários de clima atual, em 2050 e em 2090 .....	123
Figura 55 – Carta bioclimática das normais climatológicas da ZB4 .....	125
Figura 56– Carta bioclimática das normais climatológicas da ZB7 .....	125
Figura 57 – UH avaliada com APPs destaque em APPs de To máxima mais elevadas e suas aberturas .....	133

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Consumo de energia elétrica por setores no Brasil.....	37
Gráfico 2 - Consumo de energia em residências no Brasil.....	38
Gráfico 3 - Participação das fontes energéticas nas residências.....	38
Gráfico 4- Previsão de consumo de ar-condicionado em residências no Brasil. .	39
Gráfico 5- Quantidades de artigos encontrados por plataformas de busca .....	54
Gráfico 6- Quantidade de publicações por ano.....	55
Gráfico 7- Quantidade de artigos de acordo com desenvolvimento de países ....	57
Gráfico 8- Tipos de estudo de artigos publicados. ....	60
Gráfico 9- Tipologia do objeto de estudo .....	60
Gráfico 10- Softwares utilizados em artigos.....	61
Gráfico 11- Quantidades de artigos por zonas climáticas no mundo .....	62
Gráfico 12 - Média anual das temperaturas operativas dos modelos MB.VN.2010, MB.VN.2050 e MB.VN.2090.....	127
Gráfico 13 - Média mensal das temperaturas externas de bulbo seco .....	128
Gráfico 14 - Média mensal das temperaturas operativas dos modelos MB.VN.2010, MB.VN.2050 e MB.VN.2090 acompanhando tendência de temperaturas externas .....	128
Gráfico 15 – Diferenças ( $\Delta$ ) entre temperaturas internas ( $T_o$ ) e externas ( $T_E$ ) por meses nos anos analisados .....	131
Gráfico 16 - Resultado de aumento de $T_o$ internas por dia nos arquivos climáticos avaliados .....	131
Gráfico 17 - $T_o$ máxima por hora de ocupação em cada APP nos cenários climáticos avaliados .....	132
Gráfico 18 - $T_o$ máxima por hora de ocupação da UH nos cenários climáticos avaliados .....	134
Gráfico 19 - $T_o$ mínima por hora de ocupação da UH nos cenários climáticos avaliados .....	135
Gráfico 20 – Resultados de PHFT para a UH e percentual de redução deste indicativo entre anos climáticos avaliados.....	136
Gráfico 21 - Comparação entre resultados de Carga Térmica (CgT) previstos pela simulação e considerados pela NBR 15575 de acordo com os cenários climáticos ....	138

Gráfico 22 – Percentual de aumento de Carga Térmica (CgT) previstos pelo software e considerados pela NBR 15575 de acordo com os cenários climáticos.....	139
Gráfico 23 - Dados de previsão de cargas térmicas mensais entre os cenários climáticos.....	140
Gráfico 24 – Percentual de diferença entre valores de cargas térmicas previstas para cada mês de 2050 e 2090 em relação ao clima atual .....	141
Gráfico 25 – <i>Boxplots</i> de relevância de cada variável nos resultados do modelo com ventilação natural para o clima atual .....	146
Gráfico 26 - <i>Boxplots</i> de relevância de cada variável nos resultados do modelo sem ventilação natural para o clima atual .....	150
Gráfico 27 – Comparação de resultados de $T_o$ máxima na UH entre MB e MP em relação aos cenários climáticos distintos .....	153
Gráfico 28 - Comparação de resultados de $T_o$ máxima de cada APP entre MB e MP em relação aos cenários climáticos distintos .....	155
Gráfico 29 – Resultados de $T_o$ médias mensais.....	155
Gráfico 30 – Diferenças em °C da $T_o$ média da UH em cada mês dos anos avaliados entre MB e MP .....	156
Gráfico 31 – Resultados de PHFT da UH em MB e MP nos anos avaliados.....	158
Gráfico 32 – Resultados de carga térmica prevista comparando Modelos Propostos com Modelos Base para os anos avaliados .....	160

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Quadro resumo de artigos lidos integralmente.....	63
Tabela 2 - Mapeamento de diferentes tipologias Noroeste .....	84
Tabela 3 - Ambientes de Permanência Prolongada da Unidade Habitacional avaliada .....	88
Tabela 4: Arquivos climáticos selecionados para simulações .....	89
Tabela 5 - Cronogramas de ocupação e iluminação APPs .....	91
Tabela 6 - Intervalos de faixas de temperaturas operativas.....	92
Tabela 7 - Descrição dos parâmetros da ventilação natural para portas e janelas .....	93
Tabela 8 - Valores de temperatura operativa para o cálculo da CgTRAPP e da CgTAAPP .....	94
Tabela 9 - Temperaturas de setpoints de CgTR e CgTA.....	94
Tabela 10 - Modelos base simulados.....	95
Tabela 11 - Composições de projeto analisado .....	104
Tabela 12 - Estratégias passivas consideradas para simulações simultâneas ..	113
Tabela 13 - Temperaturas externas de bulbo seco nos cenários climáticos analisados .....	122
Tabela 14- Arquivos climáticos para Brasília analisados quanto aos intervalos de temperaturas externas de bulbo seco .....	124
Tabela 15 - Média anual das temperaturas operativas dos modelos MB.VN.2010, MB.VN.2050 e MB.VN.2090 .....	127
Tabela 16 – Dados de To média mensal, TE média mensal, diferenças de temperaturas ( $\Delta$ ) entre meses mais quentes e mais frios, e diferenças entre To e TE para os cenários climáticos avaliados .....	129
Tabela 17 - To máxima por hora de ocupação em cada APP nos cenários climáticos avaliados .....	132
Tabela 18 - To máxima por hora de ocupação da UH nos cenários climáticos avaliados .....	134
Tabela 19 - To mínima por hora de ocupação da UH nos cenários climáticos avaliados .....	135

Tabela 20 - Resultados de PHFT para a UH e percentual de redução deste indicativo entre anos climáticos avaliados.....	136
Tabela 21 – Comparação entre resultados de Carga Térmica (CgT) previstos pelo software e considerados pela NBR 15575 de acordo com os cenários climáticos.....	138
Tabela 22 – Dados de previsão de cargas térmicas mensais entre os cenários climáticos.....	140
Tabela 23 – Combinações entre variáveis projetuais simuladas pela ferramenta de otimização para cada condição de ventilação e clima.....	142
Tabela 24 – Resultados das combinações de variáveis com menor desconforto para os cenários climáticos avaliados .....	144
Tabela 25 – Comparação entre resultados de desconforto de diferentes combinações para os cenários climáticos avaliados .....	144
Tabela 26 – Resultados das combinações de variáveis com menor carga térmica para os cenários climáticos avaliados .....	148
Tabela 27 – Comparação entre resultados de desconforto de diferentes combinações para os cenários climáticos avaliados .....	148
Tabela 28 – Comparações de nível de desconforto e carga térmica entre os modelos ventilados naturalmente ou não em relação às combinações de variáveis otimizadas .....	151
Tabela 29 - Comparação de resultados de To máxima na UH entre MB e MP em relação aos cenários climáticos distintos .....	153
Tabela 30 - Comparação de resultados de To máxima de cada APP entre MB e MP em relação aos cenários climáticos distintos.....	154
Tabela 31 – Resultados de To média da UH em cada mês dos anos avaliados, percentuais de melhorias dos MP e diferença em °C entre MB e MP.....	156
Tabela 32 - Resultados de PHFT da UH em MB e MP nos anos avaliados.....	158
Tabela 33 – Resultados de carga térmica prevista de Modelos Base e Modelos Propostos para os anos avaliados .....	160

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas

APP Ambiente de permanência prolongada

APT Ambiente de permanência transitória

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

BPS Building Performance Simulation

BEM Building Energy Model

CgT Carga térmica

CgTA Carga térmica de aquecimento

CgTR Carga térmica de resfriamento

CgTT Carga térmica total

CT Capacidade térmica

DF Distrito Federal

ENCE Etiqueta Nacional de Conservação de Energia

EPW EnergyPlus Weather Data

EUA Estados Unidos da América

FS Fator Solar

INI-C Instrução Normativa do Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Comerciais

INI-R Instrução Normativa do Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Residenciais

NBR Norma Brasileira

PBE Programa Brasileiro de Etiquetagem

PHFT Percentual de Horas de ocupação dentro de uma Faixa de Temperatura operativa

PMV Predicted mean vote (Voto médio predito)

POC Percentual de Horas Ocupadas em Conforto

PPD Percentual de Pessoas Insatisfeitas (Predicted Percentage of Dissatisfied)

PROCEL Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica

RTQ-C Regulamento Técnico da Qualidade para Edifícios, Comerciais de Serviços e Públicos

To Temperatura operativa

U Transmitância térmica

UH Unidade habitacional

ZB Zona Bioclimática

## SUMÁRIO

1	Introdução .....	21
1.1	Objetivos .....	24
1.1.1	Objetivo geral: .....	24
1.1.2	Objetivos específicos:.....	24
1.2	Estrutura do trabalho .....	25
2	Revisão de literatura: Conceitos gerais .....	27
2.1	Conceitos de conforto térmico, desempenho térmico e eficiência energética 27	
2.1.1	Conforto térmico .....	27
2.1.2	Desempenho térmico .....	29
2.1.3	Eficiência energética .....	30
2.2	Avanços em desempenho e eficiência energética em edifícios .....	31
2.2.1	NBR 15575: Norma de desempenho de edifícios residenciais.....	35
2.3	Consumo energético de edifícios residenciais .....	37
2.3.1	Edifícios residenciais no Bairro Noroeste - DF .....	40
2.4	Estratégias passivas para conforto térmico.....	43
2.5	Simulação termoenergética .....	47
3	Revisão de literatura: Mudanças climáticas .....	49
3.1	Revisão sistemática da literatura.....	49
3.1.1	Resultados encontrados.....	53
3.1.2	Considerações a respeito da RSL.....	71
3.2	Arquivos climáticos futuros.....	72
3.2.1	Métodos de estimativa de arquivos climáticos futuros .....	72
3.2.2	Arquivos climáticos futuros nacionais.....	77

4	Método.....	81
4.1	Definição do objeto de estudo.....	82
4.1.1	Região Administrativa do Noroeste - DF.....	82
4.1.2	Tipologia de edifício.....	83
4.1.3	Projeto analisado.....	85
4.2	Variáveis climáticas.....	89
4.2.1	Arquivos climáticos futuros para Brasília.....	89
4.3	Metodologia de avaliação de desempenho térmico.....	90
4.3.1	Modelo com ventilação natural.....	92
4.3.2	Modelo sem ventilação natural.....	93
4.4	Modelagem – Modelos Base.....	95
4.4.1	Ocupação e cargas internas.....	95
4.4.2	Geometria e layout.....	99
4.4.3	Materiais construtivos.....	102
4.4.4	Configurações de condições com e sem ventilação natural.....	106
4.4.5	Análise de indicadores do Modelo Base.....	109
4.5	Estratégias projetuais de conforto passivo.....	109
4.5.1	Estratégias avaliadas para Modelo Proposto.....	109
4.5.2	Modelo de simulações simultâneas.....	116
4.5.3	Modelos Propostos – Com variáveis selecionadas.....	120
5	Resultados e discussões.....	122
5.1	Comparação de arquivos climáticos de 2010, 2050 e 2090.....	122
5.2	Resultados de simulações computacionais dos Modelos Base.....	126
5.2.1	Condição com ventilação natural.....	126
5.2.2	Condição sem ventilação natural.....	137

5.3	Resultados de simulações simultâneas de variáveis de projeto.....	142
5.3.1	Condição naturalmente ventilada .....	143
5.3.2	Condição de climatização artificial .....	147
5.3.3	Impacto de utilização de melhores combinações de carga térmica nos modelos de ventilação natural.....	150
5.4	Resultados de simulações dos Modelos Propostos .....	152
5.4.1	Condição naturalmente ventilada .....	153
5.4.2	Condição de climatização artificial .....	159
6	Considerações finais.....	162
6.1	Limitações de pesquisa .....	166
6.2	Recomendações para trabalhos futuros.....	167
7	Referências.....	169
APÊNDICE I	Resultados de variáveis arquitetônicas para modelos com ventilação natural	192
APÊNDICE II	Resultados de variáveis arquitetônicas para modelos sem ventilação natural	196
APÊNDICE III	Resultados de relevância de cada variável nos resultados do modelo com ventilação natural para todos os cenários climáticos analisados .....	197
APÊNDICE IV	Resultados de relevância de cada variável nos resultados do modelo sem ventilação natural para todos os cenários climáticos analisados .....	199

## 1 INTRODUÇÃO

O ambiente construído tem enfrentado consequências visíveis nos últimos anos devido ao ritmo acelerado da urbanização e ao agravamento dos efeitos das alterações climáticas (Bherwani; Singh; Kumar, 2020). Devido ao aumento das temperaturas globais, estudos e organizações concordam com a necessidade de alertar a sociedade sobre os riscos enfrentados. O aquecimento global, diretamente relacionado com as emissões de gases com efeito de estufa, é atribuído em grande medida ao setor da construção, considerado um dos maiores consumidores de energia em todo o mundo (Escandón *et al.*, 2019).

Nos últimos 40 anos, as emissões de CO<sub>2</sub> aumentaram em quatro vezes no Brasil, o qual se tornou o país que mais emite CO<sub>2</sub> em toda a América Latina e o 11º colocado no ranking global de emissões (IEA - International Energy Agency, 2019). Este cenário nos mostra um país ainda carente de estudos que monitorem e viabilizem alternativas para o combate ativo aos efeitos das mudanças climáticas.

Apesar de maior parte da eletricidade produzida no Brasil ser de origem renovável (87,9% em 2022), no ano de 2021 houve uma queda de 11,8% na energia produzida por hidrelétricas, a principal fonte, devido à escassez de chuvas (EPE, 2022a). Segundo o IPCC (2022b), as mudanças climáticas intensificam os períodos de seca mundialmente, o que reduz a capacidade de produção de energia das hidrelétricas e demonstra a necessidade de diversificação de fontes energéticas no Brasil. Além disso, reforça a urgência para a redução do consumo visando evitar a dependência por fontes não renováveis de energia e o consequente aumento de emissões de CO<sub>2</sub>, pois isto agravaria ainda mais a emergência climática e o efeito em cascata.

O desempenho futuro dos edifícios, especialmente o seu desempenho energético, pode ser significativamente afetado pelas mudanças climáticas (Krelling *et al.*, 2023; Santamouris, 2014). Isto porque as alterações climáticas podem alterar os padrões de uso de energia em edifícios, levando ao aumento da demanda de resfriamento e à

diminuição da demanda de aquecimento em alguns locais (Camilleri; Jaques; Isaacs, 2001; Mavrogianni *et al.*, 2012; O'Sullivan; Chisholm, 2020; Tomrukçu; Ashrafian, 2022).

As mudanças climáticas, em conjunto com a conscientização em relação ao esgotamento dos recursos naturais e os altos e crescentes índices de consumo (Fernandes, 2009) estão se refletindo no modo de projetar da construção civil. Isto leva muitos autores a se aprofundarem em projetar e construir edifícios energeticamente eficientes e saudáveis com conforto ambiental e segurança (Amorim *et al.*, 2021).

Tendo em vista que o crescimento é inevitável, e que é capaz de causar grandes impactos ambientais, atualmente buscam-se maneiras de construir edifícios eficientes, que gastem o mínimo de água e energia tanto em sua produção, quanto em sua vida útil e descarte. Segundo Lamberts, Dutra e Pereira (2014), a alternativa que se mostra mais adequada para o quadro de crise energética é aumentar a eficiência no uso de energia. Maciel (2021) indica que edifícios já construídos podem consumir até 30% menos após sua modernização seguindo parâmetros de eficiência (Maciel, 2021).

O uso do ar-condicionado tem efeitos negativos como aumento do consumo energético e emissões de CO<sub>2</sub> na atmosfera. Adicionalmente, o incentivo de sua utilização como solução para reduzir o desconforto térmico interior é especialmente preocupante, pois tem lentamente desencorajado a busca pela adoção de estratégias passivas no setor residencial (Strengers; Maller, 2011).

É crucial desenvolver estratégias para reduzir os riscos a longo prazo e incentivar a adaptação de edifícios novos e existentes (Camilleri; Jaques; Isaacs, 2001; Heidrich *et al.*, 2017). Neste contexto, diversos autores indicam que a simulação de edifícios é uma ferramenta extremamente útil e necessária para avaliar e otimizar o desempenho do ambiente construído, principalmente ao considerar a possibilidade de incorporar projeções de mudanças climáticas (Escandón *et al.*, 2019; Hasan *et al.*, 2021a; Hosseini; Javanroodi; Nik, 2022; Krelling *et al.*, 2023; Liu; Kwok; Ren, 2023; Troup; Fannon; Eckelman, 2020; Yamaguchi *et al.*, 2022).

Os diversos tipos de *software* de simulação de edifícios e desempenho ambiental estão em constante desenvolvimento e aprimoramento há décadas e são capazes de

avaliar diferentes respostas aos estímulos externos (Clarke, 2001). Esta categoria de ferramenta se apresenta como importante estratégia de projeto de edifícios, pois permite que projetistas, arquitetos e engenheiros considerem condicionantes como materiais, volumetria e layout com o clima local, energia e orientações. Este método possibilita análises de temperaturas, consumo de energia, avaliação das condições de infiltração, ventilação, ganho de descarga atmosférica, ocupação, equipamentos, avaliação e melhoria da massa térmica do edifício e visões de desempenho (Crawley, 2003).

A simulação também se mostra muito útil para estudos prospectivos. Neste contexto, ao considerar arquivos meteorológicos futuros em análises de desempenho energético, os projetistas e os construtores podem obter insights sobre o desempenho provável dos edifícios sob uma série de diferentes cenários climáticos. Isto pode ajudá-los a identificar regiões ou zonas onde melhorias podem ser feitas para aumentar a eficiência energética (Jalali; Shamseldin; Mannakkara, 2023). Além disso, tais avaliações auxiliam na redução de risco futuro de sobreaquecimento em habitações novas e reformadas na fase de projeto, a fim de evitar o risco de “aprisionamento” devido à longa vida útil do parque habitacional (Climate Change Committee - CCC, 2021; Mavrogianni *et al.*, 2012).

No contexto da cidade de Brasília, há uma lacuna de pesquisas que efetivamente demonstrem a eficácia das diversas alternativas de adaptação às mudanças climáticas e de alcançar a eficiência energética e desempenho térmico, relacionando critérios de variáveis arquitetônicas. Segundo Bracht *et al.* (2024), os estudos de simulação de edifícios considerando cenários climáticos futuros atualmente no Brasil se concentram em São Paulo. Há exemplos de estudos em outras cidades como Belém, Rio de Janeiro, Salvador, Cuiabá, Florianópolis e Curitiba, mas Brasília não é citada (Bracht *et al.*, 2024).

Segundo AMORIM *et al.* (2021), deve-se fornecer aos projetistas arquitetos e aos que lidam com a manipulação das edificações indicações precisas para a otimização da qualidade do ambiente construído. Tais indicações podem e devem ser incorporadas na prática projetual e nas regulamentações vigentes e em uso.

Considerando o alto consumo energético de edifícios, além da crescente preocupação em relação ao impacto do aquecimento global no conforto térmico dos ambientes construídos, esta pesquisa visa avaliar a *performance* térmica de edifícios residenciais localizados no bairro Noroeste, localizado na porção noroeste da cidade de Brasília - Distrito Federal (DF). A avaliação foi realizada por meio de simulação computacional levando em conta diferentes condições climáticas comparando o desempenho térmico nos cenários de clima atual e previsões de clima em um futuro próximo (2050) e futuro distante (2090). Além disso, foram estudadas diferentes estratégias passivas de projeto para aumentar o conforto térmico em residências e reduzir o consumo por ar-condicionado.

Assim, esta pesquisa contribui diretamente para quatro dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentáveis da ONU (ONU - Organização das Nações Unidas, 2023): 3: Saúde e bem-estar; 11: Cidades e comunidades sustentáveis; 12: Consumo e produção responsáveis; e 13: Ação contra a mudança global do clima.

## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 Objetivo geral:

Avaliar o impacto das mudanças climáticas no desempenho térmico de edifícios residenciais em três cenários distintos do século XXI: clima atual, clima futuro a curto prazo (2050) e clima futuro a longo prazo (2090).

### 1.1.2 Objetivos específicos:

- Compreender a amplitude de temperaturas nas prospecções climáticas futuras para Brasília – DF e discutir as condições de emergência climática.
- Quantificar o aumento na carga térmica dos edifícios residenciais devido às mudanças climáticas como previsão e alerta relativo ao aumento de consumo energético por equipamentos condicionadores de ar.

- Analisar os impactos de estratégias passivas de conforto para a redução de danos do aquecimento global e a adaptação de edifícios ao futuro climático.

## 1.2 Estrutura do trabalho

A estrutura do estudo está dividida em seis capítulos, nos quais são abordadas as etapas realizadas ao longo do desenvolvimento da pesquisa. **No primeiro capítulo**, é feita uma introdução ao tema da pesquisa, contextualizando as questões a serem exploradas e os objetivos propostos.

**No segundo capítulo**, é apresentada uma revisão da literatura relacionada aos temas específicos da pesquisa, por meio de uma compilação dos principais assuntos que fundamentam conceitos, definições e auxiliam posteriormente na definição da metodologia. Inicialmente, são discutidos os conceitos atuais de conforto térmico, desempenho térmico e eficiência energética. Em seguida, apresenta-se um panorama dos avanços em desempenho térmico e eficiência energética no Brasil e no mundo para contextualizar as ferramentas, incentivos e políticas públicas nesses aspectos. Além disso, é feita uma introdução às simulações termoenergéticas como ferramentas de apoio à tomada de decisões no desenvolvimento de projetos mais adequados ao contexto climático.

**O terceiro capítulo** apresenta uma revisão sistemática da literatura sobre pesquisas recentes a respeito de mudanças climáticas e simulações energéticas em edifícios para identificar tendências, avanços e metodologias empregadas. Também são explicadas abordadas metodologias de estimativa de arquivos climáticos futuros.

**O quarto capítulo** apresenta o método utilizado, onde são tratados os materiais e procedimentos necessários para o desenvolvimento da pesquisa. Este segmento inclui a justificativa da escolha do estudo de caso adotado, além da descrição do objeto de estudo, do software e dos parâmetros utilizados na modelagem para avaliação do desempenho térmico e análise de impacto das mudanças climáticas.

**O quinto capítulo** contém os resultados da pesquisa referentes à análise de cada contexto climático, diagnóstico e comparação das temperaturas operativas internas com o uso da ventilação natural, bem como a previsão da carga térmica de resfriamento considerando o uso de sistemas de climatização do edifício avaliado. Este capítulo também apresenta resultados obtidos a partir das simulações de simultâneas de estratégias passivas para a redução dos danos causados pelo aquecimento global e adaptação dos edifícios à emergência climática.

**O sexto capítulo** consiste na discussão de resultados, conclusões, limitações de pesquisa e também aponta algumas sugestões de trabalhos futuros.

Por fim, o trabalho traz as referências bibliográficas e os apêndices com as tabelas e gráficos de resultados complementares.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA: CONCEITOS GERAIS

### 2.1 Conceitos de conforto térmico, desempenho térmico e eficiência energética

É necessário inicialmente destacar que, no contexto do ambiente construído, os conceitos de conforto térmico, desempenho térmico e eficiência energética se relacionam, mas cada um possui a sua particularidade. O conforto térmico é um conceito subjetivo ligado a sensação das pessoas, já o desempenho térmico é um conceito indicativo da performance de um sistema ou edifício. Por outro lado, a eficiência energética representa o bom rendimento de um sistema ou edifício relacionado especificamente ao uso de energia. Os três conceitos são abordados nos tópicos a seguir deste capítulo de revisão de literatura.

#### 2.1.1 Conforto térmico

Na década de 1970, iniciaram-se discussões científicas sérias a respeito do conforto térmico de ocupantes. Fanger (1970) conduziu uma série de experimentos adotando uma abordagem avaliativa estatística para definir o conforto térmico adaptativo. O autor publicou um artigo no qual descreveu os parâmetros primários para avaliar o conforto térmico dos ocupantes ao realizar levantamentos longitudinais e transversais em diferentes regiões climáticas (Fanger, 1973; Humphreys, 2005).

A entrada de determinados parâmetros climáticos, como temperatura do ar, velocidade do ar, temperatura média radiante e umidade relativa; juntamente com fatores pessoais que foram descritos por Humphreys, como idade, sexo, nível de atividade do entrevistado e isolamento das roupas podem ser usados para prever o conforto térmico (Nicol; Humphreys, 2002). O uso desses parâmetros experimentais resultou na abordagem mais conhecida de medir o conforto térmico: o modelo de voto médio previsto (PMV) (Ozarisoy, 2022).

Entretanto, o conforto térmico é um campo subjetivo pois depende de fatores físicos, fisiológicos e psicológicos. Os fatores físicos determinam as trocas de calor do corpo com o meio. Já os fatores fisiológicos referem-se a alterações na resposta fisiológica do organismo, resultantes da exposição contínua a determinada condição térmica. E finalmente, os fatores psicológicos são aqueles que se relacionam às diferenças na percepção e na resposta a estímulos sensoriais, frutos da experiência passada e da expectativa do indivíduo (Lamberts, 2016).

As diferenças culturais influenciam na percepção do conforto das pessoas, já que cada um interpreta o ambiente térmico de forma distinta (Tweed *et al.*, 2014), influenciado por expectativas, adaptação ou características fisiológicas individuais (Kingma; van Marken Lichtenbelt, 2015; Parkinson; de Dear, 2015). Para além da percepção, a interação do ocupante com o edifício em busca de condições satisfatórias acontece de diferentes maneiras. Estudos comprovam que as pessoas passam aproximadamente 90% do seu tempo dentro de edifícios (Hong *et al.*, 2017; Klepeis *et al.*, 2001), e o comportamento humano dentro de casa é baseado em como as pessoas usam, percebem e reagem ao seu ambiente ao interagir com o edifício (Day; O'Brien, 2017), e envolve processos de tomada de decisão que tendem a ser complexos.

Algumas pessoas podem ser bastante ativas na adaptação do ambiente para alcançar o conforto térmico, utilizando estratégias passivas para atingir as condições ideais e economizar energia. Enquanto outras podem preferir uma abordagem mais direta, sem se preocupar tanto com o consumo energético (Indraganti, 2010; Tweed *et al.*, 2014). Em ambos os casos, fatores como valores pessoais, renda e custo da energia podem influenciar as decisões dos utilizadores (Stemers; Yun, 2009).

Mesmo sendo amplamente aceito, o método PMV proposto por Fangers é criticado por alguns pesquisadores. Isso devido às discrepâncias entre as temperaturas do ar exterior registradas e as temperaturas do ar interior simuladas que foram encontradas ao avaliar o conforto térmico dos ocupantes (Nicol; Humphreys; Roaf, 2012). Além disso, outros estudos comprovam que assumir um padrão constante de conforto pode fazer com que os ocupantes sejam cada vez menos adaptáveis às diferenças de temperaturas e a sensação de desconforto seja ainda mais frequente (Buonocore *et al.*, 2019; Cândido *et*

*al.*, 2010; Vecchi; Cândido; Lamberts, 2016). Sendo assim, considera-se que o uso de condicionamento de ar com um *setpoint* fixo pode ser inconsistente para alcançar o conforto térmico em ambientes construídos, pois condições rigorosamente controladas resultantes do ar-condicionado fazem com que os ocupantes não sejam tolerantes à gama mais ampla de temperaturas que o modelo de conforto térmico adaptativo propõe (Brager; de Dear, 2000; Lyu *et al.*, 2022; Parkinson; de Dear; Brager, 2020; Vellei *et al.*, 2023).

### 2.1.2 Desempenho térmico

Segundo a NBR 15575, o desempenho é o comportamento em uso de uma edificação e de seus sistemas e pode ser classificado em mínimo, intermediário e superior. Porém, um alto desempenho térmico normalmente está ligado a um bom conforto térmico (ABNT, 2013), já que se considera que um edifício com boa performance possui temperaturas internas mais amenas e o morador sentirá menos desconforto.

O desempenho térmico de um edifício está diretamente relacionado aos materiais e elementos construtivos que o compõe. A NBR 15220:2005 discorre sobre as propriedades térmicas mais relevantes ao desempenho dos materiais que compõe os elementos construtivos. A norma também apresenta os métodos de cálculo para elementos homogêneos e heterogêneos de transmitância térmica, fator solar e atraso térmico. O intuito do fornecimento destes dados é auxiliar a avaliação de desempenho térmico para Habitações de Interesse Social (ABNT, 2005; Lamberts, 2016). Além disso, também é definido o zoneamento bioclimático brasileiro, recomendações de diretrizes construtivas e detalhamento de estratégias de condicionamento térmico passivo a serem aplicadas em projetos de habitações unifamiliares com até três pavimentos.

Para cada zoneamento há um conjunto de recomendações adequadas ao clima que visam proporcionar melhorias no desempenho térmico da edificação, como tipos de vedações externas e diretrizes de aberturas. Mesmo trazendo estratégias bioclimáticas voltadas para edifícios destinados à moradia, tais recomendações podem ser utilizadas em outros tipos de edificações, pois as estratégias são benéficas independente da tipologia a que se destina (Lima; Paiva, 2023).

A avaliação de desempenho térmico pode ser realizada na fase de projeto ou após a construção. Na fase projetual, a edificação pode ser avaliada por meio de simulação computacional, ou por meio de verificação do cumprimento de diretrizes construtivas. Enquanto na edificação construída, a avaliação pode ser realizada por medições *in loco* das variáveis que representam o desempenho térmico (ABNT, 2005; Lima; Paiva, 2023).

### 2.1.3 Eficiência energética

Segundo o programa de etiquetagem brasileiro, a eficiência energética é a razão ou outra relação quantitativa entre uma saída de desempenho, serviços, produtos ou energia e uma entrada de energia (Brasil, 2022a). Ela está relacionada ao alcance de uma boa *performance* com o menor consumo de energia possível e está intimamente ligada ao serviço energético fornecido e abrange toda a cadeia energética, desde a extração ou transformação até o seu uso final (Kaehler, 1993). É diferente de racionamento, o qual também está relacionado ao baixo consumo, mas com cortes no uso e a diminuição do resultado efetivo e da oferta de conforto. Por exemplo, com o racionamento tem-se a redução do consumo ao apagar metade das luminárias de uma sala. Já a eficiência, visa a redução do consumo ao trocar lâmpadas ultrapassadas por lâmpadas eficientes, as quais trarão o mesmo nível de iluminação com menor consumo.

Nas construções, o consumo de energia elétrica é fundamental para atender às necessidades de conforto dos ocupantes, tanto em termos térmicos quanto luminosos, além de ser empregado em equipamentos de circulação, comunicação, entre outros. Estratégias de projeto eficazes podem resultar reduções no consumo em mais de 50% (Lops *et al.*, 2023; Ozarisoy, 2022). Tal eficiência pode ser alcançada por meio da adaptação dos espaços habitáveis às condições climáticas locais, utilizando materiais e técnicas apropriadas, com o objetivo de promover o uso racional de energia.

Estudos também têm explorado a demanda final de energia em diferentes setores econômicos, destacando os benefícios da utilização de equipamentos mais modernos e eficientes na redução do consumo de energia elétrica (BRASIL. Ministério das Minas e Energia. Eletrobrás. Procel Edifica, 1994).

## 2.2 Avanços em desempenho e eficiência energética em edifícios

A crise internacional de energia impulsionou a elaboração de métodos para avaliar a desempenho de edifícios e dimensionamento de sistemas a partir da década de 1970 (Lamberts; Dutra; Pereira, 2014; Lopes; Silva, 2019). Em diversos países, incluindo o Brasil, estratégias têm sido planejadas para obtenção de maior eficiência energética, através de legislações e incentivos (Amorim *et al.*, 2021).

Em 1975, foi lançada a primeira versão da ASHRAE 90, normativa americana sobre a conservação de energia em projetos de novos edifícios (American Society of Heating, 1975). Já em 1989 foi publicada a ASHRAE 90.1, a qual discorre sobre o padrão de energia para edifícios e estabelece parâmetros para a avaliação por simulações termoenergéticas (American Society of Heating, 1989). Os protótipos para simulação foram baseados em um levantamento de edificações americanas e possui atualização quinzenal (CBECS, 2003).

Na Austrália, o *Building Code of Australia* avalia a performance dos edifícios no país, mas há parâmetros diferenciados por regiões e cidades (Australian Building Codes Board - ABCB, 2022). Em Portugal, a metodologia de estabelecer o nível de desempenho de edifícios com e sem climatização é estabelecida pelo Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE) e o Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios (RSECE) respectivamente (Duarte; Morais, 2017).

Em 1984, iniciou-se no Brasil uma discussão sobre a necessidade de conservação de energia, e assim a Eletrobrás criou o Programa Nacional de Energia Elétrica (PROCEL). Este programa tem o objetivo de promover a racionalização do consumo de energia no país (PBE Edifica, 2020). Naquele momento, a política era voltada exclusivamente às máquinas e equipamentos.

A preocupação com a eficiência energética se intensificou na década de 90 com a crise energética. Em 1991, foi discutida a necessidade de normalizações de desempenho

em um encontro nacional (Lamberts, 1991), o qual impulsionou o desenvolvimento e posterior publicação da norma da ABNT NBR 15220, já citada no item 2.1.2 deste trabalho (Carlo; Lamberts, 2010).

Em 2001, foi regulamentada a Lei nº 10.295 pelo decreto nº 4.059, de 19 de outubro, a primeira lei de eficiência energética no Brasil, que dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia (Brasil, 2001b). Esse decreto estabeleceu a criação de níveis mínimos de eficiência energética de edificações construídas, assim como a necessidade de indicadores técnicos e regulamentação específica para estabelecer a obrigatoriedade dos níveis de eficiência no país. O Decreto criou o Comitê Gestor de Indicadores e Níveis de Eficiência Energética – CGIEE e, especificamente para edificações, o “Grupo Técnico para Eficientização de Energia nas Edificações no País”, para propor uma forma de regulamentar as edificações construídas no Brasil, visando ao uso racional da energia elétrica (Brasil, 2001a).

Dessa forma, em resposta à demanda nacional expressa na Lei nº 10.295, em 2009 foi lançado o Regulamento Técnico da Qualidade para Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos – RTQ-C. Este documento estabelece parâmetros para alcançar a etiqueta nacional de conservação de energia – ENCE, a qual oferece orientações para a definição de classes de eficiência energética que vão de “A” (mais eficiente) a “E” (menos eficiente). Para tal, o regulamento propõe dois métodos possíveis: um simplificado e um baseado em simulação (Brasil, 2010). Em 2012, a etiquetagem de edifícios avançou mais uma etapa quando foi lançado o RTQ-R – Regulamento Técnico da Qualidade para Eficiência Energética de Edifícios Residenciais (Brasil, 2012).

O objetivo da etiquetagem foi servir de parâmetro para o mercado e consumidores e, assim, alcançar maior eficiência energética e promover melhores níveis de conforto nas edificações. Por ser a primeira metodologia estabelecida no país para classificação de eficiência energética, a etiquetagem surgiu de forma facultativa e com simplificações na primeira versão do regulamento (Carlo; Lamberts, 2010).

Porém, em 2014, a Instrução Normativa no 02 da Secretaria de Logística e Tecnologia da Informação (SLTI) do Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão

estabeleceu a primeira condição de obrigatoriedade da etiquetagem de edifícios no âmbito nacional. Essa IN dispõe sobre os projetos e a construção de prédios novos e de *retrofits* da administração pública, os quais, a partir de então, devem obrigatoriamente obter ENCE (Etiqueta de Eficiência Energética) Geral classe A (Brasil, 2014).

No ano de 2013, houve um avanço relevante no âmbito nacional a partir da publicação da norma de desempenho de edificações residenciais, NBR 15575, a qual entrou em vigor após anos de discussões e consulta pública (ABNT, 2013). A norma é bastante ampla e envolve parâmetros para alcançar o desempenho mínimo, intermediário ou superior de diversas esferas de edifícios residenciais.

Dentre muitos outros aspectos abordados pela Norma, há as análises de desempenho térmico, lumínico, e acústico os quais estão ligados ao conforto ambiental e redução do consumo de energia. Apesar de existirem metodologias de análise simplificadas destes quesitos, a norma estabelece limitações para tal que, muitas vezes, exigem a avaliação por meio de simulações computacionais. O desempenho térmico se relaciona diretamente com a eficiência energética das edificações, já que busca alcançar condições termicamente adequadas para os usuários e, conseqüentemente, o consumo por ar-condicionado, ventilador ou aquecedores, a depender da zona bioclimática em que o edifício estiver localizado (Lamberts *et al.*, 2020).

Em 2021 tanto a etiquetagem de edifícios comerciais, de serviços e públicos quanto a Norma de Desempenho sofreram atualizações. O processo de etiquetagem passou a ser estabelecido por um novo documento chamado INI-C: Instrução Normativa do Inmetro para Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicas (Brasil, 2022a). A NBR 15575 foi atualizada nas partes de desempenho térmico e acústico (ABNT, 2021a). Já o método de etiquetagem de edifícios residenciais, foi atualizado em 2022 e passou a ser chamado INI-R: Instrução Normativa do Inmetro para Edifícios Residenciais (Brasil, 2022b).

Originalmente, o RTQ-C e o RTQ-R permitiram avaliar a classificação das edificações por equações de regressão linear múltipla, válidas de acordo com a zona bioclimática da localidade, e elaboradas a partir de simulações energéticas. Entretanto, estudos indicam que o método de regressão linear não é recomendado para lidar com

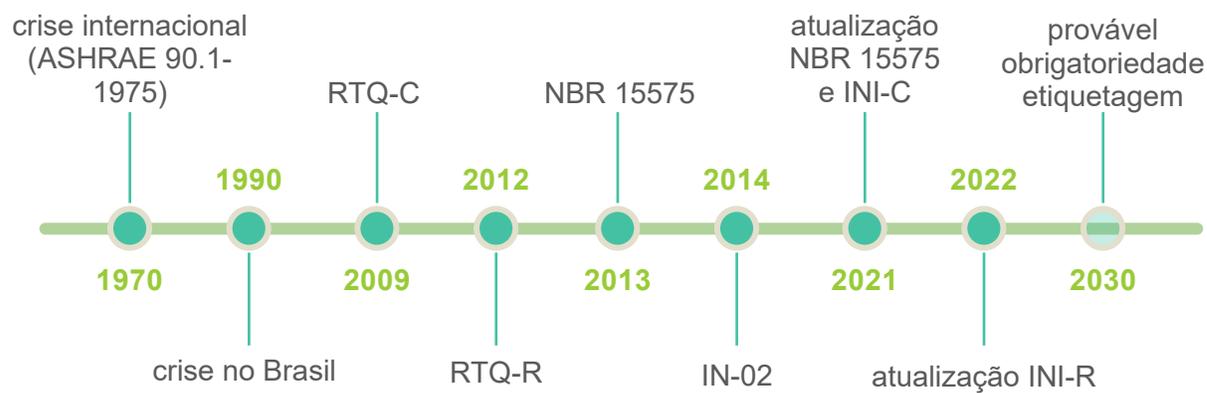
variáveis não lineares (Melo *et al.*, 2016). Além disso, o sucesso de regulamentos de eficiência energética está relacionado à aplicabilidade e robustez dos métodos utilizados para avaliar a economia de energia em edificações (Bre; Roman; Fachinotti, 2020; Wei *et al.*, 2018).

Por este motivo, ao longo da última década, foi dada continuidade ao desenvolvimento de metamodelos direcionados para as políticas de eficiência energética em edificações no Brasil. Melo (2012) simulou variações em edificações de escritórios condicionados artificialmente, e propôs redes neurais artificiais para substituir as regressões lineares múltiplas presentes no RTQ-C.

Dando continuidade no estudo, Versage (2015) optou por desenvolver redes neurais artificiais a partir de simulações simplificadas, de modo a criar maior diversidade de casos, e representar as zonas térmicas de edificações comerciais. Desta forma, a atualização da metodologia de avaliação da etiquetagem trouxe maior assertividade e aprimoramento na análise.

Além dos avanços nas metodologias de análise de eficiência e desempenho de edifícios no Brasil, está sendo desenvolvida pela Eletrobrás a Análise de Impacto Regulatório. Esta iniciativa avalia a compulsoriedade da adoção do Programa Brasileiro de Etiquetagem das Edificações (PBE Edifica) com previsão que ocorra gradualmente até 2030 (Eletrobrás *et al.*, 2021).

Figura 1- Linha do tempo da evolução de estratégias de eficiência energética em edifícios no Brasil



Fonte: autoria própria, 2024.

### 2.2.1 NBR 15575: Norma de desempenho de edifícios residenciais

A NBR 15575 é uma norma brasileira de desempenho de edificações residenciais que abarca diversas especialidades envolvidas no ramo de projetos e construções de edifícios. Ela é dividida em seis partes, conforme descrito a seguir:

- Parte 1: Requisitos gerais, em que são apresentados os procedimentos para determinação do desempenho dos sistemas da edificação que não se encaixam em nenhum daqueles apresentados nas demais partes da norma;
- Parte 2: Requisitos para os sistemas estruturais;
- Parte 3: Requisitos para os sistemas de pisos;
- Parte 4: Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas;
- Parte 5: Sistemas de coberturas;
- Parte 6: Sistemas hidrossanitários.

Esta é uma norma com ampla implementação por grandes empresas de construção, mas ainda com cumprimento limitado no caso de pequenas empresas. No entanto, é aplicada pelo Código de Defesa do Consumidor, que torna obrigatória sua aplicação para novos edifícios residenciais em todo o país (Krelling *et al.*, 2023). A diligência por serviços com padrões cada vez mais altos por parte dos clientes, bem como os parâmetros impostos por normas resulta em uma urgência adaptativa por parte das empresas de edificações (Santos; Hippert, 2016).

Apesar da contribuição e difusão da NBR 15575 desde 2013, observam-se diversas lacunas na sua aplicação pela metodologia de desempenho térmico inicialmente publicada. Segundo Encimas *et al* (2018), a atualização dos códigos de desempenho do edifício melhora e simplifica os métodos de avaliação. Segundo Sorgato *et al* (2012), a análise de desempenho térmico de 2013 apresentava limitações por avaliar apenas um dia típico de projeto, desconsiderando as variações climáticas ao longo do ano. Além disso, apresenta taxa de renovação de ar do ambiente constante, subestimando os efeitos da ventilação natural.

Assim, em 2021, a NBR 15575 foi atualizada para tornar a metodologia de desempenho térmico mais completa e assertiva. A norma dispõe de dois procedimentos para a análise: simplificado e simulação computacional. O procedimento simplificado tem uma abordagem prescritiva, que ainda está em transição da versão anterior do padrão para uma edição mais recente (Krelling *et al.*, 2023).

Já o procedimento de simulação computacional é considerado a opção mais assertiva e abrangente para avaliar o desempenho térmico. Este procedimento permite considerar diferentes dados relativos à edificação em um programa que simula o seu comportamento termoenergético ao longo do tempo (Von Glehn; Kos, 2021). Em projetos com condições específicas, como projetos com grandes áreas envidraçadas, a simulação é especialmente importante, pois indica a real influência destes elementos (Sorgato *et al.*, 2014).

O procedimento de simulação computacional atual se baseia a sua avaliação pelo Percentual de Horas ocupadas dentro de uma Faixa de Temperatura operativa (PHFT), o qual define a parcela de tempo em que a edificação se encontra dentro de uma faixa de temperaturas aceitáveis, de acordo com a zona bioclimática. Além disso, são avaliadas as temperaturas operativas anuais máxima e mínima (Tomás e Tomín), dentro dos horários de ocupação da Unidade Habitacional (UH), e as cargas térmicas de aquecimento e refrigeração (ABNT, 2021a; Krelling *et al.*, 2020; Lamberts *et al.*, 2020).

Quando a ventilação natural não for suficiente para manter as temperaturas operativas internas dentro de uma faixa aceitável, a norma estabelece que se calcule a carga térmica de refrigeração (CgTR) ou aquecimento (CgTA). Dessa forma, permite-se avaliar a edificação em ambas as condições, ventilada naturalmente e com refrigeração ou aquecimento, abrangendo as diversas formas de utilização da residência (ABNT, 2021a, 2021c, 2021b; Lamberts *et al.*, 2020).

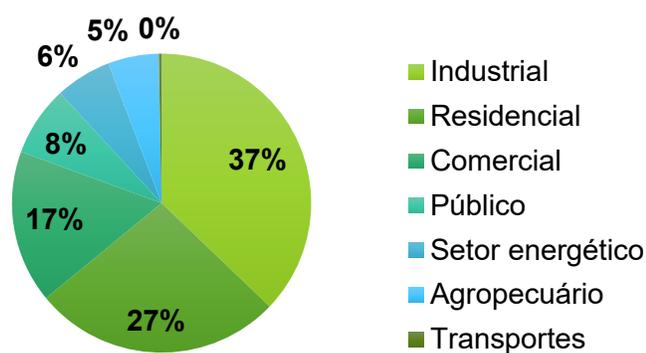
Como classificação de desempenho, a norma indica até três níveis: mínimo, intermediário e superior. O nível mínimo é obrigatório e considerado como o mínimo aceitável para que a edificação possa ser construída, ele avalia o PHFT, Tomás e Tomín. Os níveis intermediário e superior são voluntários e indicam desempenhos melhores considerando a possibilidade de agregar maior qualidade à edificação. Para alcançar os

desempenhos intermediários e superiores também é necessária a avaliação a carga térmica total (CgTT), que é a soma entre a carga térmica de resfriamento (CgTR) e a carga térmica de aquecimento (CgTA) (ABNT, 2021a, 2021c, 2021b).

## 2.3 Consumo energético de edifícios residenciais

Em se tratando de consumo de eletricidade, o setor residencial é o segundo maior consumidor no país, responsável por 27% de toda a eletricidade consumida em 2022, atrás apenas do setor industrial (Gráfico 1). Além disso, o Balanço Energético Nacional de 2023 demonstrou aumento crescente de energia no setor residencial, com aumento de aproximadamente 25% em comparação ao consumo de 2013 (EPE, 2023b).

Gráfico 1 - Consumo de energia elétrica por setores no Brasil.

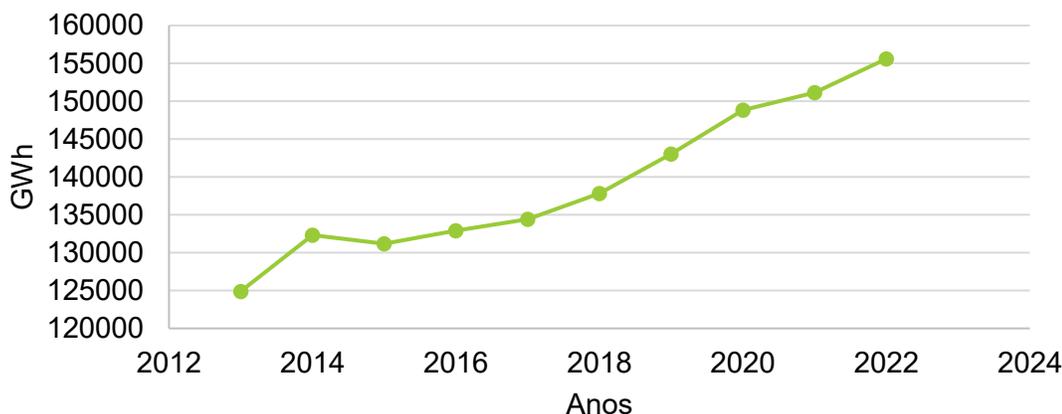


Fonte: EPE (2023), adaptado pela autora.

O ano de 2020 foi marcado pela pandemia de covid-19 que ocasionou grandes impactos na economia mundial e nacional. Setores relevantes da economia nacional sofreram quedas acentuadas no consumo de energia elétrica tais como os setores comercial, público e energético. Por outro lado, no setor residencial houve um crescimento de 4,05% no consumo de energia elétrica devido às políticas de distanciamento social e home office adotados por vários segmentos da economia nacional (EPE, 2021a). Nos anos seguintes, a tendência de aumento de consumo de energia em residências continuou, porém em menor ritmo conforme ilustrado no Gráfico 2 (EPE, 2022a, 2023a). Sendo assim, estudos voltados para o desempenho de edifícios

residenciais se tornam ainda mais justificáveis, já que além de serem o lar das pessoas, também se converteram em ambiente de trabalho.

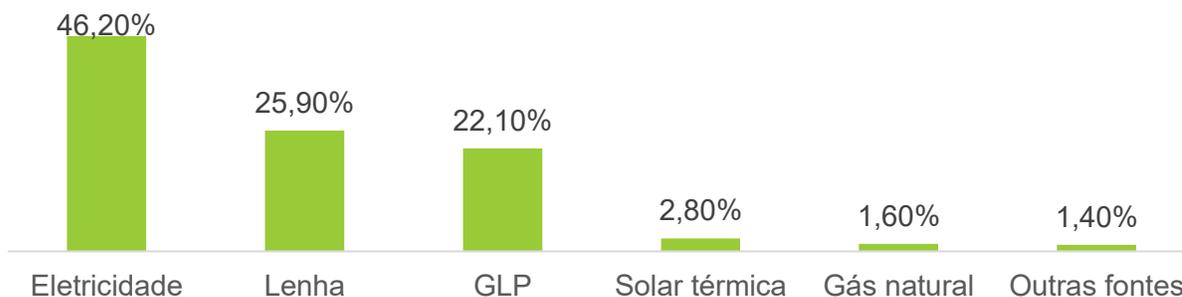
Gráfico 2 - Consumo de energia em residências no Brasil



Fonte: EPE (2023), adaptado pela autora.

O consumo total de energia em edifícios residenciais no Brasil é representado predominantemente pela eletricidade (46,2%), mas também estão presentes outras fontes de energia como a lenha (25,9%), GLP (22,1%), solar térmica (2,8%), gás natural (1,6%) e outras fontes (1,4%) (Gráfico 3). A parcela predominante de energia elétrica apresentou isoladamente um aumento de 3% em relação ao ano anterior (EPE, 2023a), e a tendência é que haja crescente aumento deste consumo pelo aumento do consumo de ar-condicionado (EPE, 2022b), o qual é extremamente relevante. Estima-se que a refrigeração ativa seja responsável por 18,5% do total de energia elétrica consumida em edifícios no mundo em 2016 (International Energy Agency, 2018).

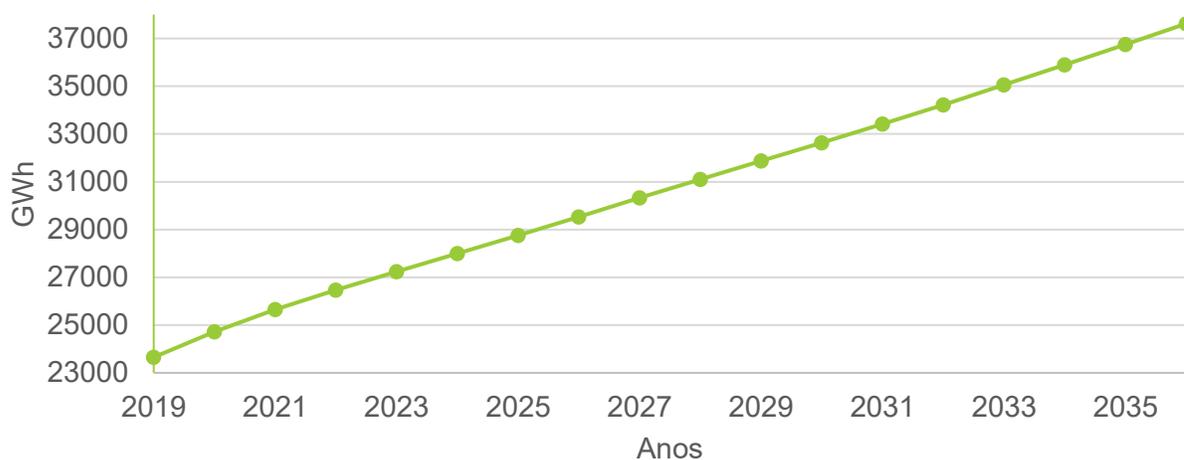
Gráfico 3 - Participação das fontes energéticas nas residências



Fonte: EPE (2022), adaptado pela autora.

Existe uma demanda reprimida por equipamentos de condicionamento de ar no Brasil, em especial nas classes de renda mais baixas nas regiões de climas mais quentes (EPE, 2022b). Segundo a Pesquisa de Posse e Hábitos de Uso de Equipamentos Elétricos desenvolvida pela Eletrobras, menos de 14% das residências no Brasil possuem equipamentos de ar-condicionado (Eletrobras, 2019). Ainda assim, entre 2005 e 2017, houve um aumento na demanda por eletricidade em residências devido aos equipamentos de ar-condicionado de 237% (EPE, 2018). Além disso, a EPE estima que o consumo por ar-condicionado em residências aumente quase 60% de 2019 a 2036 (Gráfico 4) considerando apenas as posses e hábitos dos brasileiros, desconsiderando o aumento devido ao aquecimento global (EPE, 2022b).

Gráfico 4- Previsão de consumo de ar-condicionado em residências no Brasil.



Fonte: EPE, 2022, adaptado pela autora.

Conforme já abordado anteriormente, o clima atual já sofreu o impacto da ação do homem e as mudanças climáticas já são visíveis tanto no aquecimento da temperatura global quanto em desastres naturais (Cui *et al.*, 2022). A temperatura atual da superfície global é em média 1,1°C acima de 1850-1900. As emissões globais de gases com efeito de estufa continuaram a aumentar com recordes históricos e contínuos decorrentes do uso insustentável de energia, o que conduzirá ao aumento do aquecimento global, com a melhor estimativa de atingir 1,5°C no curto prazo em cenários considerados e trajetórias modeladas, expressando a necessidade imperativa de adaptação do meio construído (Calvin *et al.*, 2023).

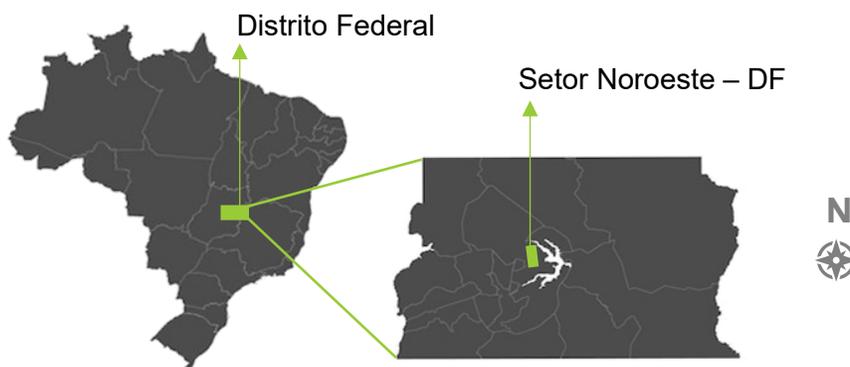
A partir da preocupação a respeito do desempenho térmico dos edifícios residenciais, e da urgente demanda por adaptação climática, é reforçada a importância da pesquisa em conforto térmico e eficiência energética com prospecções de cenários de climas futuros, o que é viabilizado por de simulações computacionais preditivas.

### 2.3.1 Edifícios residenciais no Bairro Noroeste - DF

Brasília é parte de um projeto nacional de modernização do país e o urbanista Lúcio Costa foi responsável pelo seu planejamento após vencer um Concurso Nacional realizado pelo presidente Kubitschek, em 1957. Além do Plano Piloto, o urbanista registrou áreas de expansão da cidade no documento Brasília Revisitada em 1987 (Costa, 1987). Neste documento, Lúcio Costa indica a preservação de edifícios residenciais nos moldes das superquadras com gabarito de 6 pavimentos e o térreo livre sobre pilotis, garantindo o solo público.

O conjunto urbanístico-arquitetônico de Brasília foi reconhecido como Patrimônio Mundial pela Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura – UNESCO em 1987. Em 1990, foi inscrito no Livro de Tombo Histórico pelo Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional – IPHAN, na portaria nº314/1992 (IPHAN, 2016). Assim, as normas urbanísticas e o Código de Obras de Edificações do Distrito Federal estabeleceram um padrão em comum para edifícios do Plano Piloto.

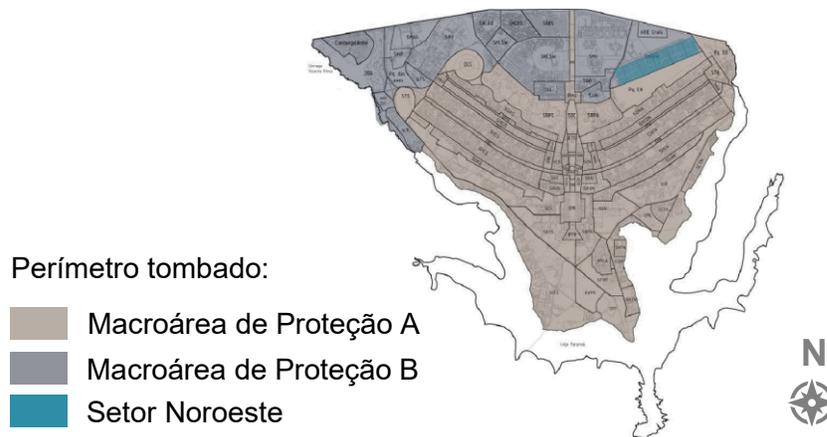
Figura 2- Mapa Brasil e DF com localização Noroeste



Fonte: autoria própria, 2023.

Dentre os pontos de expansão previstos no Brasília Revisitada, está o Setor Noroeste (Figura 2), localizado dentro da Macroárea de Proteção B do perímetro tombado de Brasília. As suas normas de construção estabelecem padrões semelhantes às zonas residenciais de superquadras do Plano Piloto – Asa Norte e Asa Sul, seguindo as premissas de Lucio Costa de edifícios com seis pavimentos sobre pilotis (Figura 3).

Figura 3 - Perímetro tombado de Brasília



Fonte: IPHAN, (2016) adaptado pela autora.

A evolução da tecnologia possibilitou testar estratégias para aumentar o desempenho das edificações antes mesmo de sua construção e o desenvolvimento elementos construtivos de alta performance. Porém, é possível observar que grande parte das construções residenciais mais recentes de Brasília são menos eficientes quando comparadas a projetos de edifícios mais antigos da cidade, como os da década de 80 (Meira, 2014).

No Setor Noroeste, por exemplo, comumente as novas edificações são construídas desconsiderando os princípios bioclimáticos locais e contexto urbano, com orientações, materiais e volumetria inadequadas. Além disso, o uso do vidro foi potencializado enormemente: em alguns casos, ultrapassa os vãos das janelas para compor as próprias paredes (Figura 4). Ao lado da plasticidade representada pelo vidro como componente de fachada, no entanto, este pode causar problemas como o ganho térmico e ofuscamento (Amorim *et al.*, 2021). Estas escolhas da fase de projeto criam problemas de desconforto térmico e lumínico para serem resolvidos posteriormente com

estratégias ativas, como o ar-condicionado e cortinas de proteção solar que resultarão em altos custos e consumo por toda a vida útil da edificação.

Segundo Von Glehn e Kos (2021), as legislações urbanísticas e a lógica capitalista por menor custo e maior lucro resultam em dificuldades para alcançar os desempenhos térmico e lumínico mínimos em projetos no Noroeste.

Figura 4 - Foto de edifícios residenciais no Setor Noroeste



Fonte: Emplavi, (2023).

Os edifícios ali construídos são considerados de alto padrão. Ou seja, os seus moradores são de alta renda e naturalmente já representam um impacto maior no consumo energético quando comparado às famílias de renda média ou baixa. Ao projetar edifícios ineficientes para pessoas de alto poder aquisitivo, multiplica-se ainda mais este consumo. Segundo Ramos (2021), 93,2% das pessoas com alto padrão aquisitivo possuem pelo menos um equipamento de ar-condicionado em suas residências localizados em climas quentes no Brasil. Por outro lado, 89% das pessoas possuem preferência por ambientes naturalmente ventilados. Portanto, existe um grande potencial de redução do impacto destes edifícios se utilizadas as estratégias adequadas ao clima local.

## 2.4 Estratégias passivas para conforto térmico

O consumo energético para alcançar o conforto térmico de edifícios residenciais e comerciais está crescendo rapidamente no mundo (Goldsworthy; Poruschi, 2019; Yang; Yan; Lam, 2014). Esse aumento pode ser atribuído ao padrão de vida mais elevado, que possibilita condições melhores de conforto, muitas vezes alcançadas por meio de dispositivos como ventiladores elétricos, refrigeradores portáteis ou sistemas de ar-condicionado (Ramos, 2020). Nesse sentido, a IEA (International Energy Agency, 2018) alerta que os sistemas de ar-condicionado serão uma das principais fontes de demanda global de eletricidade nas próximas décadas, prevendo um aumento de 1,6 para 5,6 bilhões de unidades em todo o mundo até 2050.

É possível tirar partido de estratégias de projeto que visam uma melhor integração entre o usuário e o clima, incorporando estratégias naturais de aquecimento, resfriamento e iluminação, de forma a obter um ambiente interior com determinadas condições de conforto para os usuários (Lamberts; Dutra; Pereira, 2014). Estas variáveis são chamadas de estratégias passivas pois não consideram o uso de energia, diferentemente das estratégias ativas como o ar-condicionado, aquecedores elétricos e iluminação artificial. Mudanças nos materiais de construção, aberturas de janelas e seu dimensionamento podem melhorar a capacidade dos edifícios de operar com estratégias passivas (Méndez Echenagucia *et al.*, 2015; Negendahl, 2015; Østergård; Jensen; Maagaard, 2016).

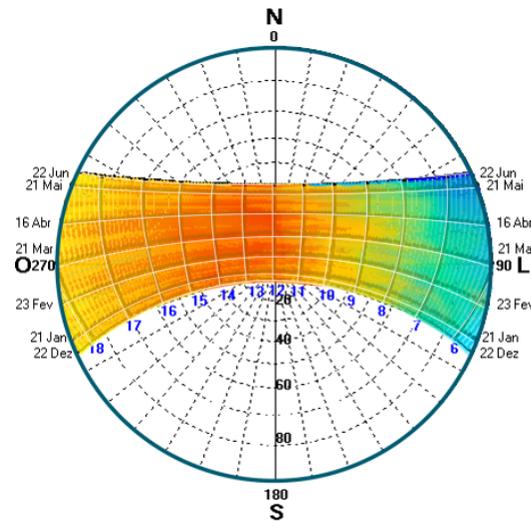
A composição dos materiais utilizados na envoltória de um edifício é extremamente relevante para o seu comportamento térmico, uma vez que cada elemento construtivo possui propriedades técnicas que influenciam nos ganhos de energia dos ambientes internos. A parcela da radiação transmitida para o interior é a principal fração dos ganhos térmicos em ambientes e atua diretamente nas condições internas de conforto dos ocupantes (Lamberts; Dutra; Pereira, 2014). As propriedades mais importantes ao considerar o ganho térmico dos materiais opacos são a transmitância térmica, inércia térmica, condutividade térmica, absorvância solar, capacidade térmica, espessura e densidade.

Os fechamentos transparentes como janelas, portas externas envidraçadas e claraboias são responsáveis pelo contato visual com o exterior e a luz natural. Porém, estes devem ser especialmente avaliados nos projetos de edifícios, pois as principais trocas térmicas em uma edificação acontecem geralmente nestes elementos. O principal problema em um fechamento transparente é controlar a parcela transmitida diretamente, absorvida e reemitida para o interior (Lamberts; Dutra; Pereira, 2014; Lops *et al.*, 2023). Isso pode ser controlado pela quantidade de envidraçamento adequado para cada fachada, pela especificação de vidros especiais e por sombreamentos. Por exemplo, a pesquisa de Koç e Kalfa (2021) demonstram que a utilização de sombreamento externo em edifícios pode reduzir o consumo de energia de refrigeração entre 37% e 49%.

A quantidade de calor que penetra em um ambiente através de uma janela varia de acordo com o seu fator solar, o qual pode ser entendido como a razão entre a quantidade de energia solar que atravessa a janela pelo que nela incide. Para o vidro simples, o fator solar é aproximadamente 0,87, o que significa que 87% da radiação solar incidente sobre a janela com vidro simples e sem proteção penetra no interior (American Society of Heating, 1993).

Outro aspecto extremamente relevante para as condições térmicas dos edifícios é o tratamento de fachadas quanto à orientação solar. Ao analisar o percurso solar na cidade de Brasília, por exemplo, é possível perceber as fachadas oeste e norte podem ser problemáticas se não devidamente sombreadas, pois recebem radiação solar intensa principalmente no período vespertino, o qual apresenta temperaturas mais altas. A fachada Leste também recebe radiação solar direta, mas em momentos menos quentes do dia. Já a fachada Sul, recebe menos radiação direta do que a fachada Norte, porém ainda assim é preocupante pois recebe insolação nos meses de verão que normalmente são muito quentes (Figura 5). Desta forma, deve ser feito um estudo adequado de materiais empregados, envidraçamento e sombreamentos de acordo com cada fachada, pois a presença do sol direto incidente nestas superfícies nos períodos do dia com temperaturas do ar mais altas incrementa o fluxo de calor para o interior.

Figura 5- Carta solar de Brasília



Fonte: *Software Sol-ar*, adaptado pela autora.

As medidas de eficiência energética para projetos de habitações podem ser divididas em critérios relacionados a três aspectos principais (Triana; Lamberts; Sassi, 2018):

- Melhoria do desempenho térmico: inclui redução da radiação direta no verão, redução do efeito de ilha de calor, aumento da ventilação e melhoria do desempenho térmico da envoltória;
- Redução no consumo energético – lado da demanda: inclui o uso de iluminação artificial, ar-condicionado, eletrodomésticos e equipamentos eficientes;
- Redução no consumo energético – lado da oferta: inclui o uso de energias renováveis.

Porém, além do consumo energético, o conforto dos ocupantes também deve ser considerado para criar edifícios efetivamente melhores (Martiskainen; Kivimaa, 2019).

Em geral, os ocupantes tendem a ser mais tolerantes a temperaturas mais elevadas em ambientes com ventilação natural do que em locais climatizados artificialmente. Estudos sugerem que a experiência térmica passada influencia essa percepção, de modo que os usuários que passam mais tempo em ambientes com ar-condicionado têm sensações térmicas distintas daqueles em espaços naturalmente

ventilados (Wu *et al.*, 2019). Pessoas com histórico prolongado de exposição a ambientes naturalmente ventilados tendem a possuir uma melhor capacidade de regulação térmica em comparação com aqueles habituados aos sistemas de ar-condicionado (Ramos, 2020; Yu J *et al.*, 2012). Assim, pessoas com longa exposição ao ar refrigerado geralmente preferem essa condição estática em detrimento da ventilação natural, o que sugere uma dependência em uma condição térmica estática (Buonocore *et al.*, 2019; Cândido *et al.*, 2010; Vecchi; Cândido; Lamberts, 2016).

Essa adaptação térmica ou aclimação fisiológica desempenha um papel crucial na forma como os ocupantes respondem às condições ambientais (Yu J *et al.*, 2012). É agora amplamente aceito que os ocupantes de edifícios com ventilação natural tenham uma maior tolerância a gamas mais amplas de temperatura como resultado de adaptações psicológicas, fisiológicas e comportamentais, principalmente em condições quentes quando está calor no ambiente externo (Brager; de Dear, 2000).

Felizmente, pesquisas indicam que a maioria das pessoas no Brasil preferem abrir janelas a ligar o ar-condicionado em suas residências no Brasil. Ramos *et al.* (2021) demonstrou em sua pesquisa que 89% de todos os ocupantes entrevistados têm preferência por espaços com ventilação natural em suas casas. Além disso, apenas 17% das famílias brasileiras possuem ar-condicionado em suas residências (Eletrobras, 2019).

No entanto, o Plano Decenal Brasileiro de Energia Expansão (EPE, 2021b) prevê um aumento de quase 30% no consumo de energia relacionado com ar-condicionado entre 2021 e 2031. Esta previsão de aumento indica a necessidade de aumento em pesquisas para desenvolver equipamentos mais eficientes, além de incorporar planejamento de espaço para a expansão dos sistemas de refrigeração visando o futuro climático.

Contudo, considerando questões econômicas, sociais e climáticas, é essencial reduzir a necessidade de medidas de resfriamento ativo por estratégias de design passivo para evitar o consumo energético e emissões de CO<sub>2</sub>. As estratégias de projeto passivo são mais ecológicas e podem reduzir o consumo geral de energia de um edifício, levando a custos operacionais mais baixos. Além disso, as estratégias de projeto passivo

são normalmente menos dispendiosas de implementar do que as medidas de resfriamento ativo e exigem menos manutenção (Alwetaishi *et al.*, 2021).

Uma abordagem adequada que integre estratégias de resfriamento passivo, em conjunto com sistemas de resfriamento mecânico, tem o potencial de gerar economias de energia substanciais e proporcionar níveis mais elevados de satisfação aos usuários (Imam; Chen; Marshall, 2023).

## 2.5 Simulação termoenergética

Os diversos tipos de *software* de simulação de edifícios e desempenho ambiental estão em constante desenvolvimento e utilização há muitas décadas e têm a capacidade de avaliar uma ampla gama de respostas aos estímulos externos (Clarke, 2001). Estas ferramentas são excelentes maneiras de avaliar projetos de edifícios, pois permitem a análise das condições internas do edifício como ganho térmico, infiltração, equipamentos e ventilação, além da avaliação e melhorias no desempenho e avaliação de tecnologias alternativas (Crawley, 2003).

O projetista deve considerar muitos aspectos e estratégias diferentes sobre o ambiente do edifício para alcançar uma solução otimizada. Desta forma, o desenvolvimento de ferramentas computacionais é considerado essencial para auxiliar o processo de projeto (Hensen; Lamberts, 2019; Imam; Chen; Marshall, 2023).

As simulações termoenergéticas envolvem a geometria de construção e o seu desempenho. A precisão da geometria é influenciada pelos parâmetros incluídos na modelagem que variam de acordo com o projeto incluindo as dimensões do edifício, materiais de composição, configurações de equipamentos e ocupações (Bourisli; Altarakma; AlAnzi, 2018; Huang; Li, 2021). É importante que a etapa de modelagem de geometria seja desenvolvida com cautela, pois a assertividade dos resultados de desempenho termoenergético dependem da precisão dos dados inseridos e modelados.

Segundo a NBR 15575 vigente, os edifícios devem ser projetados e construídos para que durem pelo menos por 50 anos, sendo assim, tanto edifícios já existentes quanto

novos sofrerão os efeitos das mudanças climáticas (ABNT, 2013; Alves, 2014). Desta forma, as ferramentas de simulação de edifícios são um dos componentes críticos necessários para avaliar e otimizar o desempenho do ambiente construído pois permite a previsão do comportamento de edifícios em cenários futuros e o planejamento para adaptação à novas condições (Imam; Chen; Marshall, 2023). A integração da modelagem de simulação de desempenho de edifícios desde os estágios preliminares do projeto é essencial para avaliar estratégias de projeto mais adequadas e adaptadas devem ser seguidas.

As mudanças nas necessidades energéticas nos próximos anos serão significativamente influenciadas pela localização geográfica (Bazazzadeh *et al.*, 2021; Ciancio *et al.*, 2020; Stagrum *et al.*, 2020). Aspectos como as mudanças climáticas, o tipo de edifício sob investigação e a localização geográfica, influenciaram muito os resultados dos estudos indicando a necessidade de análise específica de regiões e locais individualmente (P. Tootkaboni; Ballarini; Corrado, 2021; Pérez-Andreu *et al.*, 2018).

Os edifícios desempenham um papel significativo no alcance de soluções energéticas urbanas resilientes por serem grandes consumidores de energia e responsáveis por proporcionar conforto térmico interior. Isto reforça ainda mais a necessidade por analisar o desempenho por simulações, considerando arquivos climáticos futuros para a adaptação às alterações climáticas nas áreas urbanas (Nik; Moazami, 2021; Nik; Perera; Chen, 2021).

## 3 REVISÃO DE LITERATURA: MUDANÇAS CLIMÁTICAS

### 3.1 Revisão sistemática da literatura

O planeta passa por um processo natural em que a atmosfera permite a entrada de parte da radiação solar de ondas curtas e, posteriormente, reirradia ondas longas de volta ao espaço. No entanto, as intervenções ambientais humanas incluindo a emissão de CO<sub>2</sub>, enfraqueceram a capacidade mundial enviar esta radiação de ondas longas de volta ao espaço, que é a principal causa do aquecimento global (IPCC, 2014a). O Painel Intergovernamental sobre Alterações Climáticas (IPCC) da ONU mostra uma variação potencial de alterações de temperatura de 2 a 5°C até 2100 (Calvin *et al.*, 2023; IPCC, 2014b).

No meio científico, majoritariamente, evidências indicam que o aquecimento global é o principal contribuinte para o aumento das alterações climáticas (de Wilde & Coley, 2012). Consequentemente, as mudanças climáticas geram condições de temperaturas mais elevadas, registros mais frequentes de temperaturas diárias quentes, mudanças na precipitação, subida no nível do mar (Tebaldi *et al.*, 2021) e um prolongamento das estações secas (IPCC, 2022a).

Devido às alterações climáticas, espera-se um maior número de eventos climáticos extremos no futuro (Chen *et al.*, 2018; United Nations Climate Change, 2019), com frequências mais elevadas e magnitudes mais fortes afetando tanto a procura como a oferta de energia (Perera *et al.*, 2020). Em Vancouver no Canadá, por exemplo, o aumento das ondas de calor fez com que 1.000 recordes de temperatura fossem quebrados em 11 dias. Estas ocorrências causaram a morte de 595 pessoas, deixando cidades inteiras completamente queimadas e colheitas destruídas (Little, 2021).

Já no Brasil, novos recordes de precipitação são registrados atualmente (Abreu *et al.*, 2023; de Oliveira Roza *et al.*, 2024; Ferreira, 2023). A quantidade de chuva no litoral norte do Estado de São Paulo foi superior a 650 mm em menos de dois dias e deslizamentos de terra e tragédias com uma população socioeconomicamente vulnerável

marcam esse extremo climático (Ferreira, 2023). Outros estudos indicam que ondas de calor historicamente sem precedentes afetarão mais de metade da população da China (Zhang; Ren; You, 2024).

Tais eventos extremos e as consequentes falhas em cascata podem colocar cargas adicionais sem precedentes nos sistemas energéticos, perturbar o bom funcionamento dos edifícios e dos sistemas energéticos e pôr em risco o conforto térmico e a saúde das pessoas. Além disso, os efeitos econômicos dos extremos climáticos também são significativos em diferentes escalas, tais como a deterioração dos sistemas energéticos (Cronin; Anandarajah; Dessens, 2018), aumento dos custos de saúde (Gasparini; Guo; Hashizume, 2015; Jessel; Sawyer; Hernández, 2019), cortes de energia e em plataformas essenciais do dia a dia moderno (Campbell, 2012). Os choques climáticos influenciam o desempenho dos sistemas energéticos urbanos tanto na procura (Yang; Javanroodi; Nik, 2021) como na oferta (Perera *et al.*, 2020).

Os relatórios do IPCC constantemente destacam o papel significativo que as atividades humanas desempenharam no aquecimento do sistema climático (IPCC, 2014b, 2021, 2022a). Este dano tem um efeito adverso no ambiente construído, afetando diretamente a procura de arrefecimento dos edifícios (Hasan *et al.*, 2021a), o que intensificará ainda mais o consumo energético, emissões de CO<sub>2</sub> e as mudanças climáticas, gerando um ciclo vicioso. Além disso, a constatação de que os recursos do planeta são limitados faz com que a questão energética global se torne prioritária, já que o consumo exacerbado de energia atual não é sustentável para o futuro (Berardi, 2017; Jankovic, 2019).

Portanto é crucial que sejam implementadas ações que visem simultaneamente a conservação de energia e a prevenção do sobreaquecimento, orientadas por uma atualização futura dos regulamentos de construção (Climate Change Committee - CCC, 2021; Forastiere *et al.*, 2023; Kovats; Brisley, 2021).

O progresso na mitigação das emissões tem sido impulsionado por políticas nacionais e colaborações internacionais (Eletrobrás *et al.*, 2021; Eli *et al.*, 2021; European Environment Agency - EEA, 2021; Krelling *et al.*, 2020; Sorgato *et al.*, 2014). No entanto, o IPCC enfatiza que é necessária uma redução mais substancial dos gases com efeito

de estufa para evitar que a temperatura global exceda 1,5 °C, indicado como o limite de aquecimento para que não ocorram consequências climáticas catastróficas (IPCC, 2022b).

Além da necessidade de alcançar objetivos mais ambiciosos de mitigação sobre mudanças climáticas nos próximos anos, a adaptação também deve ser considerada como prioridade, uma vez que o clima já sofreu mudanças e o impacto já é visível em diferentes localidades pelo mundo (Cui *et al.*, 2022). A exposição ao calor no ambiente construído, especialmente em residências, foi reconhecida como uma das maiores prioridades da adaptação às mudanças climáticas no Reino Unido, por exemplo (Climate Change Committee - CCC, 2021).

Estima-se que a operação de edifícios seja responsável por mais de 35% do consumo global de energia e aproximadamente 40% das emissões de gases de efeito de estufa, o que demonstra a importância do ambiente construído, principalmente em sua fase de operação, em relação ao aquecimento global e mudanças climáticas (de Wilde; Coley, 2012; Kampelis *et al.*, 2020; UNEP - United Nations Environment Programme, 2020).

Muitos autores avaliaram a influência do aumento global da temperatura no desempenho energético de edifícios e demonstram que o clima cria condições que levam as pessoas a comprarem e utilizarem mais aparelhos de resfriamento em verões mais quentes (Andrić; Koc; Al-Ghamdi, 2019; Cabeza; Chàfer; Mata, 2020; Cui *et al.*, 2022; Escandón *et al.*, 2019; Hasan *et al.*, 2021b; Kesik; O'brien; Ozkan, 2022; Li; Yang; Lam, 2012; Pokhrel; González-Cruz, 2021; Steg, 2008).

Além do aquecimento global, estudos indicam que o aumento da população e o crescimento dos rendimentos causarão um aumento significativo do consumo energético global por ar-condicionado principalmente no setor habitacional (Eletrobras, 2019; EPE, 2022b; Santamouris, 2016; Strengers; Maller, 2011). A Agência Internacional de Energia – IEA (2022) estima que o número de pessoas com necessidade de uso de ar-condicionado suba de 5 milhões para 7 milhões em 2050, com 90% deste crescimento a ocorrer nos países em desenvolvimento.

Buscando alcançar uma visão ampla sobre o tema, foi conduzida uma revisão sistemática da literatura recente a respeito do conforto térmico, eficiência energética e a mitigação das alterações climáticas nos edifícios utilizando análises por simulação computacional ou modelos energéticos com os seguintes objetivos:

- Identificar tendências de pesquisas e focos de conhecimento;
- Identificar distribuições geográficas de pesquisas, em termos de países, contextos econômicos e climas.
- Identificar lacunas de pesquisa.

A maioria das análises bibliométricas utiliza dados das mesmas fontes: Web of Science (WoS) e Elsevier's Scopus. Até a criação do Scopus e do Google Scholar em 2004, a WoS era a única ferramenta para análise de citações (Harzing; Alakangas, 2016; Harzing; van der Wal, 2008). No entanto, a falta de controle de qualidade no Google Scholar levanta questões sobre sua adequação como ferramenta bibliométrica (Aguillo, 2012).

A plataforma Scopus contém mais de 20.000 periódicos revisados por pares de 5.000 editoras, juntamente com 1.200 periódicos de acesso aberto, mais de 600 publicações comerciais, 500 anais de conferências e 360 séries de livros de todas as áreas da ciência. Abrange mais de 49 milhões de registros, incluindo publicações comerciais, periódicos de acesso aberto e séries de livros (Chadegani *et al.*, 2013; Falagas *et al.*, 2008). O Scopus cobre uma gama mais ampla de tópicos quando se trata de periódicos, mas é limitado a publicações mais recentes em comparação com o WoS (Vieira; Gomes, 2009), a qual é composta por sete bancos de dados de citações diferentes, incluindo periódicos, conferências, relatórios, livros e séries de livros (Falagas *et al.*, 2008).

As bases de busca WoS e Scopus permanecem hoje as principais fontes de dados de citações (Chadegani *et al.*, 2013), portanto, foram as fontes escolhidas para desenvolver a revisão sistemática da literatura em questão. Para que a pesquisa tenha o

ênfoque nos trabalhos mais relevantes e atuais, a busca foi filtrada apenas em artigos e em um recorte temporal dos cinco últimos anos – de 2019 a 2023.

Para a definição das palavras de busca (*strings*) e combinações de palavras-chave, foram feitos diversos testes para que a pesquisa apresentasse um número seletivo de artigos que representasse bem a temática. Desta forma foram escolhidas as seguintes palavras de busca:

- “climate change” AND (architecture OR design OR building) AND (“thermal comfort” OR “energy efficiency” OR “building performance”) AND (“building simulation” OR BEM OR “energy analysis” OR “energy modeling”).

Os artigos encontrados foram analisados então quanto ao ano de publicação, continente e nível de desenvolvimento dos países de publicação, além de autores mais recorrentes e palavras-chave mais utilizadas.

Para refinamento dos dados encontrados, foi feita uma filtragem inicial dos artigos mais adequados ao tema a partir da leitura dos títulos com o objetivo de eliminar artigos não relacionados diretamente com o tema-chave de impacto das mudanças climáticas no desempenho térmico de edifícios. Os artigos que passaram por este filtro, foram analisados quanto ao foco do estudo, tipologia do objeto de estudo, softwares utilizados e climas estudados.

Por fim, a partir da leitura dos resumos, palavras-chaves e conclusões foram selecionados os artigos mais relevantes para serem lidos integralmente com o objetivo de mapear as principais linhas de pesquisa, metodologias, dados coletados e ideias abordadas.

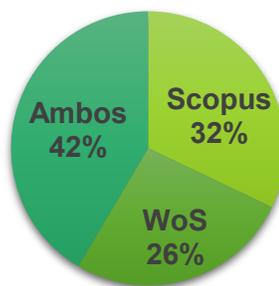
### **3.1.1 Resultados encontrados**

As pesquisas de artigos a partir das palavras de buscas selecionadas nos últimos 5 anos alcançou o número de 108 documentos na plataforma de busca Web of Science e 117 documentos na plataforma de busca Scopus. Considerando que há 66 artigos em comum entre as plataformas, o número total de documentos encontrados sem sobreposição foi de 159.



Observa-se que houve uniformidade na quantidade de artigos encontrados em ambas as plataformas de busca, sendo que 42% dos artigos apareceram repetidamente. A plataforma Scopus foi levemente mais representativa que a WoS, como pode ser evidenciado pelo Gráfico 5.

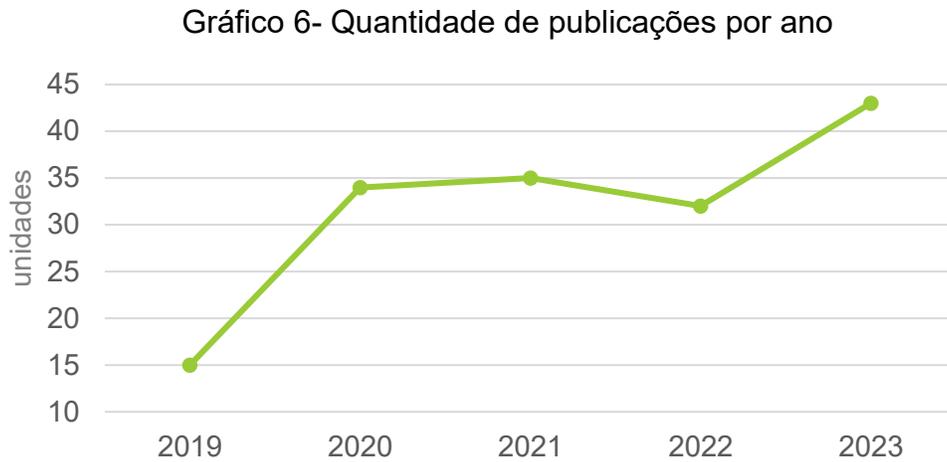
Gráfico 5- Quantidades de artigos encontrados por plataformas de busca



Fonte: autoria própria, 2024.

A partir dos dados coletados, foi possível perceber a tendência de crescimento nas pesquisas a respeito do impacto das mudanças climáticas no desempenho de edifícios nos últimos anos (Gráfico 6). O ano de 2020 apresentou elevado crescimento nos artigos publicados neste tema com mais que o dobro das publicações do ano anterior. O ano de 2021 apresentou crescimento sutil e o ano de 2022 foi o único ano que apresentou pequena queda nas publicações em relação aos dois anos anteriores, mas ainda com mais que o dobro de publicações comparado a 2019. Os anos de 2020 a 2022 foram fortemente marcados pela pandemia de covid-19, o que pode ter impactado o desenvolvimento e incentivo de novas pesquisas nos anos de 2021 e 2022. Já em 2023, se intensificou a tendência de crescimento nas publicações, com uma crescente de 2,87

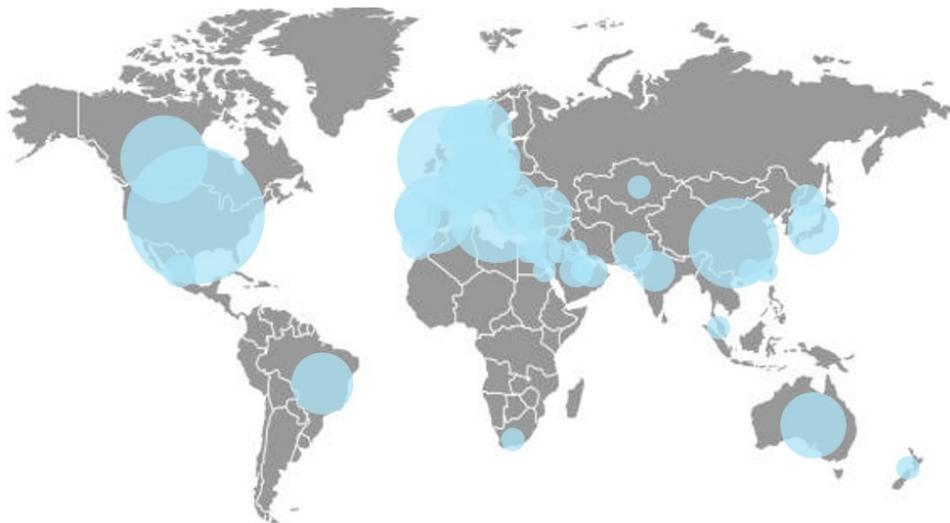
vezes na quantidade de artigos publicados em comparação com o primeiro ano analisado.



Fonte: autoria própria, 2024.

Ao analisar os países de publicação, percebe-se que os Estados Unidos da América lideram as pesquisas na área, com 75% de publicações acima do segundo país na lista de países, o Reino Unido. O Brasil aparece na lista entre os dez países com mais publicações, mas com o mesmo número de artigos de países como Alemanha e Suécia, os quais possuem extensão territorial e população muito menor que o Brasil que, por sua vez, apresenta dimensões continentais (Ritchie *et al.*, 2023).

Figura 6- Publicações de artigos por países.



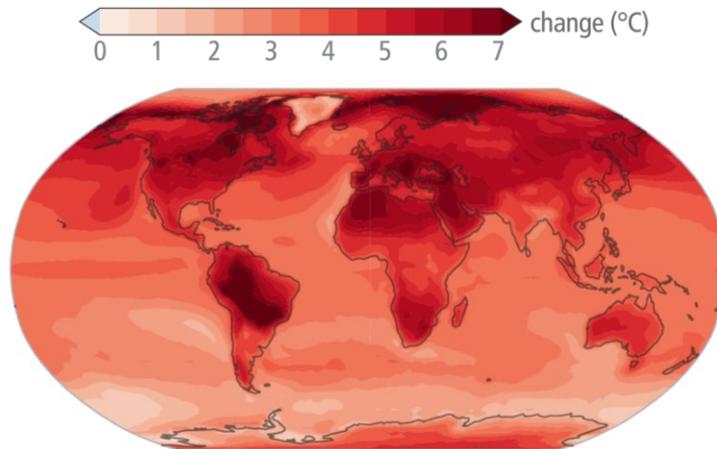
Fonte: autoria própria, 2024.

Apesar dos Estados Unidos liderarem a lista de países que mais publicaram artigos no tema em questão, ao analisar grupos de países em conjuntos de seus continentes e subcontinentes, a Europa foi o continente que mais contribuiu. Este continente apresentou mais que o dobro dos artigos publicados pelo subcontinente da América do Norte, segundo colocado na lista (Figura 6). Isso porque, apesar de ter extensão territorial 2,3 vezes menor que a América do Norte, a Europa possui 50 países e muitos deles apresentaram quantidades relevantes de artigos, o que faz com que este seja o continente mais representativo nas publicações.

A análise de publicações por países e continentes indica a baixa representatividade nas pesquisas de países em desenvolvimento ou Sul global. Estes apresentam maior vulnerabilidade às mudanças climáticas por terem menores investimentos em mitigação e adaptação, além da pior qualidade construtiva em habitações de interesse social (Escandón *et al.*, 2019; Triana; Lamberts; Sassi, 2018; Valdenebro; Dietrich; Ino, 2019). Ademais, o agravamento das condições térmicas interiores nas habitações impactará mais gravemente em grupos sociais economicamente vulneráveis, uma vez que estes não têm condições de adquirir e manter sistemas de ar-condicionado (Coley; Kershaw, 2010; Santamouris; Kolokotsa, 2015).

Além da vulnerabilidade econômica, o IPCC indica que o aquecimento global não será uniforme em todo o planeta e algumas regiões terão maior diferença de temperaturas que outras regiões. Nas pesquisas a respeito de previsões de alterações no clima futuro, há diferentes cenários que variam de acordo com as futuras emissões de CO<sub>2</sub>, onde o cenário mais pessimista alcançaria média de aumento na temperatura global acima de 4°C (Calvin *et al.*, 2023). Porém, em algumas localidades como no Brasil, por exemplo, seria possível alcançar o aumento em 7°C na temperatura neste cenário (Figura 7). Este dado demonstra a importância de conduzir mais estudos de forma heterogênea no mundo, especialmente com enfoque em localidades com maior impacto no aumento de temperaturas e vulnerabilidade econômica e social da população.

Figura 7- Projeções de mudança máxima de temperatura (°C) considerando o cenário de aquecimento global pessimista de 4°C



Fonte: Calvin et al., (2023).

O Gráfico 7 demonstra que os países desenvolvidos representam aqueles que concentram a extrema maioria com 83% das publicações de artigos a respeito de mudanças climáticas e edifícios, evidenciando que a renda e o IDH dos países influenciam na quantidade de pesquisas desenvolvidas, enquanto apenas os 17% restantes são trabalhos publicados no Sul Global.

Gráfico 7- Quantidade de artigos de acordo com desenvolvimento de países

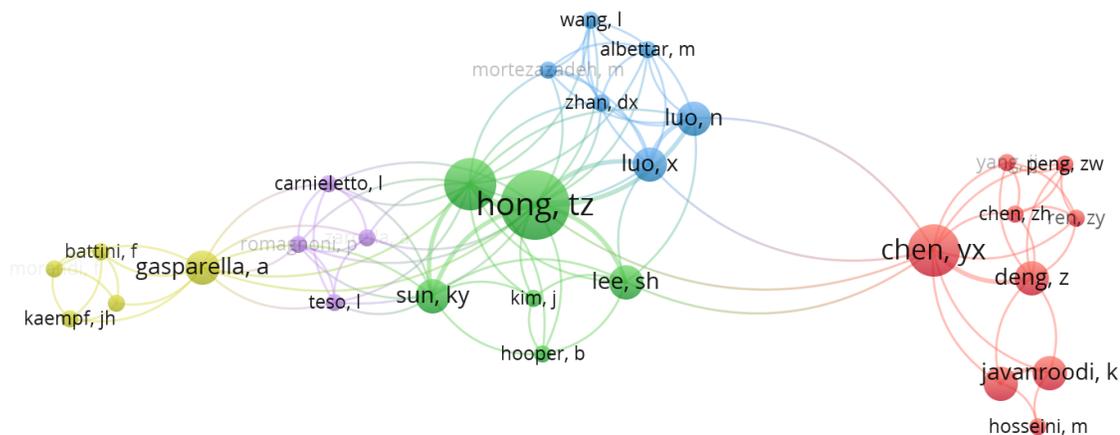


Fonte: autoria própria, 2024.

As correlações entre autores e palavras-chave foram analisadas com o software de análise bibliométrica VOSviewer, um software disponível gratuitamente para geração de mapas bibliométricos de campos que implementa a visualização de mapeamento de semelhanças técnicas, transformando a análise dados bibliométricos em forma mapas de forma didática (van Eck; Waltman, 2010).

Os autores que mais contribuíram com as pesquisas científicas na área foram mapeados na imagem abaixo, sendo os autores com mais publicações Hong, T. Z.; Chen, Y. X.; e Zhang, W. N. (Figura 8). Os trabalhos dos autores abordam os temas clima urbano, modelo energético de edifícios e performance de edifícios residenciais (Chen *et al.*, 2023; Deng *et al.*, 2023; Han; Wang; Zhang, 2021; Hong *et al.*, 2020). Foi possível perceber com a análise a partir da ferramenta que a maioria das publicações não são conectadas entre elas e não fazem parte de clusters. Dos 907 autores e coautores dos artigos publicados, apenas 30 estão interconectados, o que é um indicativo de que as pesquisas estão sendo desenvolvidas isoladamente e com pouca correlação.

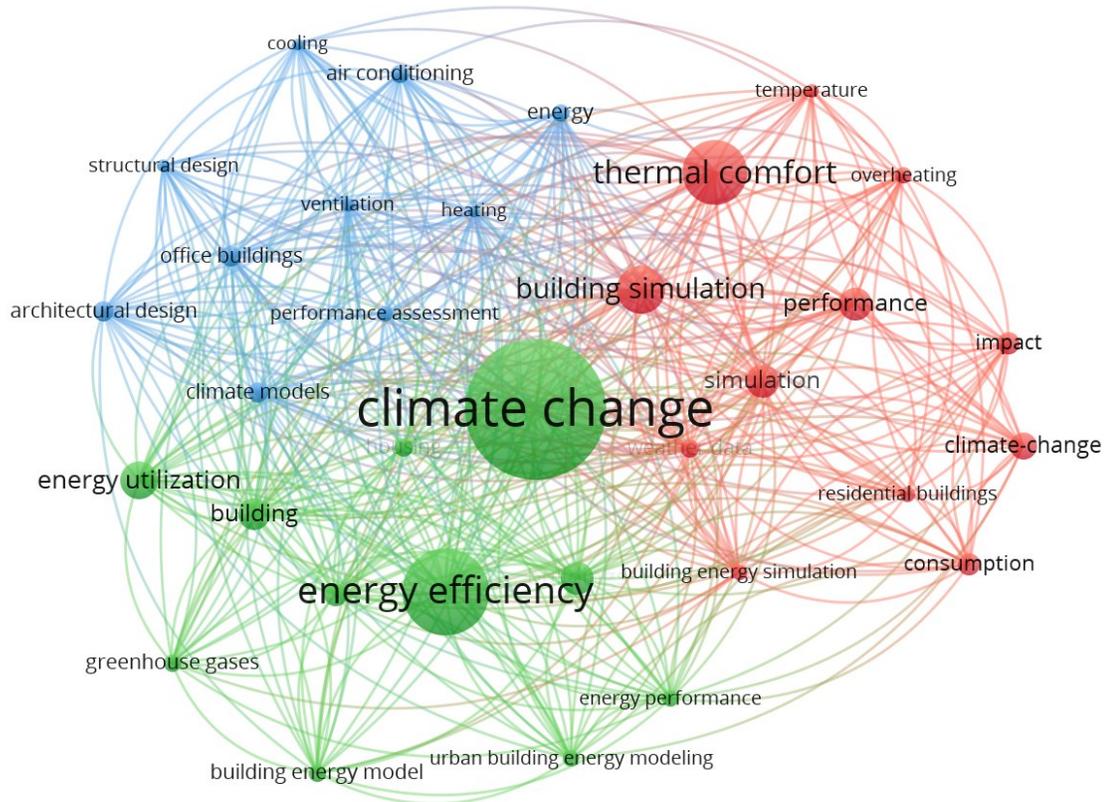
Figura 8- Autores com mais publicações de artigos



Fonte: autoria própria, 2024.

As palavras-chaves mais recorrentes foram “*climate change*”, “*energy efficiency*”, e “*thermal comfort*”, seguidas de “*building simulation*”, “*performance*”, “*energy utilization*” e “*simulation*” (Figura 9).

Figura 9- Palavras-chave mais recorrentes em arquivos

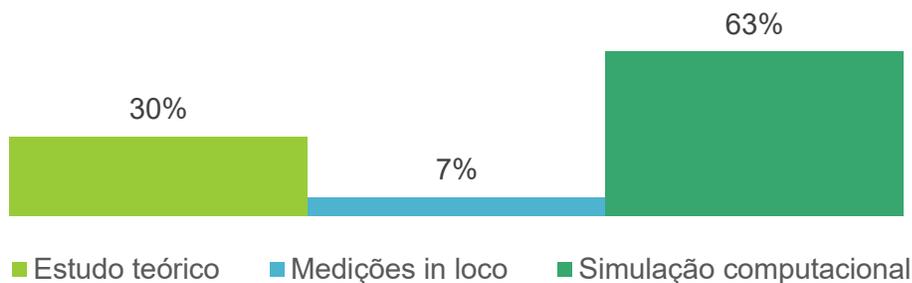


Fonte: autoria própria, 2024.

Após esta análise inicial relativa a todos os 159 artigos encontrados a partir das palavras de buscas, foram selecionados 83 artigos considerados os mais adequados ao tema pela leitura dos títulos para refinamento dos dados encontrados.

A verificação dos artigos selecionados indicou que a maioria dos estudos (63%) envolveu simulação computacional, enquanto a minoria dos estudos (7%) se baseou em medições in loco. Isto indica a tendência das pesquisas envolvendo ferramentas computacionais para estimar a performance de edifícios e prever situações ainda não evidenciadas. Também há grande ocorrência de pesquisas (30%) no campo teórico, como avaliações de planos de redução de consumo, revisões sistemáticas da literatura, comparações de softwares, métodos estatísticos e testes de novas ferramentas (Gráfico 8).

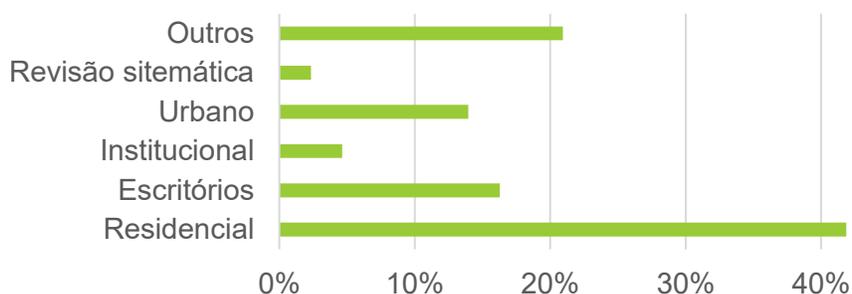
Gráfico 8- Tipos de estudo de artigos publicados.



Fonte: autoria própria, 2024.

Quando analisados os objetos de estudo dos artigos avaliados, é possível identificar a tipologia residencial como a mais presente nas pesquisas, sendo o objeto de estudo de 42% dos 83 trabalhos filtrados. A tipologia de escritórios foi o foco de 16% dos artigos, e o meio urbano 14%. Mais de 20% dos artigos envolvem usos diversos como laboratórios, indústrias, supermercados, entre outros (Gráfico 9).

Gráfico 9- Tipologia do objeto de estudo



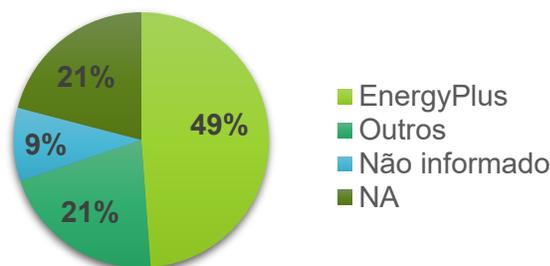
Fonte: autoria própria, 2024.

A análise dos tipos de software utilizados excluiu os artigos que não utilizaram avaliações computacionais. Como era esperado, o software mais utilizado foi o EnergyPlus, uma vez que este é o motor de cálculo mais utilizado mundialmente para a simulação de edifícios (Herrera, Manuel *et al.*, 2017). Por outro lado, 26% das pesquisas utilizaram outros softwares ou metodologias de trabalho como TAS software<sup>1</sup>, câmeras

<sup>1</sup> TAS Software - Thermal Analysis Software: ferramenta de simulação termoenergética.

de radiômetro infravermelho<sup>2</sup>, FirstRate5<sup>3</sup>, LCA software<sup>4</sup>, entre outros. Uma parcela menor dos artigos que envolveram simulações computacionais (12%) não informou os softwares utilizados, apenas os resultados e análises de dados extraídos (Gráfico 10).

Gráfico 10- Softwares utilizados em artigos



Fonte: autoria própria, 2024.

Diversas localidades e climas foram analisados nos artigos em questão. Buscando alcançar uma visão ampla e quantitativa dos climas mais e menos abordados nos estudos, os climas foram agrupados nas zonas climáticas do mundo: zona glacial ártica, zona temperada do norte, zona tropical, zona temperada do sul e zona glacial antártica (Figura 10).

Figura 10- Zonas climáticas do mundo



Fonte: Marques, (2023), adaptado pela autora.

<sup>2</sup> Câmeras de radiômetro infravermelho: ferramenta de captação de imagens de radiações infravermelhas para indicar temperaturas em fachadas e ambientes.

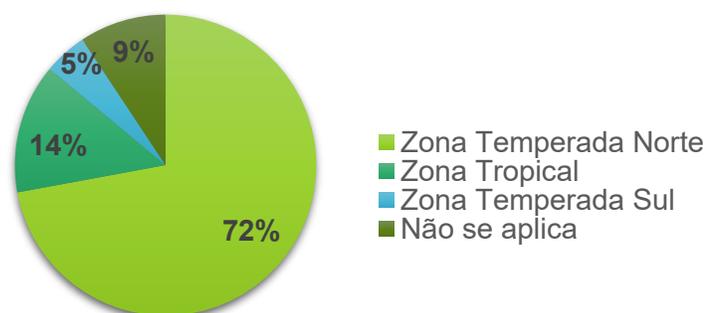
<sup>3</sup> FirstRate5 – House Energy Rating Software: ferramenta de simulação termoenergética para gerar classificações de eficiência energética de casas.

<sup>4</sup> LCA Software – Life Cycle Assessment Software: ferramenta de simulação de Análise de Ciclo de Vida

A partir do Gráfico 11 é possível constatar que a grande maioria dos estudos a respeito dos impactos de mudanças climáticas em edifícios se concentra na Zona Temperada do Norte, com a representatividade de 72%. Por outro lado, as zonas Tropical e Zona Temperada Sul representam a minoria de estudos de casos, com 14% e 5%, respectivamente.

É importante ressaltar que a distribuição populacional e de países não se dá de forma uniforme pelo globo. É natural que haja maior concentração de publicações onde há maiores densidades populacionais como é o caso da zona temperada do Norte. No entanto, a representatividade da pesquisa de outras zonas climáticas é essencial, pois a emergência climática afetará todo o globo terrestre.

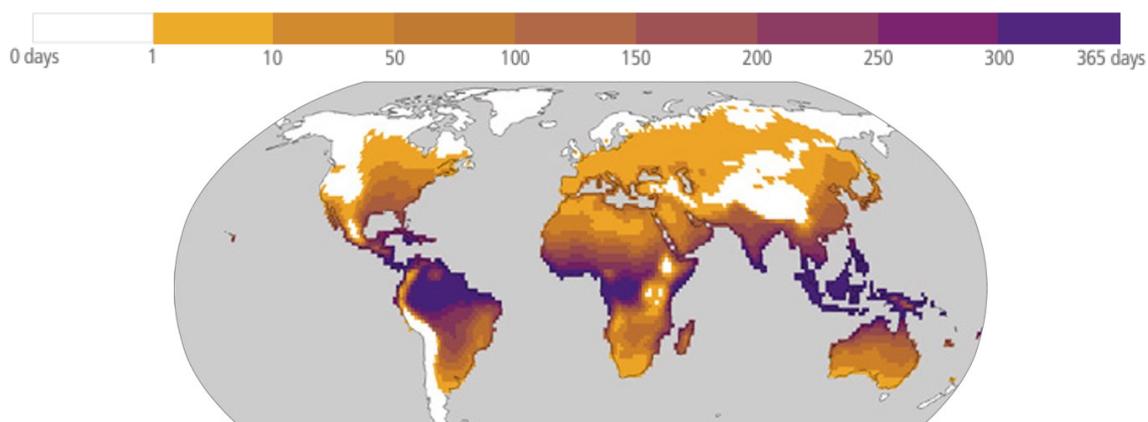
Gráfico 11- Quantidades de artigos por zonas climáticas no mundo



Fonte: autoria própria, 2024.

O resultado do Gráfico 11 é especialmente preocupante porque demonstra que a Zona Tropical apresenta pequena representatividade nas pesquisas recentes sobre as mudanças climáticas apesar de ser a zona climática que apresentará maiores riscos de mortalidade por superaquecimento devido ao aquecimento global. A Figura 11 ilustra a quantidade de dias por ano em que haverá risco de hipertermia que representa um risco de mortalidade no mundo caso haja aumento superior a 4°C conforme previsto no cenário pessimista de emissões de CO<sub>2</sub> no futuro (Calvin *et al.*, 2023).

Figura 11- Dias por ano em que as condições combinadas de temperatura e umidade representam um risco de mortalidade para os indivíduos



Fonte: Calvin et al., (2023).

A mortalidade devido ao excesso de calor é altamente influenciada por aspectos socioeconômicos, ocupacionais e outros determinantes não climáticos da saúde individual e da vulnerabilidade socioeconômica (Calvin *et al.*, 2023). Idosos, pacientes que sofrem de doenças cardiovasculares, diabetes e outras doenças crônicas correm grave risco de temperaturas extremamente quentes (Weiss *et al.*, 2006).

Visando mapear as linhas de pesquisa mais relevantes e principais avanços e tópicos abordados nos artigos, foram selecionados 43 artigos mais adequados ao tema desta dissertação para leitura integral a partir da leitura dos resumos, palavras-chaves e conclusões dos 83 artigos já selecionados no filtro anterior. A partir da leitura destes artigos, foi gerada a Tabela 1 compilando os títulos, autores e demais informações relevantes a respeito dos tipos de pesquisa, software utilizado, anos analisados, país, clima e usos de objetos de análise.

Tabela 1- Quadro resumo de artigos lidos integralmente

Título artigo	Autores, Ano	Tipo análise	Objeto de estudo	Software	Anos BEM	Local analisado
<b>Application of sustainable prefabricated wall technology for energy efficient social housing</b>	Chippagiri R.; Gavali H.R.; Ralegaonkar R.V.; Riley M.; Shaw A.; Bras A. - 2021	Simulação energética Análise de custo e eficiência	Residência unifamiliar (casa)	BIM software tool	2021	Índia

<b>A Systematic Review on the Existing Research, Practices, and Prospects Regarding Urban Green Infrastructure for Thermal Comfort in a High-Density Urban Context</b>	Wai C.Y.; Tariq M.A.U.R.; Muttill N. - 2022	Revisão sistemática	Urbano: Infraestrutura verde	Não se aplica	2012 a 2022	Mediterrâneo, grandes centros urbanos
<b>Comparative analysis of web of science and Scopus on the energy efficiency and climate impact of buildings</b>	Cabeza L.F.; Cháfer M.; Mata É. - 2020	Revisão bibliográfica	Análise de artigos publicados	Não se aplica	2013 a 2020	Não se aplica
<b>Energy effectiveness of passive cooling design strategies to reduce the impact of long-term heatwaves on occupants' thermal comfort in Europe: Climate change and mitigation</b>	Ozarisoy B. - 2022	Protótipo simulado para validação de dados + análise estatística dos resultados	Residencial (1 tipologia de casa)	EnergyPlus, Apache e Integrated Environmental Solutions (IES)	junho 2018	Sul Londres
<b>Predicting the impact of climate change on thermal comfort in a building category: The Case of Linear-type Social Housing Stock in Southern Spain</b>	Escandón R.; Suárez R.; Sendra J.J.; Ascione F.; Bianco N.; Mauro G.M. - 2019	Simulações termoenergéticas e análise de sensibilidade	Residencial HIS linear	E+ Matlab	2019 e 2050	Sudeste Espanha
<b>High-resolution impact assessment of climate change on building energy performance considering extreme weather events and microclimate – Investigating variations in indoor thermal comfort and degree-days</b>	Hosseini M.; Javanroodi K.; Nik V.M. - 2022	Simulações termoenergéticas no passado e futuro (passado usado para calibrar)	Residência unifamiliar (casa)	OS Rhinoceros Grasshopper Ladybug Honeybee DragonFly Urban Weather Generator	2010 2040 2070 2099	Sudeste Suíça
<b>Benchmarking the practice of validation and uncertainty analysis of building energy models</b>	Ohlsson K.E.A.; Olofsson T. - 2021	Revisão validação e análise de incertezas de BEM	Não se aplica	Não se aplica	Não se aplica	Não se aplica
<b>EMF 35 JMIP study for Japan's long-term climate and energy policy: scenario designs and key findings</b>	Sugiyama M.; Fujimori S.; Wada K.; Oshiro K.; Kato E.; Komiya R.; Silva Herran D.; Matsuo Y.; Shiraki H.; Ju Y. - 2021	Estudo de redução de emissões Japão	Políticas públicas, fonte energética.	Não se aplica	2019 e 2050	Japão
<b>Bridging the energy performance gap of social housing stock in south-eastern Mediterranean Europe: Climate change and mitigation</b>	Ozarisoy B.; Altan H. - 2021	Medições in loco desempenho energético	HIS	IRT, câmera de radiômetro infravermelho	2018	Sudeste mediterrâneo europeu
<b>AI-based campus energy use prediction for assessing the effects of climate change</b>	Fathi S.; Srinivasan R.S.; Kibert C.J.; Steiner R.L.;	Estimativas de uso energético por IA baseada no	Edifícios Campus Universidade	Desenvolvimento de IA - CEUP Tool	2041, 2057 e 2063.	Gainesville, Flórida

	Demirezen E. - 2020	histórico de consumo				
<b>Building stock energy modeling considering building system composition and long-term change for climate change mitigation of commercial building stocks</b>	Yamaguchi Y.; Kim B.; Kitamura T.; Akizawa K.; Chen H.; Shimoda Y. - 2022	Modelos estatísticos para comparar diferentes sistemas	Edifícios comerciais	EnergyPlus	2013-2030	Japão
<b>Investigating the potential impact of future climate change on UK supermarket building performance</b>	Hasan A.; Bahadori-Jahromi A.; Mylona A.; Ferri M.; Tahayori H. - 2021	Simulação termo-energética	Supermercado	thermal analysis simulation software	2021, 2050 e 2080	Londres
<b>Spatio-temporal changes among site-to-source conversion factors for building energy modeling</b>	Troup L.N.; Fannon D.J.; Eckelman M.J. - 2020	Simulação comparativa de fatores de conversão de energia da rede	Edifício comercial grande	EnergyPlus	2020 e 2050	Atlanta
<b>Investigating the impact of urban microclimate on building thermal performance: A case study of dense urban areas in Hong Kong</b>	Liu S.; Kwok Y.T.; Ren C. - 2023	Simulação de edifício considerando ou não o microclima urbano	Edifícios residenciais	MesoNH-TEB, Grasshopper Python, Honeybee, EnergyPlus	2023	Hong-Kong
<b>Improving energy efficiency of existing residential buildings using effective thermal retrofit of building envelope</b>	Far C.; Far H. - 2019	Simulação termo-energética	Edifícios residenciais	FirstRate5	2019	Sydney
<b>Imparting the values of energy simulation towards net-zero plus status</b>	Elzomor M.; Youssef O.; Ghaemi S.; Alaqtum T. - 2020	Diretrizes para net-zero	Edifícios comerciais	Não se aplica	2020	New York
<b>An integrated energy simulation model for buildings</b>	Kampelis N.; Papayiannis G.I.; Kolokotsa D.; Galanis G.N.; Isidori D.; Cristalli C.; Yannacopoulos A.N. - 2020	Calibração de modelos de simulação	Edifício de laboratório industrial	Open Studio, EnergyPlus	2017 e 2018	Macerata, Itália
<b>Toward a standardized framework for thermal resilience modelling and its practical application to futureproofing</b>	Kesik T.; O'Brien W.; Ozkan A. - 2022	Indicadores de autonomia térmica e habitabilidade passiva	Não se aplica	Não se aplica	2022	Não se aplica
<b>Application of the bin weather data for building energy analysis in the tropics</b>	Yau, YH; Wong, CM; Ong, HC; Chin, WM - 2020	Dados meteorológicos atualizados Malásia	Não se aplica	Não se aplica	Não se aplica	Malásia
<b>Using urban building energy modeling to quantify the energy performance of residential buildings under climate change</b>	Deng Z.; Javanroodi K.; Nik V.M.; Chen Y. - 2023	Simulação termo-energética de edifícios em escala urbana	Edifícios residenciais	UBEM tool—AutoBPS, EnergyPlus	2023 e 2050	Geneva

<b>Buildings energy consumption modeling methods</b>	Aimagambetov a Z.; Bektemyssova G.; Ibraeva Z. - 2020	Cálculos matemáticos para simular processos de transferência de calor	Edifício residencial	Fórmulas matemáticas	fev/20	Turquistão - Kasaquistão
<b>Invisible walls: Exploration of microclimate effects on building energy consumption in New York City</b>	Dougherty T.R.; Jain R.K. - 2022	Coletar dados de microclima por leituras de satélite e reanálises climáticas	Microclima urbano	Não se aplica	2023	New York
<b>Creating glazed facades performance map based on energy and thermal comfort perspective for office building design strategies in Asian hot-humid climate zone</b>	Hwang R.-L.; Chen W.-A. - 2022	Simulação de diferentes composições de fachadas envidraçadas	Edifício comercial	EnergyPlus	2022	Sudeste asiático
<b>Overheating assessment in Passivhaus dwellings: the influence of prediction tools</b>	Goncalves V.L.; Costanzo V.; Fabbri K.; Rakha T. - 2022	BEM e CFD	Edifício residencial	Rhinoceros, EnergyPlus, Grasshopper Ladybug Honeybee	2016	Cidades na Europa
<b>Towards Achieving Zero Carbon Targets in Building Retrofits: A Multi-Parameter Building Information Modeling (BIM) Approach Applied to a Case Study of a Thermal Bath</b>	Forastiere S.; Piselli C.; Pioppi B.; Balocco C.; Scurpi F.; Pisello A.L. - 2023	Proposta de retrofit para alcançar carbono zero	Casa de Banho	BIM importado em BEM (não informa quais)	2023	Sul da Itália
<b>On the assessment of alternatives for building cooling load reductions for a tropical coastal city</b>	Pokhrel R.; Ramírez-Beltran N.D.; González J.E. - 2019	Mitigação de onda de calor de 2014	Impacto de estratégias em edifícios em escala urbana	EnergyPlus	2014	San Juan, Porto Rico
<b>Double-Skin Façades for Building Retrofitting and Climate Change: A Case Study in Central Italy</b>	Lops C.; Di Loreto S.; Pierantozzi M.; Montelpare S. - 2023	Simulação termo-energética	Edifícios residenciais	DesignBuilder	2023, 2030 e 2070	Centro da Itália
<b>Building energy consumption modeling at urban scale: Three case studies in Europe for residential buildings</b>	Mutani G.; Todeschi V.; Kampf J.; Coors V.; Fitzky M. - 2019	Simulação termo-energética de edifícios em escala urbana	Edifícios residenciais	Não informa	Não informa	Europa
<b>The combined use of BIM, IR thermography and HFS for energy modelling of existing buildings and minimizing heat gain through the building envelope: a case-study from a UAE building</b>	Alhaidary H.; Al-Tamimi A.K.; Al-Wakil H. - 2021	BIM, Termografia infravermelha e sensores de fluxo de calor	Edifício comercial	Não informa	2019	Emirados Árabes Unidos
<b>Beyond energy savings: Investigating the co-benefits of heat resilient architecture</b>	Samuelson H.W.; Baniassadi A.; Izaga Gonzalez P. - 2020	Simulação termo-energética	Edifício residencial	EnergyPlus	2020	Chicago

<b>On the robustness of thermal comfort against uncertain future climate: A Bayesian bootstrap method</b>	Cui C.; Raslan R.; Korolija I.; Chalabi Z. - 2022	Simulação termo-energética	Edifício residencial	EnergyPlus e método Bayesiano (estatística)	2030, 2050, 2080	Inglaterra
<b>Influence of thermal enclosures on energy saving simulations of residential building typologies in European climatic zones</b>	Márquez-Martinón J.M.; Martín-Dorta N.; González-Díaz E.; González-Díaz B. - 2021	Simulação termo-energética	Edifício residencial	DesignBuilder e EnergyPlus	2021	Berlim, Helsink, Madrid
<b>Mitigation Options to Reduce Peak Air Temperature and Air-Conditioning Demand in the Context of a Warming Climate for a Tropical Coastal City</b>	Pokhrel R.; González-Cruz J.E. - 2021	Simulação urbana temperaturas e ar-condicionado	Urbano	WUDAPT LCZs	2012, 2052, 2096	Costa Rica
<b>Dynamically downscaled projection of urban outdoor thermal stress and indoor space cooling during future extreme heat</b>	Jiang T.; Krayenhoff E.S.; Voogt J.A.; Warland J.; Demuzere M.; Moede C. - 2023	Simulação de temperaturas urbanas externas	Urbano	WRF-BEP-BEM (não informa quais)	1999-2100	Phoenix e Toronto
<b>Urban building energy modelling-based framework to analyze the effectiveness of the community-wide implementation of national energy conservation codes</b>	Ramalingam Rethnam O.; Thomas A. - 2023	Simulação termoenergética de edifícios em escala urbana	Edifícios de uso misto, urbano	QGIS e IES (Intelligent Communities Lifecycle)	2021, 2030, 2040	Mumbai - Índia
<b>Impacts of climate change and building energy efficiency improvement on city-scale building energy consumption</b>	Chen Y.; Ren Z.; Peng Z.; Yang J.; Chen Z.; Deng Z. - 2023	Simulação termoenergética de edifícios em escala urbana	Edifícios comerciais, Urbano	Open Studio, AutoBPS	2023, 2050, 2080	Changsha - China
<b>Evaluation of climate change effects on residential building cooling and heating demands in New Zealand: implications for energy efficiency standards and building codes</b>	Jalali Z.; Shamseldin A.Y.; Mannakkara S. - 2023	Simulação termo-energética	Edifício residencial	Grasshopper e EnergyPlus	2020, 2050, 2080	Nova Zelândia
<b>Integrating Climate Change Projections in Building Performance Simulations: Case Study of 17 North American Cities</b>	Imam M.; Chen Y.; Marshall T. - 2023	Simulação termo-energética	Edifícios comerciais	Rhinoceros Grasshopper Ladybug Honeybee, EnergyPlus	2020, 2050, 2080	17 cidades EUA
<b>A review of approaches and applications in building stock energy and indoor environment modelling</b>	Dong J.; Schwartz Y.; Mavrogianni A.; Korolija I.; Mumovic D. - 2023	Comparação de tipos de modelagem de eficiência	Não se aplica	Não se aplica	2010-2023	Não se aplica

<b>Indoor comfort conditions assessment in educational buildings with respect to adaptive comfort standards in European climate zones</b>	Tagliabue L.C.; Accardo D.; Kontoleon K.J.; Ciribini A.L.C. - 2020	Simulação térmica	Edifício educacional	EnergyPlus	2020	Itália, Grécia e UK
<b>Model predictive control optimization via genetic algorithm using a detailed building energy model</b>	Ruiz G.R.; Segarra E.L.; Bandera C.F. - 2019	BEM com otimização por algoritmo genético	Edifício comercial	EnergyPlus e JEplus+EA	2017	Pamplona
<b>Key strategies for decarbonizing the residential building stock: Results from a spatiotemporal model for Leiden, the Netherlands</b>	Yang X.; Hu M.; Zhang C.; Steubing B. - 2022	Simulação termo-energética de edifícios em escala urbana	Edifícios residenciais	LCA software Activity Browser	2015-2050	Leiden, Holanda
<b>Energy analysis of Texas metropolitan areas for climate change mitigation using LiDar</b>	Felkner J.; Mbata E. - 2021	Simulação termo-energética	Urbano	PostgreeSQL, QGIS, LiDar, Grasshoper e CitySim	2020, 2050, 2070, 2100	Dallas

Fonte: autoria própria, 2024.

Devido ao próprio enfoque da revisão sistemática da literatura, a maioria dos artigos pesquisados envolvem simulações termoenergéticas com análise de previsibilidade de temperaturas. Como o artigo de Jalali *et al.* (2023), o qual simula um edifício residencial em 3 cidades da Nova Zelândia para verificar o impacto das mudanças climáticas na performance do edifício em 2020, 2050 e 2080. Neste caso, os resultados mostraram aumento no consumo de ar-condicionado de 89% em Auckland, 130% em Wellington e 48% em Christchurch. Enquanto haveria redução no consumo para aquecimento de 47% em Auckland, 57% em Wellington e 74% em Christchurch (Jalali; Shamseldin; Mannakkara, 2023). Os valores encontrados indicam que o balanço geral de energia será negativo no futuro para os diferentes casos avaliados, já que o aumento do consumo para resfriamento superará a redução do consumo para aquecimento.

Além deste pilar temático prioritário, também foi identificada uma tendência nas pesquisas sobre *machine learning* e inteligência artificial. Estes tópicos estão em alta e foram permeados nas metodologias de pesquisas de diversos artigos, como no artigo de Fathi *et al.* (2020), em que foi desenvolvida uma ferramenta de previsão do uso de energia do campus de uma universidade na Flórida para prever os efeitos de longo prazo das alterações climáticas no desempenho energético dos edifícios utilizando técnicas de inteligência artificial.

Além disso, como o tema envolve a projeção de condições climáticas futuras, inúmeras variáveis devem ser consideradas. Portanto, os usos de estudos estatísticos e aproximações matemáticas também foram constantes em muitos artigos, como no artigo de Cui *et al.* (2022) que avaliaram um caso de estudo na Inglaterra relativo ao conforto térmico frente às mudanças climáticas usando EnergyPlus e aplicando o método estatístico Bayesiano. Os resultados demonstraram maior superaquecimento durante a ocupação noturna e a ventilação natural como estratégia chave de melhora no conforto.

Questões relativas à mitigação e adaptação às mudanças climáticas também foram abordadas nos artigos, assim como esforços para reduzir o consumo energético aumentando a eficiência energética ou por estratégias de projeto novos ou *retrofits* (Far; Far, 2019; Kesik; O'brien; Ozkan, 2022; Liu; Kwok; Ren, 2023; Yamaguchi *et al.*, 2022). Um exemplo é o estudo de fachadas de vidro duplo e *brises* para *retrofit* de edifício na Itália que demonstra diminuição no consumo de energia de 37 a 56% em 2030 e de 42 a 59% em 2070 (Lops *et al.*, 2023).

Outro exemplo deste tipo de estudo é o artigo de Imam *et al.* (2023) que utiliza a ferramenta de simulação computacional para avaliar consumo de energia e conforto térmico usando em 17 cidades dos EUA com diferentes zonas climáticas para arquivos climáticos de 2020, 2050 e 2080. Este artigo avalia alterações nas estratégias passivas recomendadas para cada zona de acordo com a Carta de Givoni. Resultados sugerem que edifícios em zonas temperadas são suscetíveis a passar o consumo predominante de aquecimento para resfriamento, pois em todas as 17 cidades, haverá um crescimento da necessidade de resfriamento, redução da necessidade de aquecimento.

O crescimento na necessidade por refrigeração mais acentuado causado pelo aquecimento global é considerado especialmente preocupante mesmo em casos de redução da necessidade por aquecimento. Isto porque os equipamentos de aquecimento geralmente são mais eficientes em converter energia em calor do que os sistemas de ar-condicionado em converter energia em frio. Isso significa que menos energia é perdida no processo de aquecimento em comparação com o processo de resfriamento. Para reduzir o desconforto por calor, o ar-condicionado terá que retirar calor do ambiente para atingir a temperatura desejada, o que geralmente requer mais energia do que

simplesmente adicionar calor ao ambiente usando um sistema de aquecimento (Zhai; Helman, 2019).

No artigo de Rodrigues *et al* (2023), por exemplo, foi avaliado um edifício de escritórios em Portugal e as simulações mostram que as necessidades de energia térmica e a utilização de eletricidade reduzirão 60% em 2050 para aquecimento, mas aumentarão 67% para resfriamento. Já em 2080, o consumo energético será 77% menor para aquecimento, mas 121% maior para arrefecimento. Como resultado, o consumo global de eletricidade do edifício aumentará 24% em 2050 e 53% em 2080 (Rodrigues; Fernandes; Carvalho, 2023).

Além disso, mais um assunto em comum nas pesquisas recentes é a quantificação do desconforto térmico tanto em ambientes internos quanto no meio urbano devido não apenas ao aquecimento global, mas também às ilhas de calor. Tendo em vista que as mudanças climáticas já são realidade, alguns autores focam em quais são as possíveis medidas de adaptação, como no estudo proposto por Hosseini *et al.* (2022). Este estudo desenvolveu simulações de dois edifícios residenciais representativos na Suécia considerando o microclima e mudanças climáticas em 30, 60 e 90 anos.

Para este caso, foi demonstrado o aumento da taxa de refrigeração de 45% a cada 30 anos e nas horas de desconforto anuais por calor de 140%. Em relação à demanda por aquecimento, esta cairá 6% de 2039 para 2069 e 14% de 2039 para 2099 considerando o cenário mais otimista de mudanças climáticas (TDY). No entanto, o artigo indica a preocupação quanto à necessidade de resfriamento porque na Suécia os edifícios comumente não apresentam sistemas de refrigeração e a ventilação natural não foi suficiente para retirar o calor espaços interiores em climas futuros.

Segundo este artigo, a demanda por resfriamento aumentaria 4,5 vezes de 2039 para 2069 e mais 5,1 vezes de 2069 para 2099 no cenário mais otimista (TDY). Além disso, o pico da carga térmica de resfriamento aumentaria em 210% no primeiro período e mais 290% no segundo período. No pior cenário de eventos extremos (EWY), o uso de ar-condicionado aumentaria em 370% no segundo período e mais 350% no terceiro período (Hosseini; Javanroodi; Nik, 2022).

Hasan *et al.* (2021a) também utilizaram simulações termoenergéticas para prever consumo anual de energia, emissões de carbono e demanda de resfriamento e aquecimento em diferentes projeções climáticas de um supermercado em Londres. Neste caso, o consumo de energia aumentaria pelo menos 6,45% em 2050 e 11,5% em 2080. Já as emissões de CO<sub>2</sub> aumentariam pelo menos 6,24% em 2050 e 10,84% em 2080.

Outro exemplo é o artigo de Ozarisoy (2022) em que foram testadas de estratégias passivas de design combinadas em uma tipologia de casa no Reino Unido nas condições de ondas de calor de longo prazo que ocorreram no verão de 2018 na Europa. O artigo indica que as estratégias passivas aplicadas reduziram o desconforto térmico por calor no caso simulado e melhorariam a eficiência energética de até 53%.

### 3.1.2 Considerações a respeito da RSL

A partir da revisão sistemática da literatura, foi possível perceber o aumento na pesquisa do tema abordado ao longo dos anos, principalmente em relação à adaptação de edifícios quanto às mudanças climáticas por meio de simulações computacionais.

As tendências de pesquisa se concentram no uso de tecnologias e ferramentas computacionais para a quantificação do impacto do aquecimento global nos edifícios com a utilização de *softwares* computacionais de simulação termoenergética como o EnergyPlus, além de inteligência artificial e *machine learning*. Além disso, os edifícios residenciais se mostraram como o maior foco de objetos de pesquisas.

Foi possível perceber que as publicações se concentram em países desenvolvidos, onde há mais investimentos para pesquisas. Porém ressalta-se que populações em vulnerabilidade econômica e menor renda serão mais afetadas negativamente pelos extremos climáticos que já se mostram presentes. Tal impacto se dá por habitações precárias, falta de infraestrutura urbana adequada e orçamento insuficiente para adquirir e manter equipamentos de ar-condicionado. Portanto, há uma lacuna de pesquisas envolvendo esta temática em países com menores rendas e maiores desigualdades sociais.

Além disso, os focos de publicações se concentraram principalmente na zona climática temperada norte, demonstrando lacuna de pesquisa em demais zonas climáticas globais. A zona tropical é especialmente relevante às pesquisas porque é apontada pelo IPCC como principal ponto de risco por mortalidade devido ao superaquecimento.

## 3.2 Arquivos climáticos futuros

### 3.2.1 Métodos de estimativa de arquivos climáticos futuros

Os arquivos meteorológicos futuros têm as mesmas limitações que os arquivos meteorológicos atuais, mas também são ativamente ligados às incertezas associadas com as projeções de mudanças climáticas. Estas incertezas estão relacionadas a diversos fatores não apenas políticos, sociais e outros agravantes, mas principalmente de emissões futuras de gases do efeito estufa (GEE), como o dióxido de carbono, o gás metano e o óxido nitroso (IPCC, 2022b).

A abordagem mais utilizada na literatura para derivar um conjunto de dados climáticos de um ano a partir de registros climáticos históricos é o Ano Meteorológico Típico (TMY) (Herrera, Manuel *et al.*, 2017). O TMY representa um ano fictício composto por doze meses representativos que são selecionados com base na comparação da distribuição das variáveis climáticas de cada mês com a distribuição de longo prazo daquele mês específico no conjunto de dados climáticos disponíveis.

Normalmente, estes anos típicos desenvolvidos utilizam apenas dados históricos, desconsiderando os efeitos das mudanças climáticas. Isto limita as avaliações a um contexto fixo e que se tornará obsoleto nas próximas décadas. Para sanar esta problemática, foram desenvolvidos métodos para incorporar as condições climáticas futuras delineadas pelo Cenários do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) (Jentsch *et al.*, 2013; Machard *et al.*, 2020).

Estas projeções partem de modelos matemáticos intitulados Modelos Climáticos Globais (Global Climate Models – GCMs), que visam reproduzir processos físicos da

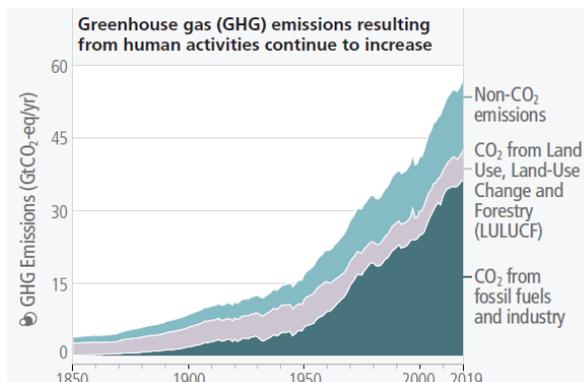
atmosfera, oceano, criosfera e superfície terrestre, estimando variáveis climáticas para anos futuros com base em diferentes cenários (P. Tootkaboni; Ballarini; Corrado, 2021).

Além da escala de condições climáticas globais, são considerados cenários socioeconômicos que compreendem um conjunto de narrativas de como a sociedade pode evoluir nas próximas décadas, levando a um perfil de emissões de gases de efeito estufa (GEE) definido como Percursos de Concentração Representativas (RCPs), que estabelecem as condições limites para simulações de GCMs (van Vuuren *et al.*, 2011).

Os RCPs indicam os possíveis cenários de emissões de GEE no futuro, sendo o RCP2.6 considerando uma mitigação rigorosa, os RCP4.5 e RCP6.0 são cenários intermediários de emissões e o RCP8.5 considera emissões de GEE elevadas. Os percursos socioeconômicos partilhados (SSPs) foram desenvolvidos para complementar os Percursos de Concentração Representativa (RCPs). Diferentes níveis de emissões e alterações climáticas ao longo da dimensão dos RCP podem, portanto, ser explorados no contexto de diferentes vias de desenvolvimento socioeconômico (SSP). A abreviatura SSP1, SSP2, ..., SSP5 é utilizada para denotar cenários socioeconômicos e o final das abreviaturas 1.9, 2.6, ..., 8.5 são utilizadas para denotar os cenários de emissões de GEE assim como os RCPs (Calvin *et al.*, 2023).

Infelizmente, o histórico de emissões demonstra crescimento acelerado nos últimos anos, o que indica resistência para adotar cenários otimistas, uma vez que as mudanças climáticas já são de conhecimento público há décadas e as ações mitigativas não se mostraram eficazes o suficiente para causar redução nas emissões (Figura 12).

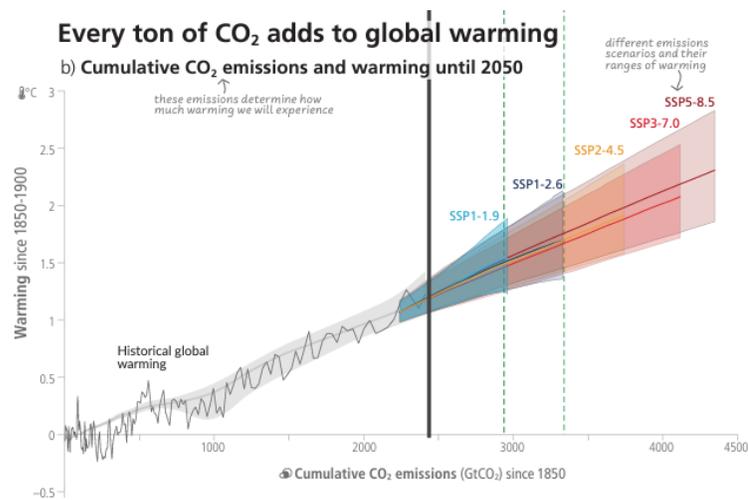
Figura 12- Histórico de emissões de GEE por principais causadores demonstrando aumento elevado desde a década de 1950



Fonte: Relatório do IPCC de 2023, pág. 43 (Calvin *et al.*, 2023).

A Figura 13 indica as previsões de aquecimento global considerando os diferentes cenários de emissões de CO<sub>2</sub> até 2050. Os dados históricos (linha preta fina) mostram as emissões históricas de CO<sub>2</sub> versus o aumento observado da temperatura da superfície global em relação ao período 1850-1900. A faixa cinzenta com a sua linha central mostra uma estimativa correspondente da parcela do aquecimento histórico causada por humanos. As áreas coloridas mostram o intervalo muito provável avaliado das projeções da temperatura global da superfície, e as linhas centrais coloridas grossas mostram a estimativa mediana em função das emissões cumulativas de CO<sub>2</sub> para os cenários selecionados SSP1-1.9, SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, e SSP5-8.5. (Calvin *et al.*, 2023).

Figura 13- Relação entre as emissões cumulativas de CO<sub>2</sub> e o aumento da temperatura global da superfície



Fonte: Relatório do IPCC de 2023, pág. 83 (Calvin *et al.*, 2023).

A Figura 13 demonstra a previsão de aquecimento nas temperaturas globais entre 1,5°C e 2°C nos cenários mais otimistas e entre 2°C e 2,5°C nos cenários pessimistas até 2050, daqui a menos de três décadas, o que ressalta a urgência na corrida contra o tempo para a implementação de medidas de mitigação e adaptação.

Para superar as incertezas dos modelos de predição climática, os métodos de *downscaling* dinâmico ou *downscaling* estatístico são frequentemente aplicados aos resultados do GCM para gerar arquivos meteorológicos futuros para simulações termoenergéticas (Bracht *et al.*, 2024). Entre os métodos estatísticos de *downscaling* disponíveis para o desenvolvimento de arquivos meteorológicos futuros, o método *morphing* é um dos mais amplamente utilizados devido à sua abordagem direta (Belcher; Hacker; Powell, 2005).

O CCWorldWeatherGen é um exemplo de ferramenta que aplica o método *morphing* para arquivos meteorológicos TMY2 baseado no cenário de altas emissões do 4º relatório de avaliação do IPCC (Jentsch *et al.*, 2013). Outro exemplo é o Future Weather Generator, uma ferramenta moderna de *morphing* de código aberto e multiplataforma, capaz de gerar previsões meteorológicas futuras de hora em hora dados

para simulações abrangentes de desempenho de edifícios (Rodrigues; Fernandes; Carvalho, 2023).

No entanto, o método *morphing* apresenta limitações, como a negligência com a gravidade e frequência de eventos climáticos extremos, além de superestimar dados próximos às temperaturas máximas e mínimas independentemente de valores médios. Estas restrições dificultam a consistência entre determinadas variáveis climáticas, e limitam sua aplicabilidade a registros meteorológicos com períodos de referência semelhantes (Bracht *et al.*, 2024; Campagna; Fiorito, 2022).

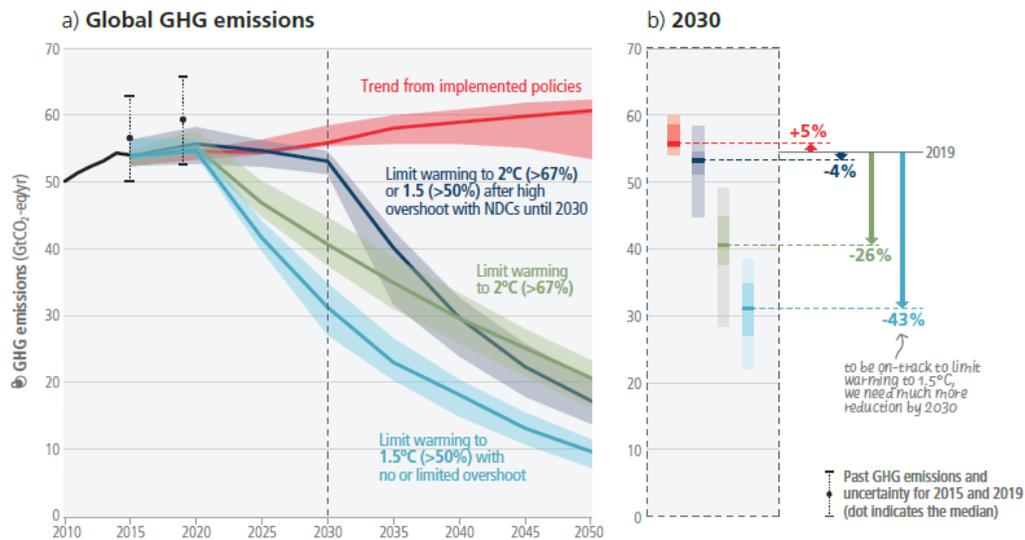
Ao comparar resultados de simulações de *downscaling* estatístico e dinâmico, é possível perceber que o *downscaling* dinâmico fornece conjuntos de dados mais consistentes, representando melhor a variabilidade espacial e temporal do clima local (P.Tootkaboni *et al.*, 2021). Esta técnica de *downscaling* dinâmico permite a obtenção de informações mais detalhadas por meio dos Modelos Climáticos Regionais (Regional Climate Models – RCMs), que incluem informações climáticas detalhadas para regiões geográficas específicas. Os RCMs recebem informações dos GCMs e fornecem projeções climáticas mais localizadas, alcançando maior resolução espacial e melhor simulação do clima em mesoescala, fornecendo resultados mais confiáveis em regiões com diferentes topografias ou contrastes de terra-mar (Di Luca; de Elía; Laprise, 2013; Rummukainen, 2016).

É importante ressaltar que, apesar do grau de incertezas das estimativas de climas futuros, é possível perceber tendências de cenários mais prováveis a partir de ações e promessas atuais. As projeções mostram que a temperatura média da superfície deverá aumentar nos próximos anos em todos os cenários de emissões possíveis. As ondas de calor continuarão a acontecer com mais frequência e a durar mais tempo e os eventos extremos de precipitação serão mais intensos e frequentes em muitas regiões (IPCC, 2014a).

A Figura 14 ilustra a projeção de emissões de GEE futuras conforme políticas já implementadas em vermelho, e necessidade de redução nas emissões para evitar o aquecimento global acima de 1,5°C e 2°C considerando ações de mitigação propostas pela Contribuição Nacionalmente Determinada (Nationally Determined Contributions –

NDC) até 2030 em azul escuro. Em verde e azul claro estão representados no gráfico os cenários de redução de emissões de GEE para evitar o aquecimento global acima de 1,5°C e 2°C considerando ações de mitigação imediata.

Figura 14- Projeção de emissões de GEE futuras para evitar o aumento de temperatura acima de 1,5°C e 2°C



Fonte: Relatório do IPCC de 2023, pág. 59 (Calvin *et al.*, 2023).

A partir da Figura 14, é possível perceber que as políticas atualmente implementadas continuarão aumentando as emissões de GEE caso não sejam ajustadas. Além disso, as curvas extremamente acentuadas de queda necessária nas emissões demonstram a disparidade entre as ações de mitigação atuais e a intensidade de esforços que deveriam estar sendo direcionados para evitar consequências da emergência climática. Tais evidências auxiliaram para a escolha do cenário pessimista para a pesquisa em questão por ser considerado o mais provável na atual conjuntura.

### 3.2.2 Arquivos climáticos futuros nacionais

Buscando incentivar pesquisas assertivas de edifícios considerando cenários climáticos futuros, Bracht *et al.* (2024) desenvolveram arquivos climáticos utilizando o método de *downscaling* dinâmico junto ao LabEEE – UFSC<sup>5</sup>. Os arquivos foram

<sup>5</sup> Laboratório de Eficiência Energética da Universidade Federal de Santa Catarina

disponibilizados para todas as capitais de estados brasileiros e para o Distrito Federal. Os períodos de 2010, 2050 e 2090 são considerados para a geração dos Anos Meteorológicos Típicos (TMY) para cada localidade<sup>6</sup>.

É importante ressaltar que o contexto urbano de localização do edifício muitas vezes se distingue do contexto da estação meteorológica onde a série temporal é registrada, no caso, localizações de aeroportos. Isto é considerada uma limitação na metodologia de geração de arquivos climáticos, pois a localização influencia aspectos como a redução da velocidade e mudanças da direção do vento, o que terá um impacto na estratégia de ventilação natural de um edifício. Além disso, os efeitos da ilha de calor urbana são frequentemente ignorados, o que também pode ter um impacto expressivo na estimativa de conforto térmico e uso de energia nos edifícios (Bracht et al., 2024, 2023; Herrera, M. et al., 2017).

O arquivo gerado para o ano de 2010 é considerado representativo do clima atual, pois considera a série histórica de dados horários medidos em estações meteorológicas de cada cidade entre 2001 e 2021. Os arquivos da série histórica foram disponibilizados por Dru Crawley e Linda Lawrie e serviram de base para o desenvolvimento dos arquivos meteorológicos TMYx disponíveis no site do OneClimate Building (Crawley; Lawrie, *apud* Bracht et al. 2024).

Os dados climáticos futuros basearam-se em diferentes projeções de RCM do *Coordinated Regional Downscaling Experiment*, que faz parte do experimento CORDEX-CORE (Giorgi et al., 2022 *apud* Bracht et al., 2024). Tais projeções incluem três GCMs como modelos de condução (HadGEM2, MPI-ESM e NorESM1) e dois RCMs aninhados (regcm e remo) para *downscaling* dinâmico totalizando um conjunto de 6 variáveis. Os três GCMs fizeram parte do Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados Projeto da Fase 5 (CMIP5) e foram escolhidos para o experimento CORDEX-CORE devido à sua sensibilidade climática diversificada à concentração de GEE e por apresentarem

---

<sup>6</sup> Arquivos climáticos foram disponibilizados na publicação “Brazil - Future weather files for building energy simulation.” dos autores M. K. Bracht, M. S. Olinger, A. F. Krelling, A. R. Gonçalves, A. P. Melo, R. Lamberts. Disponível em <https://doi.org/10.5281/zenodo.10015137>.

desempenho satisfatório na maioria das regiões do mundo (Elguindi; Giorgi; Turuncoglu, 2014 *apud* Bracht et al., 2024).

As variáveis climáticas necessárias para o desenvolvimento de arquivos meteorológicos foram extraídas de cada estação meteorológica da cidade. Os dados climáticos foram processados para todo o período de 2001 a 2099 seguindo a norma ISO EN 15927-4 para construir anos meteorológicos típicos (TMY) para as décadas de 2010 (2001-2020), 2050 (2041-2060) e períodos de 2090 (2080-2098). Esta norma estabelece quatro parâmetros climáticos para identificar os meses estatisticamente mais representativos em vários anos: temperatura de bulbo seco, umidade relativa, irradiação horizontal global de primeira ordem equivalente e velocidade do vento de segunda ordem (Bracht *et al.*, 2024).

Os percursos de concentração representativos RCP 8.5 e RCP 2.6 foram os cenários disponíveis para a região, e ambos foram considerados para o desenvolvimento dos arquivos meteorológicos. Os dados do modelo climático foram divididos em dois períodos, o período histórico (de 1970 a 2005) e o período futuro (de 2006 a 2099), para cada combinação de GCMS, RCMs e RCPs, resultando em 12 combinações por local para cada período avaliado. Como foram disponibilizados arquivos climáticos para os anos de 2010, 2050 e 2090, ao todo há 36 possibilidades para cada cidade.

Por fim, para converter os arquivos típicos climáticos em formato EPW utilizado em simulações energéticas de edifícios, foi utilizado o programa Weather Converter que acompanha a ferramenta EnergyPlus.

A partir da geração dos arquivos climáticos futuros, foram feitas simulações em um modelo de casa unifamiliar de dois dormitórios utilizando a metodologia da NBR 15575 para avaliar o impacto de cada possibilidade entre os cenários climáticos gerados. Os resultados indicaram notáveis transformações climáticas para as cidades de Belo Horizonte, Brasília e São Paulo em relação ao aumento de horas de necessidade de refrigeração (Bracht *et al.*, 2024).

De modo geral, pode-se observar também a redução da umidade relativa nas capitais brasileiras com o aumento das temperaturas, com maior ênfase nas capitais das

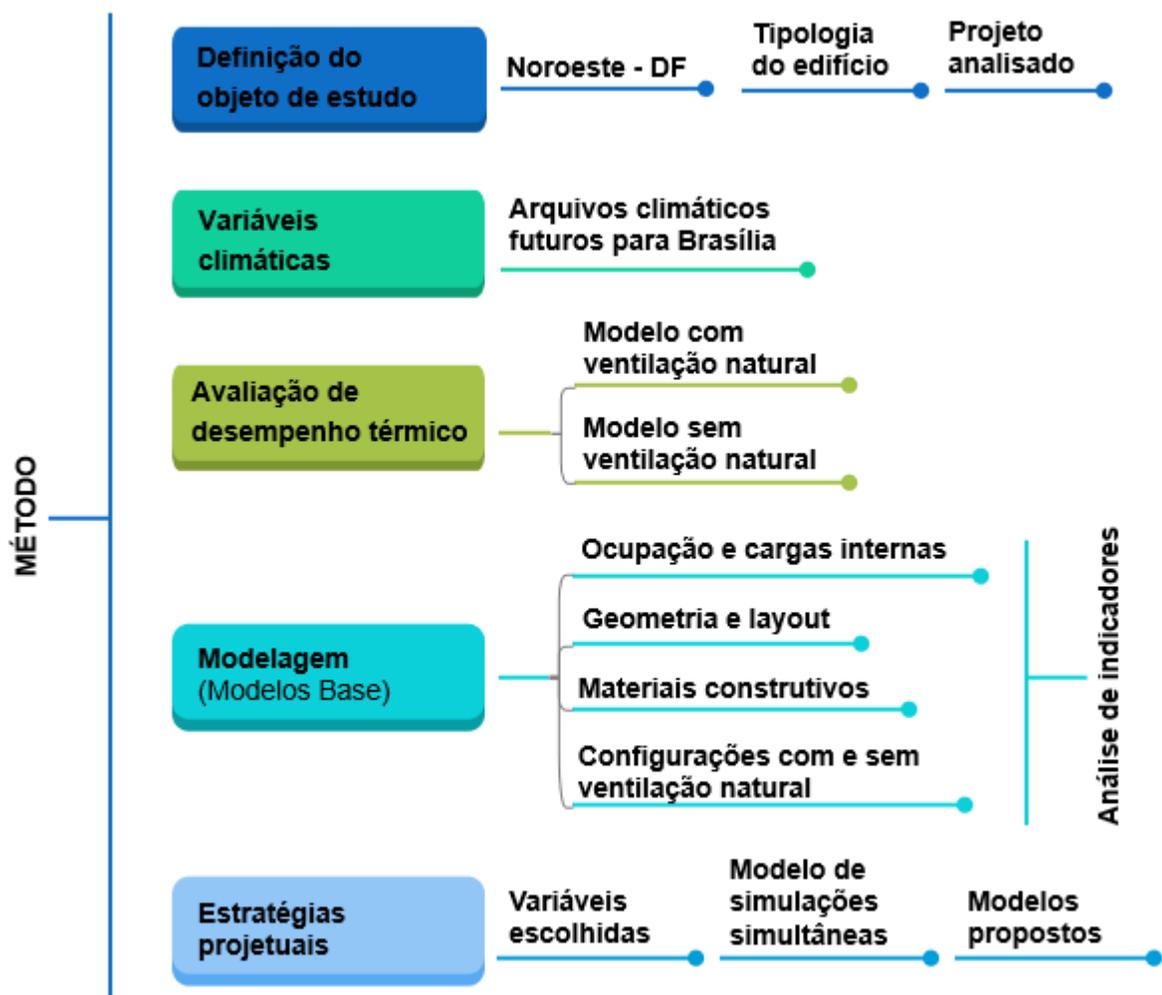
regiões Norte e Centro-Oeste do Brasil (Bracht *et al.*, 2024). Este dado é especialmente preocupante para Brasília, uma vez que o período de inverno entre maio e setembro é extremamente seco, podendo chegar a até 10% de umidade atualmente e mais de 130 dias sem chuvas.

A combinação do modelo HadGEM2-regcm apresentou os maiores valores de carga térmica em todos os casos no cenário RCP8.5. No geral, as projeções NorESM1-regcm e MPI-ESM-remo exibiram valores mais intermediários. Foi possível perceber uma diferença expressiva nos resultados dos modelos considerando o RCM regcm e remo. O regcm produz consistentemente valores mais altos do que os modelos remo, em alguns casos representando temperaturas até 10 °C acima. Esse comportamento é particularmente evidente nos casos de Brasília e São Paulo (Bracht *et al.*, 2024).

## 4 MÉTODO

O presente capítulo apresenta o método proposto para o desenvolvimento da pesquisa. A partir da revisão bibliográfica a respeito de mudanças climáticas, estratégias bioclimáticas para conforto térmico e adaptação de edifícios frente ao aquecimento global e da apresentação de normas e regulamentos nacionais para avaliação de desempenho por meio de recursos computacionais, foi desenvolvido este método que está organizado em cinco etapas, conforme organograma abaixo:

Figura 15 – Organograma método



Fonte: autoria própria, 2024.

## 4.1 Definição do objeto de estudo

Para representar o edifício residencial como objeto de estudo desta pesquisa, foi escolhido um edifício padrão do bairro Noroeste, em Brasília, Distrito Federal. Para detalhar o objeto, este tópico será subdividido em três itens: região administrativa Noroeste – DF, tipologia do edifício e projeto analisado, conforme disposto a seguir.

### 4.1.1 Região Administrativa do Noroeste - DF

Como forma de representar os edifícios residenciais de Brasília, o Setor Noroeste (NW) foi escolhido como recorte de análise por possuir potencial construtivo de edifícios novos. Além disso, os padrões urbanísticos deste bairro são semelhantes aos demais edifícios do Plano Piloto (Asa Norte e Asa Sul) devido às condições de tombamento da capital, conforme descrito no item 2.3.1 deste documento. Assim, os resultados desta pesquisa também poderiam ser aplicáveis com ressalvas para outros edifícios residenciais multifamiliares, desde que também estejam na região do DF por questões climáticas e apresentem semelhanças na planta, orientações e volumetria.

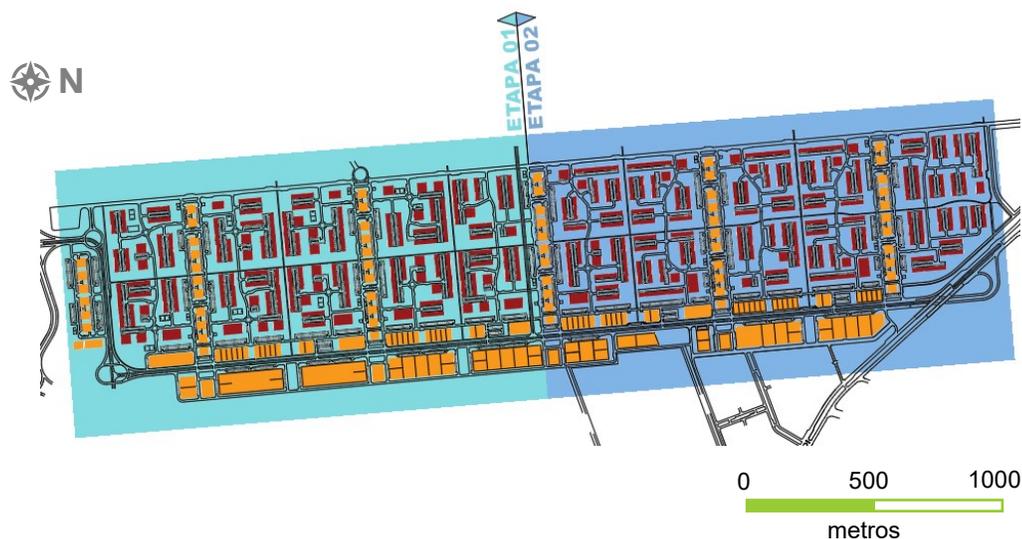
Figura 16 - Imagem aérea Setor Noroeste



Fonte: Silveira Imóveis, (2023).

O projeto do Setor Noroeste engloba 20 superquadras com 10 ou 11 projeções cada uma. O planejamento de construção do setor é em duas etapas, sendo a primeira iniciada em 2008 envolvendo as quadras de final 07 a 11, e a segunda iniciada em 2013 envolvendo as quadras de final 02 a 06. Sendo assim, as quadras da Etapa 01 já estão majoritariamente concluídas, enquanto a Etapa 02 ainda está em fase de desenvolvimento, com algumas projeções ainda não construídas (Figura 17).

Figura 17- Planta Setor Noroeste com divisão entre as duas etapas de construção



Fonte: autoria própria, 2024.

#### 4.1.2 Tipologia de edifício

Para verificar a tipologia mais representativa do setor Noroeste, foi feito um levantamento das 216 projeções existentes e previstas a partir de sites de construtoras, imobiliárias, escritórios de projetos e visitas in loco.

As superquadras possuem edifícios que variam de geometria entre retangulares e quadradas, sendo que os edifícios retangulares possuem diferentes comprimentos e podem inclusive ser duplos. O levantamento demonstrou que apenas 17% das projeções são quadradas, sendo a grande maioria das projeções (83%) retangulares, conforme Tabela 2.

Para identificar a variabilidade de plantas, foi desenvolvido um levantamento dos edifícios já construídos. Logo, foi possível identificar que a maioria das unidades habitacionais construídas são apartamentos de três ou quatro dormitórios com janelas em fachadas opostas (79%). Enquanto há apenas 4% de unidades habitacionais de um dormitório, e 17% de unidades com dois dormitórios, conforme indicado na Tabela 2. Este dado reforça o padrão de enfoque no público de alta renda, com preço mediano de

vendas em torno de 14 mil reais por cada metro quadrado (Sindicato da Habitação do Distrito Federal - SECOVI/DF, 2023).

Além disso, todos os edifícios retangulares multifamiliares foram quantificados em relação às orientações solares. Foi possível perceber predominância de edifícios com fachadas principais voltados para as orientações Norte e Sul (65%), e parcela menor com fachadas principais voltadas para Leste e Oeste (35%).

Tabela 2 - Mapeamento de diferentes tipologias Noroeste

	Tipologia	Quantidade	Percentual
<b>Formato edifício</b>	Retangular menor	115	53%
	Retangular maior	20	6%
	Retangular duplo	44	20%
	Quadrado	33	17%
<b>Número de dormitórios de edifícios já construídos</b>	1 dormitório	6	3,8%
	2 dormitórios	28	17,5%
	3 dormitórios	53	33,1%
	4 dormitórios	73	45,6%
<b>Orientação principais fachadas edif. retangulares</b>	Norte/Sul	117	65%
	Leste/Oeste	62	35%

Fonte: autoria própria, 2024.

Além disso, há diferentes condições de ganhos térmicos em relação às unidades habitacionais de edifícios. Os apartamentos localizados nos últimos pavimentos são os mais críticos do ponto de vista térmico, pois recebem insolação intensa da cobertura. Apartamentos voltados para a fachada Oeste também são considerados críticos pois recebem radiação intensa nas horas mais quentes do dia. No entanto, por se tratar de um bairro predominantemente de edifícios de altura multifamiliares, é evidente que a tipologia mais representativa é a tipologia de apartamentos de centro.

Assim, a partir deste levantamento, entende-se como tipologia mais representativa dos edifícios no Setor Noroeste edifícios retangulares com apartamento de centro de 4 dormitórios com janelas em orientações opostas voltadas para as fachadas Norte e Sul.

### 4.1.3 Projeto analisado

Considerando a tipologia mais representativa do Setor Noroeste descrita acima, foi selecionado um projeto de edifício já construído para ser o objeto de estudo desta pesquisa.

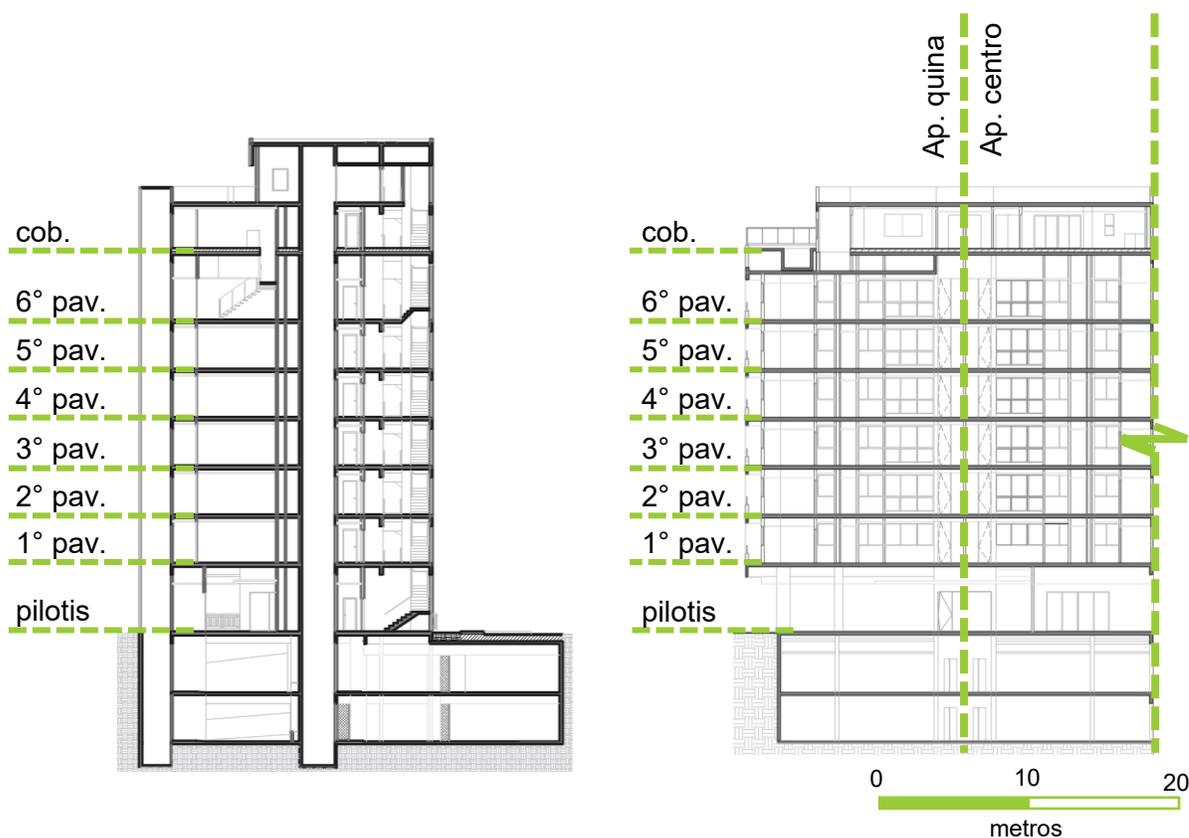
Figura 18- Localização do edifício em relação ao entorno



Fonte: autoria própria, 2024.

O edifício selecionado possui largura de 11,50 metros e comprimento de 120 metros com fachadas principais voltadas para Norte e Sul. Tal edificação possui dois subsolos de garagem, um pavimento de *pilotis* com áreas de uso comum, 5 pavimentos tipo com apartamentos de 4 suítes e os 6° e 7° pavimentos com apartamentos duplex de 4 suítes com coberturas privativas. Todas as unidades apresentam janelas em fachadas opostas, privilegiando assim, a ventilação natural.

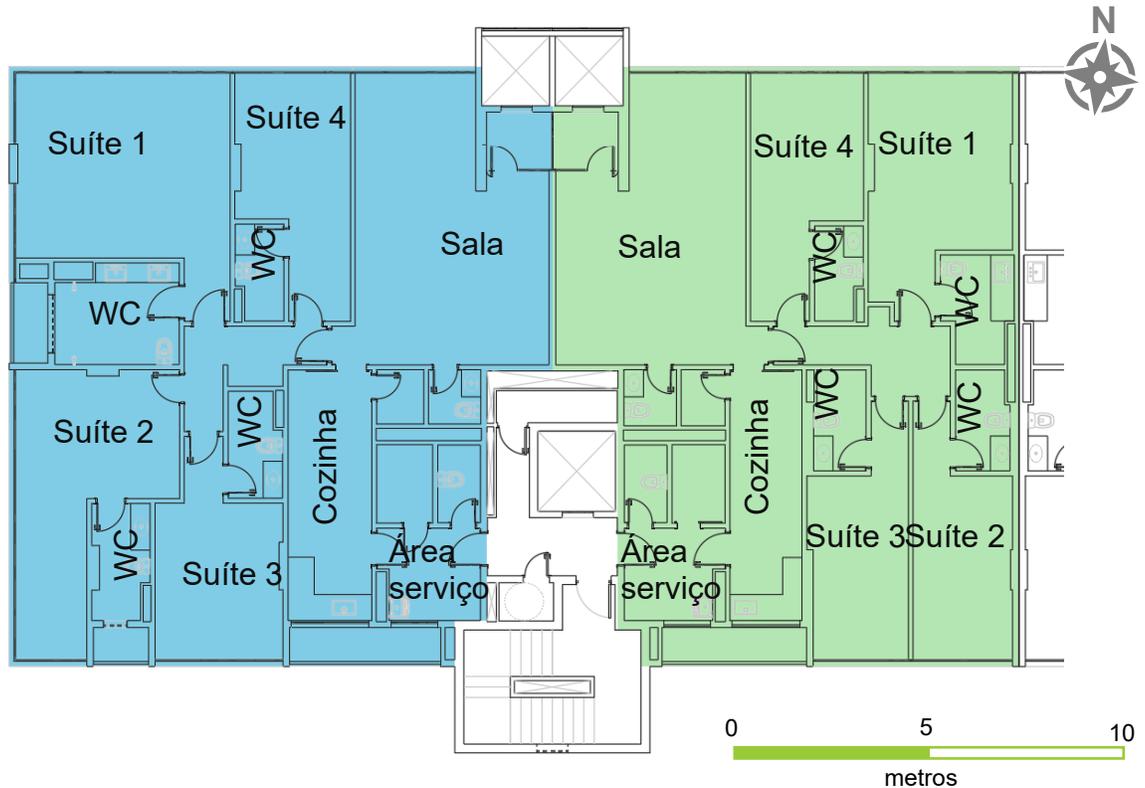
Figura 19 - Cortes edifício analisado



Fonte: autoria própria, 2024.

Os pavimentos tipo possuem duas tipologias de apartamentos: os apartamentos de canto com 200m<sup>2</sup> e os apartamentos de meio com 170m<sup>2</sup>. Os apartamentos do 6° pavimento possuem a mesma planta dos apartamentos tipo, porém com escada no ambiente da sala para conectar com a cobertura privativa, a qual possui churrasqueira, piscina, sauna, sanitário e uma sala de estar superior.

Figura 20- Pavimento tipo: apartamentos de canto em azul e de centro em verde



Fonte: autoria própria, 2024.

O apartamento de centro foi escolhido como o mais representativo do bairro para ser avaliado. Esta unidade habitacional possui cinco Ambientes de Permanência Prolongada (APPs) conforme apresentado na Tabela 3, as quais são o principal foco de análise segundo a metodologia da NBR 15575. APPs são estabelecidos como ambientes de ocupação contínua por um ou mais indivíduos. Ao contrário de Ambientes de Permanência Transitória (APT) como cozinhas, áreas de serviço, banheiros, circulações ou ambientes de usos transitórios.

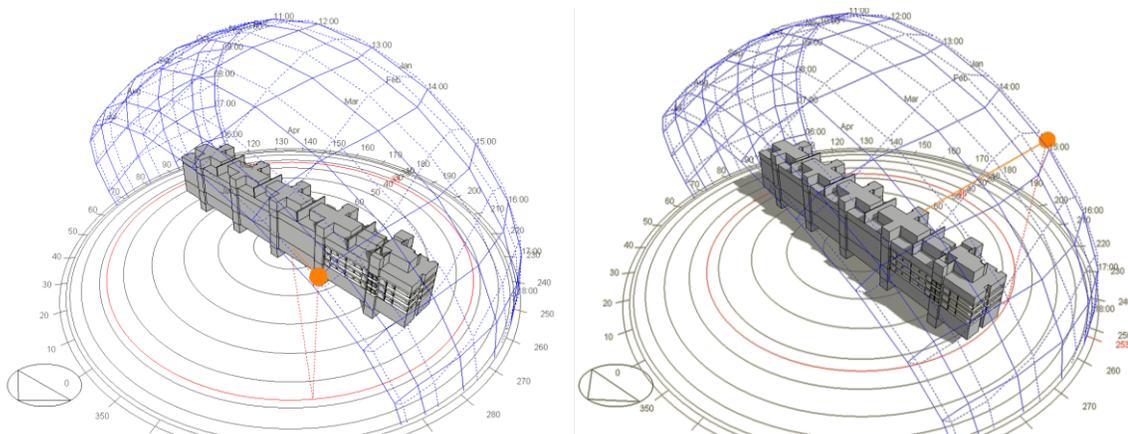
Tabela 3 - Ambientes de Permanência Prolongada da Unidade Habitacional avaliada

Tipo do APP	Área (m <sup>2</sup> )	Fachada
Sala de Estar	34,73	Norte
Dormitório 1	22,33	Norte
Dormitório 2	15,74	Sul
Dormitório 3	15,53	Sul
Dormitório 4	16,83	Norte

Fonte: autoria própria, 2024.

É importante ressaltar que, no caso deste objeto de estudo, a fachada principal do edifício está voltada para a orientação Norte, onde as janelas são maiores e há a maior parte dos APPs (suítes 1, 4 e sala de estar). Pelo percurso solar de Brasília, a fachada norte recebe bastante incidência solar direta no inverno, mas no verão permanece sombreada, conforme ilustrado na Figura 21.

Figura 21 - Percurso solar sobre o edifício avaliado. Imagem à esquerda representando fachada Norte com radiação solar direta durante o inverno. Imagem à direita representando fachada Norte sombreada durante o verão.



Fonte: autoria própria, 2024.

Como existem diferentes condições de entorno nos edifícios com esta mesma tipologia, foi considerado o entorno sem obstruções de edifícios vizinhos para representar o pior caso de insolação e evitar que os registros caracterizem uma condição única de implantação.

## 4.2 Variáveis climáticas

### 4.2.1 Arquivos climáticos futuros para Brasília

Para as análises de simulação do presente estudo, foram considerados os arquivos climáticos futuros desenvolvidos e disponibilizados online na publicação “Brazil - Future weather files for building energy simulation.” (Bracht *et al.*, 2023). Tais arquivos foram escolhidos para a análise por serem considerados os arquivos mais atualizados utilizando a metodologia assertiva de *downscaling* dinâmico, o qual fornece conjuntos de dados mais consistentes que o *downscaling* estatístico, conforme descrito no item 3.2.2- Arquivos climáticos futuros nacionais.

Conforme discorrido no capítulo de revisão da literatura sobre mudanças climáticas (item 3.1), os relatórios do IPCC demonstram clara tendência de subida de emissões de GEE nos últimos anos. Portanto, optou-se por utilizar o arquivo climático mais pessimista como forma de recorte da pesquisa, representado pelo RCP 8.5. Segundo a comparação entre os arquivos de Bracht *et al.* (2024) por simulações termoenergéticas, os arquivos com GCM HadGEM2 e RCM regcm apresentaram valores menos favoráveis de temperaturas operativas e necessidade de resfriamento por ar-condicionado. Desta forma, foram escolhidos os arquivos climáticos para serem simulados no presente estudo conforme Tabela 4.

Tabela 4: Arquivos climáticos selecionados para simulações

Cenário	Ano	RCP	GCM	RCM
1.	2010 (“atual”)	RCP 8.5	HadGEM2	regcm
2.	2050			
3.	2090			

Fonte: autoria própria, 2024.

Para entendimento mais aprofundado quanto aos arquivos climáticos escolhidos para as simulações, foram desenvolvidas comparações entre os anos avaliados a partir do software *ClimateConsultant*. Esta é uma ferramenta gratuita que realiza a leitura de dados climáticos anuais no formato EPW e traduz esses dados brutos em exibições gráficas. Assim, é possível analisar dados de temperaturas, umidade relativa do ar e

velocidade do vento, entre outros aspectos dos anos representativos de 2010, 2050 e 2090.

### 4.3 Metodologia de avaliação de desempenho térmico

Por ser uma metodologia nacionalmente desenvolvida especificamente para a avaliação de edifícios residenciais, a NBR 15575 foi considerada o processo mais adequado para a avaliação de desempenho térmico do objeto em questão. Este método permite a escolha entre os procedimentos simplificado e de simulação computacional (Krelling *et al.*, 2020).

O procedimento simplificado avalia a edificação a partir da comparação das suas características com valores de referência. É um método mais simples, porém possui suas limitações: quando o edifício é muito envidraçado, por exemplo, a Norma indica que a análise seja feita pelo método da simulação (ABNT, 2013). Assim, como os edifícios do Setor Noroeste têm área significativa de fechamentos transparentes, a avaliação apenas pelo método simplificado tem-se mostrado insuficiente (Von Glehn; Kos, 2021). Para ter uma avaliação aprofundada das condições térmicas do objeto de estudo e para possibilitar o impacto de mudanças climáticas, foi utilizado o método de simulação nesta pesquisa.

A norma recomenda que sejam consideradas todas as trocas térmicas entre as superfícies em contato, em diferentes ambientes da edificação, evitando a adoção de superfícies adiabáticas. Sendo assim, as unidades habitacionais distintas devem ser avaliadas considerando a modelagem de unidades vizinhas abaixo, acima e nas laterais para que seja contabilizado corretamente a transferência de calor da condição avaliada.

A análise de desempenho térmico avalia separadamente cada unidade habitacional (UH), e não é estabelecida metodologia de cálculo ou ponderação para estabelecimento do desempenho do edifício completo. Primeiramente, a avaliação deve ser feita para cada APP separadamente para que seja então obtido o resultado da (UH) completa.

Além de ser o critério estabelecido pela norma, a avaliação por ambientes de ocupação separadamente se mostra como um método mais preciso e assertivo. Isto porque, desta forma, é possível avaliar cada situação de acordo com dimensões, orientações e condições específicas de usos e cargas em cada caso. Por isso, foi selecionada apenas uma UH para ser avaliada nesta pesquisa como a mais representativa do bairro.

Além disso, a simulação deve ser desenvolvida para duas condições de operação: com o uso de ventilação natural exclusivamente, e sem o uso de ventilação natural. Na simulação com o uso da ventilação natural é avaliada a temperatura operativa ( $T_o$ ) dos ambientes internos, que é definida pelo valor médio entre a temperatura do ar e a temperatura radiante média do ambiente. Já na simulação sem ventilação natural é avaliada a carga térmica total ( $C_{gTT}$ ), a qual representa a quantidade de calor que deve ser removida (em caso de calor) ou adicionada (em caso de frio) ao ambiente para se alcançar uma temperatura confortável.

A norma estabelece alguns parâmetros que devem ser considerados na simulação, como a taxa metabólica de fração radiante para as pessoas com  $1,80m^2$  de  $81W$  para dormitórios e  $108W$  para salas de estar. Em relação ao uso de equipamentos, deve ser considerado  $120W$  de potência na sala de estar com fração radiante de  $0,30$  entre  $14h$  e  $22h$ . O sistema de iluminação deverá ser configurado com o valor de  $5W/m^2$  de densidade de potência instalada para em cada APP conforme cronograma ilustrado na Tabela 5, a qual também ilustra os cronogramas de ocupação exigidos.

Tabela 5 - Cronogramas de ocupação e iluminação APPs

	Sala de estar	Dormitório
Ocupação	14h – 17h59 (50%) 18h – 21h59h (100%)	22h – 7h59 (100%)
Iluminação	16h – 21h59 (100%)	6h – 7h59 (100%) 22h – 23h59 (100%)

Fonte: autoria própria (2024) a partir de informações da NBR 15575.

### 4.3.1 Modelo com ventilação natural

A simulação de ventilação natural possibilita estimar as temperaturas operativas dos ambientes internos por todas as horas do ano, e então comparar estes valores com temperaturas consideradas dentro de uma faixa de temperatura operativa. Esta faixa de temperatura operativa é estabelecida de acordo com a média anual de temperaturas de bulbo seco onde o edifício se localiza sendo possíveis três intervalos. Tais intervalos refletem diferentes condições climáticas do Brasil e, para cada intervalo, há uma faixa de temperatura operativa a ser considerada conforme Tabela 6.

A média anual da temperatura externa de bulbo seco em Brasília atualmente é de 22°C, portanto a cidade está localizada no Intervalo 1 e apresenta faixa de temperatura operativa entre 18°C e 26°C.

Tabela 6 - Intervalos de faixas de temperaturas operativas

Intervalos	Média anual da temperatura externa de bulbo seco (TBSm) °C	Faixa de temperatura operativa a ser considerada
Intervalo 1	$TBSm < 25,0 \text{ °C}$	$18,0 \text{ °C} < ToAPPa < 26,0 \text{ °C}$
Intervalo 2	$25,0 \text{ °C} \leq TBSm < 27,0 \text{ °C}$	$ToAPP < 28,0 \text{ °C}$
Intervalo 3	$TBSm \geq 27,0 \text{ °C}$	$ToAPP < 30,0 \text{ °C}$

Fonte: autoria própria (2024) a partir de informações da NBR 15575.

A razão entre as horas de ocupação dentro de uma faixa de temperatura operativa estabelecida e o total de horas de ocupação do ambiente é chamado Percentual de Horas de Ocupação dentro de uma Faixa de Temperatura Operativa (PHFT). Quanto maior o PHFT, melhor o desempenho do edifício porque significa que ele possui mais horas de ambientes com ocupação em um intervalo de temperatura considerado ameno. Caso o ambiente apresente baixo PHFT, significa que as temperaturas internas anuais estão fora de limites operativos em grande parte do ano e isso indica maior dependência de estratégias ativas para restaurar o conforto, resultando no aumento de consumo energético.

A condição do modelo com ventilação natural deve considerar aberturas de janelas nos APPs apenas em períodos ocupados, quando as temperaturas externas forem menores que as temperaturas internas e quando as temperaturas internas forem iguais

ou superiores a 19°C. Já as janelas de banheiros, devem ser consideradas sempre abertas. Em relação às portas de ambientes internos, estas devem ser consideradas todas abertas, exceto as portas de banheiros que devem ser configuradas como fechadas. A Tabela 7 resume as configurações de aberturas e fenestrações de portas e esquadrias que devem ser consideradas segundo a NBR 15575.

Tabela 7 - Descrição dos parâmetros da ventilação natural para portas e janelas

	Parâmetros	Janelas	Portas
<b>Cronograma de aberturas</b>	APPs	Abertas quando: - Horas de ocupação; - Temperaturas internas > temperaturas externas; - Temperaturas internas > 19°C.	Sempre abertas
	APTs	Sempre fechadas	Sempre abertas
	Banheiros	Sempre abertas	Sempre fechadas
<b>Infiltração por frestas</b>	Coeficiente de fluxo de ar por frestas, quando a abertura está fechada kg/(s.m)	0,00063	0,0024
	Expoente de fluxo de ar por frestas quando a abertura está fechada (adimensional)	0,63	0,59
	Coeficiente de descarga (Cd) da abertura (adimensional)	0,60	0,60

Fonte: autoria própria (2024) a partir de informações da NBR 15575.

#### 4.3.2 Modelo sem ventilação natural

Segundo a NBR 15575, o modelo de simulação sem ventilação natural deve determinar o somatório anual dos valores horários da carga térmica de refrigeração (CgTR) e da carga térmica de aquecimento (CgTA) de cada APP. A soma destes valores por hora em todo o ano resulta na carga térmica total da unidade habitacional (CgTTUH).

A CgTTUH deve ser considerada no modelo de simulação sem o uso da ventilação natural apenas nos períodos em que os APP do modelo com o uso de ventilação natural estiverem ocupados e com temperaturas operativas dentro dos limites determinados na Tabela 8. Como Brasília se enquadra no Intervalo 1, este critério indica que as cargas térmicas são contabilizadas apenas quando as temperaturas dos APPs na condição

ventilada alcancarem acima de 26°C enquanto ocupados para resfriamento e abaixo de 18°C para aquecimento (Tabela 8).

Tabela 8 - Valores de temperatura operativa para o cálculo da CgTRAPP e da CgTAAPP

Intervalos de temperaturas externas	Faixas de To para o cálculo da CgTRapp	Faixa de To para o cálculo da CgTAapp
<b>Intervalo 1</b>	To APP $\geq 26,0^{\circ}\text{C}$	ToAPP $\leq 18,0^{\circ}\text{C}$
<b>Intervalo 2</b>	To APP $\geq 28,0^{\circ}\text{C}$	Não considera
<b>Intervalo 3</b>	To APP $\geq 30,0^{\circ}\text{C}$	Não considera

Fonte: autoria própria (2024) a partir de informações da NBR 15575.

Os modelos simulados sem o uso da ventilação natural devem manter todas as portas e janelas fechadas durante todo o ano, com exceção da janela do banheiro, que deve ser mantida aberta. Nessas portas e janelas devem ser utilizados os mesmos coeficientes de infiltração utilizados para o modelo com o uso da ventilação natural.

O cálculo da carga térmica deve ser equivalente à soma das cargas térmicas sensíveis e latentes. Deve ser configurado sistema de cálculo da carga térmica de refrigeração que opere sem perdas de energia na retirada de calor do APP. As cargas térmicas de refrigeração e aquecimento devem ser consideradas acionadas apenas nos períodos em que o APP estiver ocupado possuir temperaturas de *setpoint* conforme Tabela 9.

Tabela 9 - Temperaturas de setpoints de CgTR e CgTA.

Temperatura de <i>Setpoint</i>	
Carga térmica de resfriamento (CgTR)	23°C
Carga térmica de aquecimento (CgTA)	21°C

Fonte: autoria própria (2024) a partir de informações da NBR 15575.

## 4.4 Modelagem – Modelos Base

A modelagem foi desenvolvida no *software* de simulação termoenergética DesignBuilder (versão 7.0.2.006) com licença estudantil concedida para o Laboratório de Controle Ambiental e Eficiência Energética (LACAM) da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo (FAU) da Universidade de Brasília (UnB). Esta ferramenta utiliza como motor de cálculo de simulação termoenergética o *software* livre EnergyPlus.

Para a análise do impacto das mudanças climáticas sobre o edifício construído, este foi modelado com volumetria, layout e materiais conforme projeto. Cargas internas, cronogramas de ocupação e funcionamento de portas e janelas foram configurados conforme estabelecido na NBR 15575. Este modelo com materiais de projeto foi identificado neste estudo como “Modelo Base” (MB), o qual foi dividido em seis arquivos distintos para avaliação das condições com e sem ventilação natural e dos três cenários climáticos distintos (Tabela 10).

Tabela 10 - Modelos base simulados

Nomes dos Modelos Base	Condição com ou sem ventilação natural	Cenário climático analisado
MB.VN.2010	Com ventilação natural	Atual
MB.VN.2050		2050
MB.VN.2090		2090
MB.CT.2010	Sem ventilação natural (Carga Térmica)	Atual
MB.CT.2050		2050
MB.CT.2090		2090

Fonte: autoria própria, 2024.

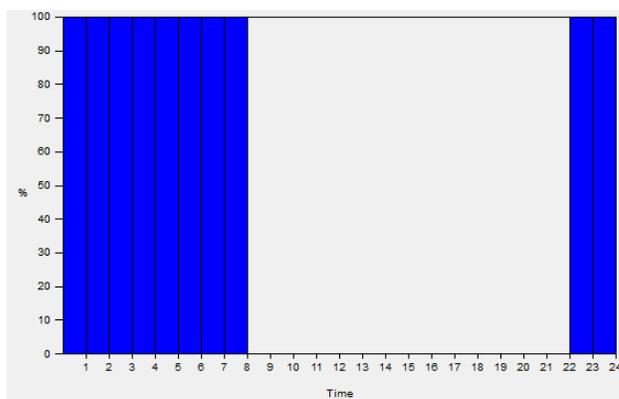
### 4.4.1 Ocupação e cargas internas

A ocupação é um aspecto de extrema relevância nos resultados de PHFT e CgTT, uma vez que a NBR 15575 estabelece que tais indicadores devem ser medidos apenas nos momentos em que cada APP é ocupada. Como apenas dormitórios e sala de estar

são considerados APPs, a análise de desempenho térmico contabiliza as To no período noturno para dormitórios e vespertino/noturno para salas de estar.

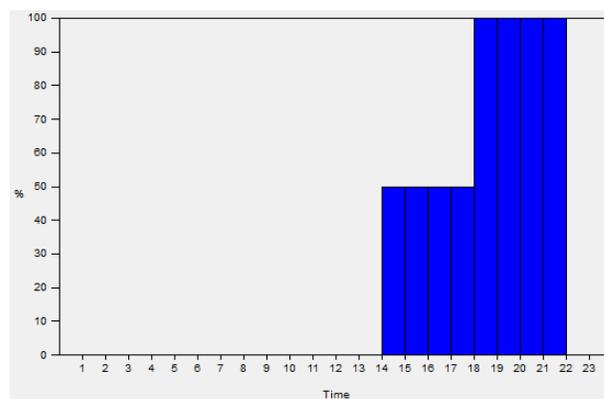
A Figura 22 indica a ocupação configurada para cada um dos quatro dormitórios das UHs, e a Figura 23 indica a ocupação da sala de estar, conforme exigido pela norma. Os demais ambientes foram configurados sem ocupação por serem considerados como Ambientes de Permanência Transitória (APT).

Figura 22 - Cronograma de ocupação de dormitórios modelados



Fonte: autoria própria, 2024.

Figura 23 - Cronograma de ocupação de salas de estar modeladas



Fonte: autoria própria, 2024.

Foram considerados dois ocupantes por dormitório e quatro ocupantes para a sala, já que a última deve considerar a soma da ocupação de dormitórios com o limite máximo de quatro pessoas. Nos horários em que a ocupação da sala é 50%, foram consideradas duas pessoas. A fração radiante considerada foi de 0,30, e o calor produzido por pessoa foi configurado em 81W/pessoa em dormitórios e 108W/pessoa na sala de estar, conforme previsto pela norma. As figuras abaixo ilustram as configurações no DesignBuilder (Figura 24, Figura 25, Figura 26, Figura 28).

Figura 24 - Configurações gerais de ganhos térmicos

The screenshot shows the 'Gains Data' configuration window. Under 'Gains data', the 'Early' radio button is selected. The 'Early gains' section is expanded, showing a note: 'Internal gains are separated into various categories (e.g. occupancy, lighting, computing etc.)'. Below this, four settings are listed with dropdown menus: 'Occupancy method' is set to '3-Number of people', 'Occupancy latent gains' is set to '2-Fixed fraction', 'Equipment gain units' is set to '1-Power density', and 'Lighting gain units' is set to '1-Power density'.

Fonte: autoria própria. 2024.

Figura 25 - Configuração de taxa metabólica por pessoa em dormitórios

The screenshot shows the 'General' configuration window. The 'Name' field contains the text 'TAXA-METABOLICA-PESSOA-DORMITORIO'. The 'Archive' section is expanded, showing 'Metabolic rate per person (W/person)' set to '81.000'.

Fonte: autoria própria. 2024.

Figura 26 - Configuração de taxa metabólica por pessoa em sala de estar

The screenshot shows the 'General' configuration window. The 'Name' field contains the text 'TAXA-METABOLICA-PESSOA-SALA'. The 'Archive' section is expanded, showing 'Metabolic rate per person (W/person)' set to '108.000'.

Fonte: autoria própria. 2024.

Figura 27 - Configuração de número de pessoas e fração latente por dormitório

The screenshot shows the 'Occupancy details' configuration window. The 'Detailed occupancy template' is set to '\_PESSOAS-DORMITORIOS'. The 'Number of people' is set to '2,00' and the 'Latent fraction' is set to '0,3000'.

Fonte: autoria própria. 2024.

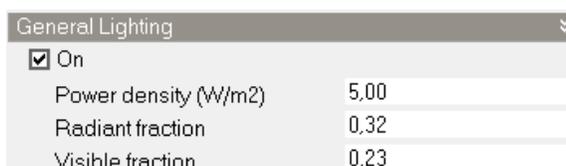
Figura 28 - Configuração de número de pessoas e fração latente por dormitório

The screenshot shows the 'Occupancy details' configuration window. The 'Detailed occupancy template' is set to '\_PESSOAS-ESTAR'. The 'Number of people' is set to '4,00' and the 'Latent fraction' is set to '0,3000'.

Fonte: autoria própria, 2024.

Em relação às cargas internas, foram consideradas cargas de iluminação artificial para os dormitórios e estar e cargas de equipamentos para a sala de estar, conforme configurações ilustradas na Figura 29 e na Figura 30. Os cronogramas de iluminação e equipamentos também foram estabelecidos conforme exigências normativas (Figura 31, Figura 32 e Figura 33).

Figura 29 - Configurações de iluminação artificial para dormitórios e salas de estar modelados



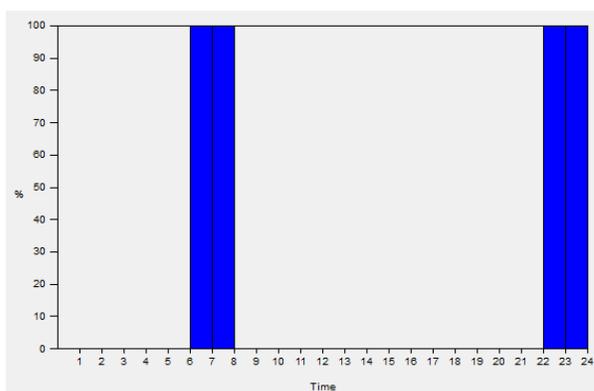
Fonte: autoria própria, 2024.

Figura 30 - Configurações de equipamentos de salas de estar modelados



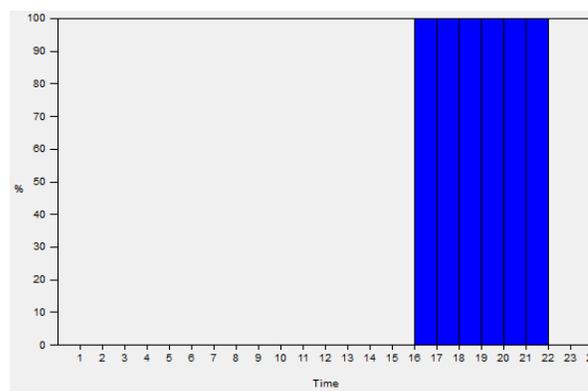
Fonte: autoria própria, 2024.

Figura 31 - Cronograma de iluminação de dormitórios modelados



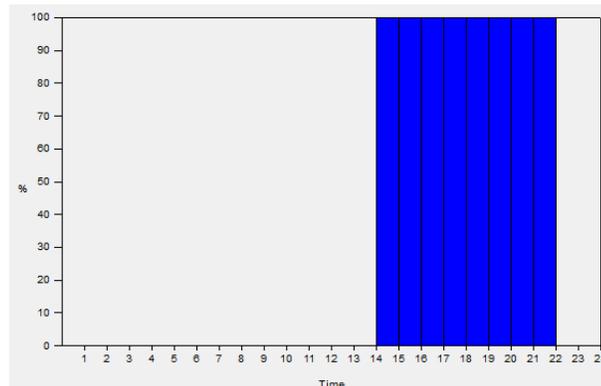
Fonte: autoria própria, 2024.

Figura 32 - Cronograma de iluminação de sala modelados



Fonte: autoria própria, 2024.

Figura 33 - Cronograma de equipamentos de salas de estar modeladas



Fonte: autoria própria, 2024.

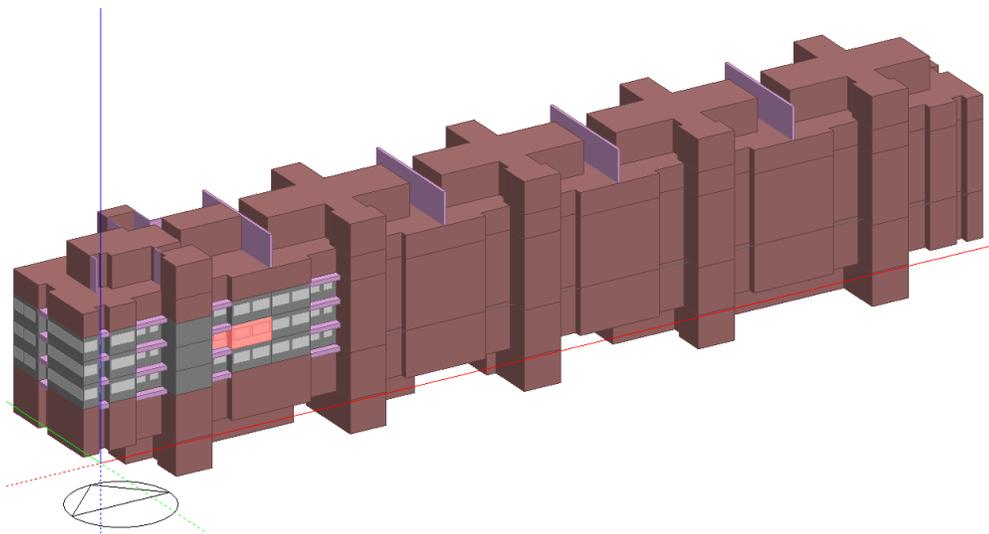
#### 4.4.2 Geometria e layout

O apartamento mais crítico para o superaquecimento é a unidade habitacional da empena Oeste localizado na cobertura, pois este possui maior exposição solar aos momentos de radiação mais intensa do dia para o Distrito Federal. Esta unidade foi simulada nas análises iniciais da pesquisa como forma de parâmetro mais impactante quanto ao aquecimento global.

No entanto, optou-se por utilizar a unidade habitacional de centro para a avaliação aprofundada da pesquisa pela sua representatividade. A modelagem deste apartamento é ilustrada na Figura 34 e na Figura 35 em cor vermelha.

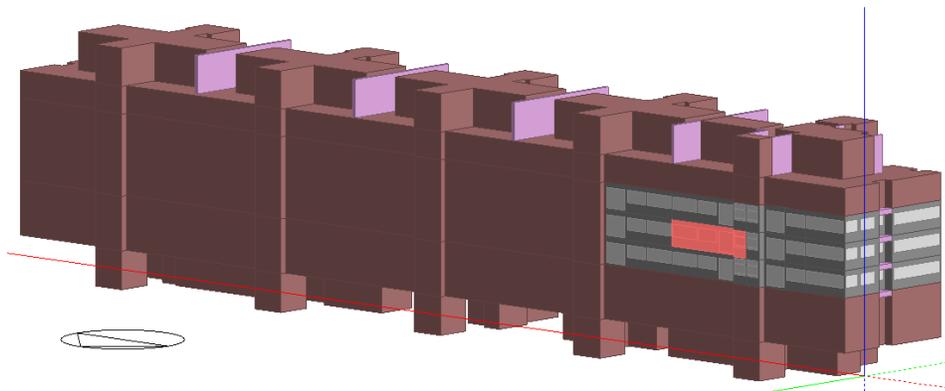
Os ambientes imediatamente adjacentes, acima, abaixo e de ambos os lados do apartamento analisado foram modelados e configurados inteiramente como o apartamento avaliado para que este tivesse a contribuição correta de cargas adjacentes e análise mais assertiva. Assim, foram modeladas inteiramente nove unidades habitacionais, sendo um apartamento central como foco da análise e oito apartamentos vizinhos. O restante do edifício foi considerado no *software* como zonas adiabáticas, ilustradas na Figura 34 e na Figura 35 em cor vinho.

Figura 34 –Edifício modelado em *software* DesignBuilder, fachadas Sul e Oeste ilustradas



Fonte: Autoria própria, 2024.

Figura 35 - Edifício modelado em *software* DesignBuilder, fachadas Norte e Oeste ilustradas



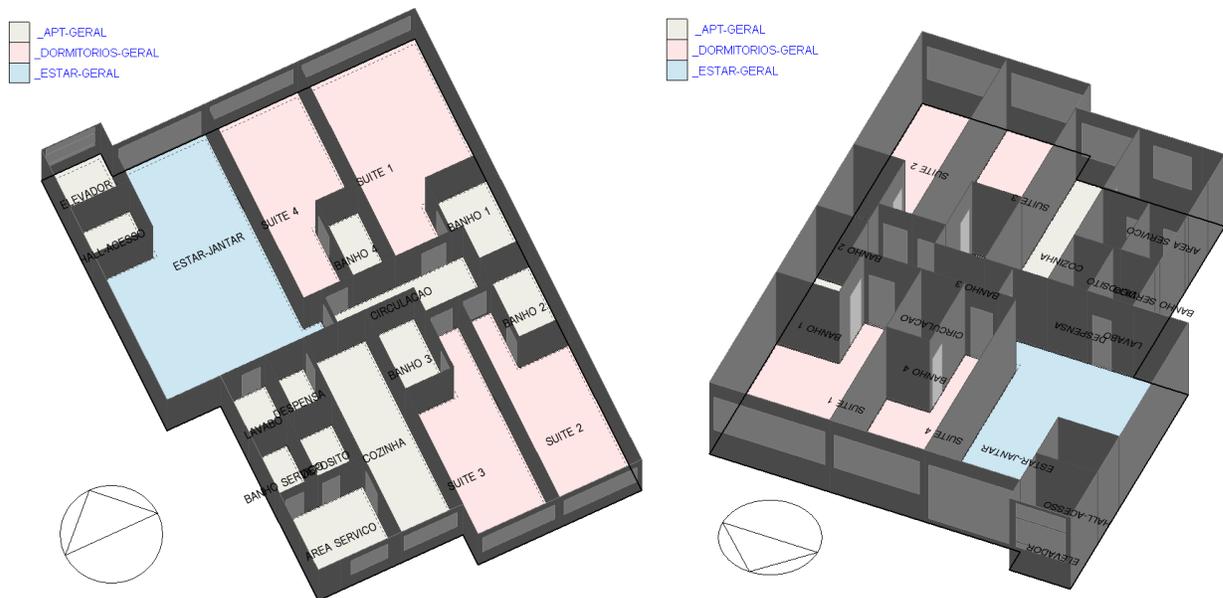
Fonte: Autoria própria, 2024.

Os únicos elementos de sombreamento das aberturas são decorrentes da própria volumetria do edifício, como lajes técnicas para equipamentos de ar-condicionado, avanços das caixas de escadas e de elevadores. As lajes técnicas estão localizadas nas fachadas Sul, Leste e Oeste e geram sombreamentos apenas nas janelas dos APTs cozinha, área de serviço e banheiro. Estes elementos foram modelados e são ilustrados na Figura 34 na cor lilás.

As janelas foram modeladas conforme projeto, com dimensões maiores na fachada Norte e menores na fachada Sul, totalizando um percentual de aberturas (WWR, do inglês *Window to Wall Ratio*) de 36%, considerado um valor intermediário.

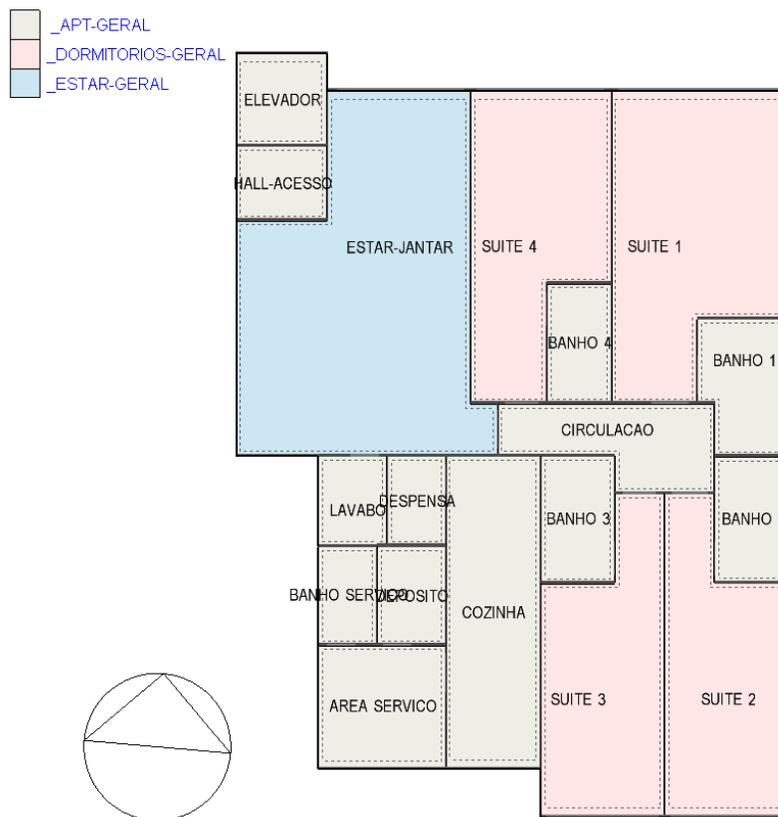
Todos os ambientes foram modelados com divisórias e portas internas conforme dimensões de planta baixa (Figura 36 e Figura 37). Os ambientes de APP foram configurados conforme os usos de dormitórios e sala de estar. Demais ambientes como corredor, cozinha, banheiros, área de serviço e despensa foram considerados como APTs. Mobiliários e persianas internas foram desconsiderados, já que não são mencionados na NBR 15575.

Figura 36 - UH de centro avaliada



Fonte: autoria própria, 2024.

Figura 37 - Planta de UH de centro avaliada



Fonte: autoria própria, 2024.

#### 4.4.3 Materiais construtivos

Os materiais de construção e acabamentos foram configurados conforme Tabela 11. No bairro Noroeste, a maioria dos edifícios utiliza blocos cerâmicos furados para vedações. Em alguns casos, são utilizados blocos de concreto ou *drywall* de gesso em paredes internas. No edifício em questão, foi utilizado o bloco de alvenaria de 14cm nas paredes externas e internas.

Quanto ao acabamento, normalmente é utilizada argamassa cimentícia seguida de uma multiplicidade de opções, incluindo granito, ACM, pintura e cerâmica de tonalidades distintas. Visando uma avaliação generalista, foi considerada argamassa cimentícia e pintura na cor cinza nas fachadas e na cor branca nos ambientes internos.

Também há grande diversidade entre tipos de vidros e janelas adotados nos edifícios do Noroeste. Os caixilhos normalmente são em alumínio, mas os tipos de janelas podem variar entre janelas de correr ou maxim-ar. No caso dos vidros, são utilizados vidros comuns, espelhados, azuis, verdes e escurecidos. Como forma de generalização, foram utilizadas janelas de alumínio com abertura de correr e vidro comum para a modelagem do edifício avaliado. As propriedades do vidro comum foram estabelecidas conforme Manual técnico do vidro plano para edificações, considerando uma espessura de 8mm (Westphal, 2016).

As propriedades de transmitância térmica (U) e capacidade térmica (CT) foram consideradas conforme Anexo Geral V da Portaria Inmetro nº50/2013 do PBE Edifica (Brasil, 2013a). As absorptâncias de pisos, coberturas e paredes externas foram consideradas com valor intermediário de 0,60, que se aproxima da tonalidade cinza claro (Dornelles, 2008 *apud* Brasil, 2013).

Tabela 11 - Composições de projeto analisado

	Camadas	Propriedades
<b>COBERTURAS/ ENTREPISOS</b>	Acabamento em porcelanato cinza 10mm + Contrapiso cimentício 40mm + Laje em concreto armado 180mm + Entreforro 210mm + Forro gesso 12,5mm	Absortância: $\alpha=0,60$ Transmitância térmica: $U=1,60 \text{ W/m}^2\text{K}$ Capacidade térmica: $CT=546,10 \text{ kJ/m}^2\text{K}$ Atraso Térmico: $\phi=9,7 \text{ horas}$
	<p>PORCELANATO CINZA, ESP. 10mm ABSORTÂNCIA 0,60 CONTRAPISO CIMENTÍCIO, ESP. 40mm LAJE CONCRETO ARMADO, ESP. 180mm CAMADA DE AR, ESP. 210mm FORRO GESSO, ESP. 20mm</p>	
<b>PAREES EXTERNAS/ INTERNAS</b>	Argamassa cimentícia 25mm + Bloco cerâmico 140mm + Argamassa cimentícia 25mm	Absortância: $\alpha=0,60$ Transmitância térmica: $U=1,85\text{W/m}^2.\text{K}$ Capacidade térmica: $CT=161\text{kJ/m}^2.\text{K}$ Atraso térmico: $\phi=4,3 \text{ horas}$
	<p>BLOCO CERÂMICO 140x190x290mm ARGAMASSA CIMENTÍCIA, ESP. 25mm ARGAMASSA CIMENTÍCIA, ESP. 25mm ACABAMENTO EM PINTURA CINZA, ABSORTÂNCIA 0,60</p>	
<b>ESQUADRIAS</b>	Janelas abertura de correr Dimensões intermediárias Vidro comum Sem sombreamento	Área de aberturas: $WWR=36\%$ Transmitância térmica: $U=5,60 \text{ W/m}^2\text{K}$ Fator solar: $FT=0,87$

Fonte: autoria própria, 2024.

Os materiais foram configurados por camadas na ferramenta DesignBuilder (Figura 38, Figura 39 e Figura 40) e as propriedades foram adequadas para que fossem alcançados os valores estabelecidos na Tabela 11. Cada camada de paredes e lajes de entrepiso foram detalhadas no APÊNDICE I.

Figura 38 - Configurações de paredes

General	
<b>Name</b>	<b>_P4.1_PAREDE-EXT-CERAMICA-14</b>
Layers	
Number of layers	3
Outermost layer	
Material	_ARGAMASSA_ABS-60
Thickness (m)	0,0250
<input type="checkbox"/> Bridged?	
Layer 2	
Material	_P4.1_BLOCO-CERAMICO-14X19X29
Thickness (m)	0,1400
<input type="checkbox"/> Bridged?	
Innermost layer	
Material	_ARGAMASSA_ABS-20
Thickness (m)	0,0250
<input type="checkbox"/> Bridged?	
Thickness (m)	0,1900
Km - Internal heat capacity (KJ/m2-K)	161,0130
<b>U-Value (W/m2-K)</b>	<b>1.850</b>

Fonte: autoria própria, 2024.

Figura 39 - Configuração de lajes entrepisos

General	
<b>Name</b>	_COBERTURA-LAZER
Layers	
Number of layers	5
Outermost layer	
Material	_CERAMICA_ABS-60
Thickness (m)	0,0100
<input type="checkbox"/> Bridged?	
Layer 2	
Material	Cement/plaster/mortar - cement
Thickness (m)	0,0400
<input type="checkbox"/> Bridged?	
Layer 3	
Material	Concrete, Reinforced (with 1% steel)
Thickness (m)	0,1800
<input type="checkbox"/> Bridged?	
Layer 4	
Material	Air gap 25mm (downwards)
Thickness (not used in thermal calcs) (m)	0,2100
Innermost layer	
Material	_GESSO_ABS-20
Thickness (m)	0,0200
<input type="checkbox"/> Bridged?	
Thickness (m)	0,4600
Km - Internal heat capacity (KJ/m2-K)	546,2580
<b>U-Value (W/m2-K)</b>	<b>1,600</b>

Fonte: autoria própria, 2024.

Figura 40 - Configurações de vidros

General	
<b>Name</b>	_VIDRO-COMUM
Calculated Values	
Total solar transmission (SHGC)	0,873
<b>U-Value (W/m2-K)</b>	<b>5,601</b>

Fonte: autoria própria, 2024.

#### 4.4.4 Configurações de condições com e sem ventilação natural

Para a análise da condição ventilada naturalmente, foi utilizada a ferramenta de análise energética EnergyPlus (versão 8.9.0.001) que utiliza o modelo de redes *AirflowNetwork* para simular sistemas de distribuição do ar e calcular as perdas de carga térmica em relação a ventilação. O *AirflowNetwork* considera o fluxo de ar através de elementos do edifício, como aberturas, dutos e zonas, usando relações simplificadas entre pressões, fluxos de ar e resistências.

Essa metodologia é capaz de retratar dados como consumo e conforto de forma mais abrangente e necessitam de menos tempo para seu processamento quando comparados aos modelos de simulações de CFD (Góes, 2018). As análises de CFD, por outro lado, resolvem numericamente as equações fundamentais da dinâmica dos fluidos para cada ponto do domínio, levando em conta todos os detalhes geométricos e físicos do edifício e do ambiente circundante.

O *AirflowNetwork* é amplamente utilizado para a avaliação de desempenho térmico, porém apresenta algumas simplificações como a ausência de cálculo da velocidade interna do ar na zona (Sorgato, 2009). Além disso, obstáculos ao fluxo, tais como dispositivos de sombreamento, podem levar a grandes desvios entre as previsões computacionais e as condições reais de ventilação (Cruz; Viegas, 2016). Sendo assim, as simulações de ventilação natural devem ser analisadas com cautela.

Em ambos os modelos, com e sem ventilação natural as portas internas foram consideradas abertas, exceto as portas de banheiros, as quais foram consideradas sempre fechadas Figura 41. A fenestração também foi configurada conforme a Figura 42.

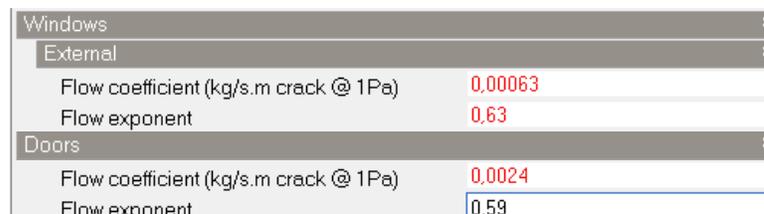
Figura 41 - Configurações de portas



Doors	
Operation schedule	_PORTAS-INTERNAS-ABERTAS
Calculated	
Discharge coefficient for open doors and holes	0,600
Operation schedule	
	_PORTAS-INTERNAS-WC-FECHADAS

Fonte: autoria própria, 2024.

Figura 42 - Configurações de fenestrações de portas e janelas



Windows	
External	
Flow coefficient (kg/s.m crack @ 1Pa)	0,00063
Flow exponent	0,63
Doors	
Flow coefficient (kg/s.m crack @ 1Pa)	0,0024
Flow exponent	0,59

Fonte: autoria própria, 2024.

A norma exige que janelas de banheiros sejam consideradas sempre abertas, porém, nenhum banheiro possui janelas no caso dos apartamentos de centro. Entretanto, há banheiros com janelas nos apartamentos modelados da empena Oeste para considerarem trocas de térmicas com a UH avaliada. Portanto, estas foram consideradas abertas em todas as horas do ano.

No modelo de ventilação natural as janelas foram consideradas fechadas em APTs, e abertas em APPs apenas em horários ocupados com temperatura externa menor que a interna e maior que 19°C (Figura 43).

Figura 43 – Configuração de ventilação natural

Natural Ventilation	
<input checked="" type="checkbox"/> On	
Operation	
<input checked="" type="checkbox"/> Operation schedule	_DORMITORIO-OCUPACAO
Operation	
<input checked="" type="checkbox"/> Operation schedule	_SALA-OCUPACAO
Operation	
<input checked="" type="checkbox"/> Schedule	_APT-OCUPACAO
Outdoor Temperature Limits	
<input checked="" type="checkbox"/> Outdoor min temperature control	
Min temperature definition	1-By value
Min temperature (°C)	19
<input type="checkbox"/> Outdoor max temperature control	
Delta T Limits	
<input checked="" type="checkbox"/> Delta T limit control	
Delta T definition	1-By value
Delta T (deltaC)	0.00

Fonte: autoria própria, 2024.

No modelo sem ventilação natural, as janelas foram consideradas todas fechadas, exceto as dos banheiros voltadas para Oeste. O *setpoint* de resfriamento é 23°C e de aquecimento 21°C (Figura 44). A carga térmica é considerada apenas quando as temperaturas operativas do modelo ventilado alcançarem 26°C ou estiverem abaixo de 18°C em horários ocupados nos APP. Como a condição de carga térmica depende de temperatura do modelo de ventilação natural e as simulações devem ser rodadas separadamente, só é possível fazer este ajuste manualmente após as simulações.

Figura 44 - Configuração de ar-condicionado e aquecedores

Heating Setpoint Temperatures	
🔥 Heating (°C)	21
Cooling Setpoint Temperatures	
❄️ Cooling (°C)	23

Fonte: autoria própria, 2024.

#### 4.4.5 Análise de indicadores do Modelo Base

Após a simulação dos seis arquivos de Modelos Base, os dados de *output* foram analisados principalmente quanto à Temperatura Operativa e à Carga Térmica prevista para Resfriamento e Aquecimento. Estes dados foram extraídos das simulações para cada APP da UH avaliada e para cada hora dos anos simulados.

Para o cálculo do PHFT e CgTT, os dados de *output* foram importados na Planilha de Cálculo da NBR 15575 disponibilizada pelo LabEEE. Esta planilha absorve os valores de  $T_o$ ,  $CgTr$  e  $CgTa$  por ambiente por hora e gera os valores de  $T_o$  máxima e mínima, PHFT e CgTT tanto dos APPs separadamente, quanto da UH inteira (LabEEE, 2020).

### 4.5 Estratégias projetuais de conforto passivo

Algumas estratégias arquitetônicas foram selecionadas e simuladas para avaliar o possível aumento do desempenho térmico no clima atual e amenizar as consequências do aquecimento global nos ambientes internos em projeções climáticas futuras.

#### 4.5.1 Estratégias avaliadas para Modelo Proposto

Há diversas variáveis que influenciam nas condições de temperaturas internas dos ambientes residenciais, como posicionamento do lote, orientação da edificação, volumetria e sombreamentos causados por edifícios ou outros elementos urbanos/rurais do entorno (Lamberts *et al.*, 2020). Porém, muitos destes itens não são passíveis de mudanças no processo projetual devido às limitações legais e ao contexto no qual o edifício está sendo inserido.

Sendo assim, para esta pesquisa, foram testadas simulações com variáveis projetuais que são passíveis de aplicação no caso do objeto de estudo: um apartamento de centro em um edifício com fachadas principais voltadas para Norte e Sul.

Como já abordado no capítulo de revisão de literatura, algumas propriedades técnicas repercutem de forma direta no comportamento térmico dos edifícios, como transmitância térmica, capacidade térmica, absorvância solar, fator solar e sombreamentos. As envoltórias dos edifícios, que se caracterizam por fachadas e coberturas, são extremamente relevantes para o aquecimento dos ambientes internos (Lamberts, 2016).

Os elementos envidraçados, em especial janelas e portas externas, normalmente são os pontos mais sensíveis às trocas térmicas entre ambientes internos e o meio externo por apresentarem alta transmitância (U). Além disso, o vidro permite a entrada da radiação solar direta no meio interno e funciona como uma estufa, fazendo com que o calor fique aprisionado (Lamberts; Dutra; Pereira, 2014).

Existem diversas maneiras de amenizar os efeitos de aquecimento por vidros. Alguns exemplos são a utilização de elementos de sombreamentos, ou a aplicação vidros ou películas eficientes que possuam propriedades de menor absorção térmica e reflexão de parte da radiação recebida (Koç; Maçka Kalfa, 2021). Para a avaliação destes dois aspectos, foram testados cenários de simulação considerando a utilização ou não de vidros especiais, e a utilização ou não de venezianas externas que funcionariam como sombreamento total de aberturas.

Além disso, a utilização de vidros excessivos em edifícios deve ser evitada em prol do melhor desempenho térmico. Porém, a redução de área envidraçada deve ser avaliada com cautela, uma vez que também influencia no percentual de ventilação natural efetiva, o qual repercute no conforto térmico. A renovação de ar também é essencial para a qualidade do ar interno. Além disso, o tamanho de janelas também tem influência no aproveitamento de iluminação natural e no bem-estar do ocupante, por permitir vistas de qualidade do meio externo. Portanto, a solução não está na redução indiscriminada das dimensões de janelas.

Entretanto, de forma geral, a NBR 15220 indica a utilização de janelas menores como estratégia passiva para resfriamento em climas mais quentes em cidades como Cuiabá e Teresina da Zona Bioclimática 7 (ABNT, 2005). Já para o clima de Brasília que está enquadrada na Zona Bioclimática 4 atualmente, são indicadas janelas de tamanho médio. A dimensão das aberturas do objeto de estudo da pesquisa é considerada intermediária, uma vez que o WWR é de 36%, o que está de acordo com a indicação da NBR 15220. No entanto, as prospecções de cenários climáticos futuros apontam para a provável alteração de enquadramento de Zonas Bioclimáticas (ZB) das cidades. Em vista disso, e buscando a verificação da influência do tamanho das aberturas em Brasília, foi incluída a variável de janelas menores no caso em questão.

Apesar de não serem tão sensíveis ao desempenho térmico dos edifícios como as superfícies envidraçadas, a composição de paredes das fachadas também tem grande influência no ganho de calor. A NBR 15220 indica para climas quentes como os das Zonas Bioclimáticas 4 e 7 paredes pesadas, com baixa transmitância térmica (U), alta capacidade térmica (CT) e alto atraso térmico. No entanto, é importante ressaltar que a NBR 15520 foi desenvolvida para Habitações de Interesse Social, que normalmente são dependentes apenas de ventilação natural e desconsideram a climatização artificial.

Ao considerar as prospecções de cenários climáticos futuros, é possível afirmar que seremos cada vez mais dependentes de equipamentos de ar-condicionado para estabelecer o conforto, principalmente em cidades que atualmente já apresentam temperaturas elevadas, como em Brasília. Assim, em edifícios de médio ou alto padrão, é importante considerar vedações que sejam adequadas não apenas à ventilação natural, como também à condição de condicionamento artificial. Para atingir a eficiência energética, o ideal é alcançar o conforto térmico no máximo de horas possíveis com estratégias passivas e, quando isso não for possível, assegurar o funcionamento de estratégias ativas da forma mais eficaz e com o mínimo de perdas.

Sendo assim, foram selecionadas composições distintas de paredes externas para a comparação dos desempenhos dos modelos de ventilação natural e carga térmica. O Modelo Base já foi configurado com paredes de bloco cerâmico de 14cm, o que é

considerada parede pesada pela NBR 15520 (ABNT, 2005). Para uma avaliação comparativa, foi simulada uma parede ainda mais pesada – parede dupla em blocos cerâmicos de 9cm de espessura.

Para edifícios condicionados artificialmente, por outro lado, o isolamento é mais importante do que o atraso térmico causado por paredes pesadas. Portanto, foram selecionadas outras duas composições de paredes externas para serem testadas, ambas com transmitância térmica (U) extremamente baixa, porém variando quanto à capacidade térmica (CT). Para isso, foi selecionada a parede de concreto e isopor como exemplo de baixo U e alta CT, e a parede de placa cimentícia, lã de rocha e placa de gesso para representar baixo U e baixa CT.

A cobertura também é considerada um aspecto relevante no ganho térmico de edifícios por receber radiação solar direta intensa durante o ano todo. No entanto, no caso de edifícios em altura, esta variável impacta apenas nos últimos pavimentos, não sendo relevante para a maioria dos pavimentos tipo. Como o objeto de análise desta pesquisa é um apartamento de centro em um pavimento tipo, a variável da cobertura não foi considerada.

As estratégias de tipos de vidros, uso de venezianas, dimensões de aberturas e tipos de composições de paredes externas são detalhadas na Tabela 12. Todas as condições de relações entre estratégias foram consideradas, somando ao todo 32 possibilidades de composições entre as variáveis. Levando em conta que os modelos estão separados nas condições com e sem ventilação, foram encontrados 64 cenários para cada ano avaliado. Assim, considerando três condições de arquivos climáticos (cenário atual, 2050 e 2090), ao todo foram gerados 192 resultados de simulações.

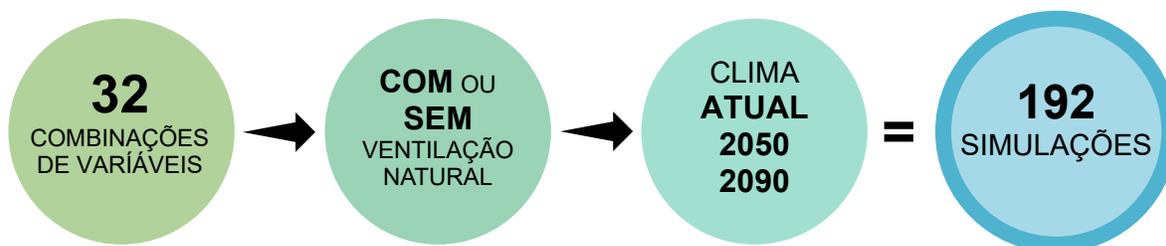
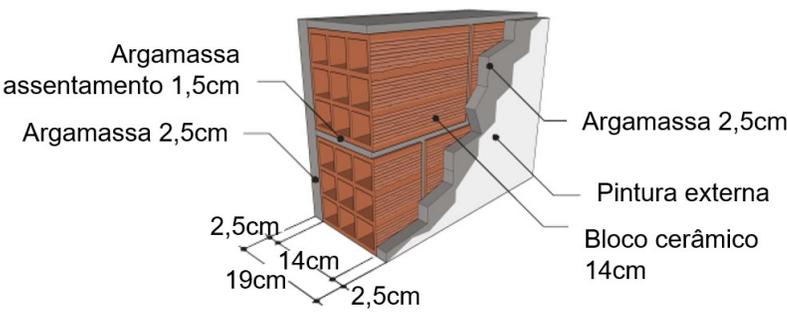
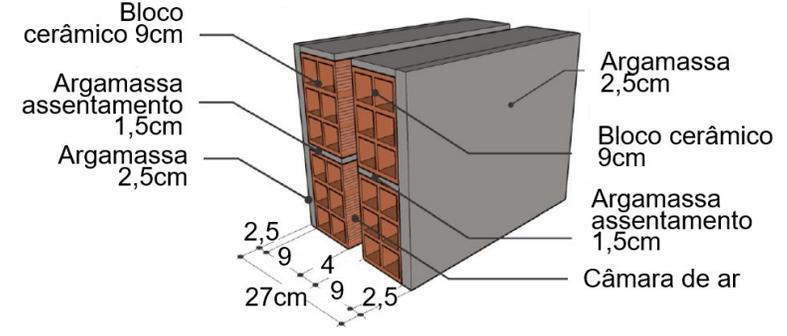


Tabela 12 - Estratégias passivas consideradas para simulações simultâneas

	Foco variável	Código	Descritivo estratégia	Propriedades
Aberturas	<b>Janela</b> Dimensões de aberturas	A.JM	Janelas médias	WWR <sup>a</sup> = 36%
		A.JP	Janelas pequenas	WWR <sup>a</sup> = 18%
	<b>Sombreamentos</b> Radiação direta incidente em vidros	A.SV	Sem veneziana	Sombreamento 0%
		A.CV	Com veneziana	Sombreamento 100% quando TE <sup>b</sup> >26°C
	<b>Vidro</b> Eficiência do material	A.VC	Vidro comum	FS <sup>c</sup> =87%
		A.VE	Vidro especial	FS <sup>c</sup> =40%
Vedações	<b>Materiais vedação</b> Paredes fachadas	P.CS	<b>Parede pesada transmitância e capacidade térmica médias</b> Argamassa 2,5cm + Bloco cerâmico 14cm + Argamassa 2,5cm	U <sup>d</sup> =1,83W/m <sup>2</sup> .K CT <sup>e</sup> =161kJ/m <sup>2</sup> .K Atraso térmico Q=4,3h (PBE Edifica)
				
		P.CD	<b>Parede pesada transmitância baixa e capacidade térmica alta</b> Argamassa 2,5cm + Bloco cerâmico 9cm + Ar 4cm + Bloco cerâmico 9cm + Argamassa 2,5cm	U <sup>d</sup> =1,27W/m <sup>2</sup> .K CT <sup>e</sup> =195kJ/m <sup>2</sup> .K Atraso térmico Q=6h (LabEEE)
				

	P.PI	<p><b>Parede isolada com alta capacidade térmica</b>                  Argamassa 0,5cm + Concreto armado 3,5cm + EPS 10cm + Concreto armado 3,5cm + Argamassa 0,5cm</p>	<p><math>U^d=0,40W/m^2.K</math>  <math>CT^e=192,9kJ/m^2.K</math>                  Atraso térmico <math>Q=14,2h</math>                  (ProjetEEE)</p>
	P.LI	<p><b>Parede leve isolada com baixa capacidade térmica</b>                  Argamassa 0,5cm + Placa cimentícia 1cm + Lã de rocha 9cm + Gesso 1,25cm + Argamassa 0,5cm</p>	<p><math>U^d=0,40W/m^2.K</math>  <math>CT^e=52,5kJ/m^2.K</math>                  Atraso térmico <math>Q=6,1h</math>                  (ProjetEEE)</p>

Fonte: autoria própria, 2024.

<sup>a</sup> WWR: Window to Wall Ratio – indica o percentual de aberturas em relação à área da fachada do edifício, também conhecido como PAft.

<sup>b</sup> TE: Temperatura Externa de bulbo seco.

<sup>c</sup> FS: Fator solar - razão entre o ganho de calor que entra em um ambiente por uma abertura e a radiação solar incidente nesta mesma abertura, a qual inclui o calor radiante transmitido pelo vidro e a radiação solar absorvida, que é transmitida ao ambiente por condução ou convecção.

<sup>d</sup> U: Transmitância térmica - transmissão de calor em unidade de tempo e através de uma área unitária de um elemento ou componente construtivo, incluindo as resistências superficiais interna e externa, induzida pela diferença de temperatura entre dois ambientes.

<sup>e</sup> CT: Capacidade Térmica - quantidade de calor necessária para variar em uma unidade a temperatura de um sistema.

As propriedades de transmitância, capacidade e atraso térmicos foram consideradas conforme indicado em tabela pelos seguintes bancos de dados:

- LabEEE: biblioteca de componentes construtivos brasileiros para o uso no programa EnergyPlus desenvolvida pelo LabEEE (Weber *et al.*, 2017). Este relatório descreve uma metodologia para a caracterização de componentes construtivos adequados à realidade brasileira de utilização do programa EnergyPlus utilizando o software de simulação computacional QuickField e compara os resultados com valores calculados segundo a metodologia da NBR 15220.
- PBE Edifica: Anexo Geral V da Portaria Inmetro nº50/2013 do PBE Edifica (Brasil, 2013b). Este documento é parte integrante da metodologia nacional de classificação de eficiência energética de edifícios comerciais, de serviços e públicos.
- ProjetEEE: plataforma nacional financiada pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA), em cooperação com o Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD) (MMA, 2024). Esta plataforma online contém dados das propriedades térmicas de uma variedade de componentes construtivos e disponibiliza uma ferramenta para o cálculo de transmitância térmica de componentes sugeridos pelo usuário.

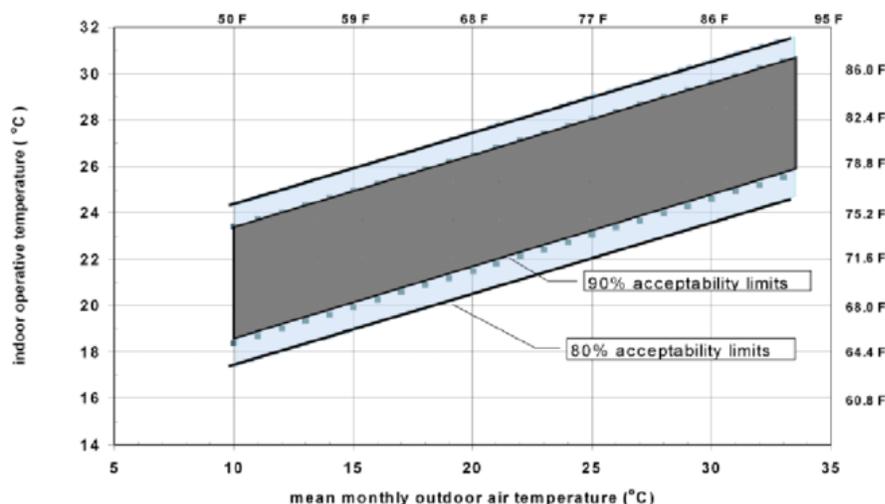
O objetivo de simular os 192 cenários descritos na Tabela 12 é analisar quais são as estratégias mais relevantes aos resultados de desempenho térmico nos modelos com e sem ventilação para cada cenário climático abordado na pesquisa. Além disso, traçar as variáveis mais adequadas para cada modelo, levando em conta que este conjunto de estratégias pode ser distinto para cada condição climática e de ventilação.

#### 4.5.2 Modelo de simulações paramétricas

As simulações das estratégias bioclimáticas propostas foram desenvolvidas através da ferramenta de Otimização do DesignBuilder. Esta ferramenta possibilita simulações simultâneas de variáveis e permite a avaliação dos melhores cenários em relação a um objetivo pré-estabelecido. Logo, foram estipulados dois objetivos: menor desconforto térmico para modelos ventilados naturalmente e menor carga térmica para modelos sem ventilação natural. Os objetivos disponíveis para configuração na ferramenta são limitados e estão alinhados com normativas americanas e europeias. Portanto, as metodologias de quantificação do conforto térmico e carga térmica não são as mesmas estabelecidas pela NBR 15575, mas servem como um bom parâmetro de avaliação.

O objetivo de carga térmica do DesignBuilder analisa a previsão de carga para resfriamento ou aquecimento em kWh (quilowatt-hora) dos ambientes sempre que ocupados (Figura 47). Já desconforto térmico é estipulado por hora conforme a ASHRAE 55, 80% (Figura 46). Nessa norma, o cálculo de conforto é determinado em função da temperatura externa, a partir da qual define-se a faixa de temperatura operativa aceitável entre os limites superior e inferior para que 80% ou 90% dos usuários estejam em equilíbrio térmico. A Figura 45 demonstra que a zona de temperaturas de conforto segundo a ASHRAE 55 varia de 17°C a 31°C, para aceitabilidade de 80% dos usuários.

Figura 45 - Zona de conforto para edifícios naturalmente ventilados da ASHRAE 55



Fonte: ASHRAE, (2004).

Figura 46 - Configuração de objetivo de conforto térmico da ferramenta de otimização para o modelo ventilado naturalmente

Parametric, Optimisation and UA/SA Analysis Settings				
Analysis Type	Objectives	Additional Outputs	Constraints	Design Variables
Name	Min/Max	Objective KPI		
_CONFORTO-TERMICO	1-Min	Discomfort Summer ASHRAE 55 Adaptive 80% Acceptability		

Fonte: autoria própria, 2024.

Figura 47 - Configuração de objetivo de carga térmica da ferramenta de otimização para o modelo sem ventilação natural

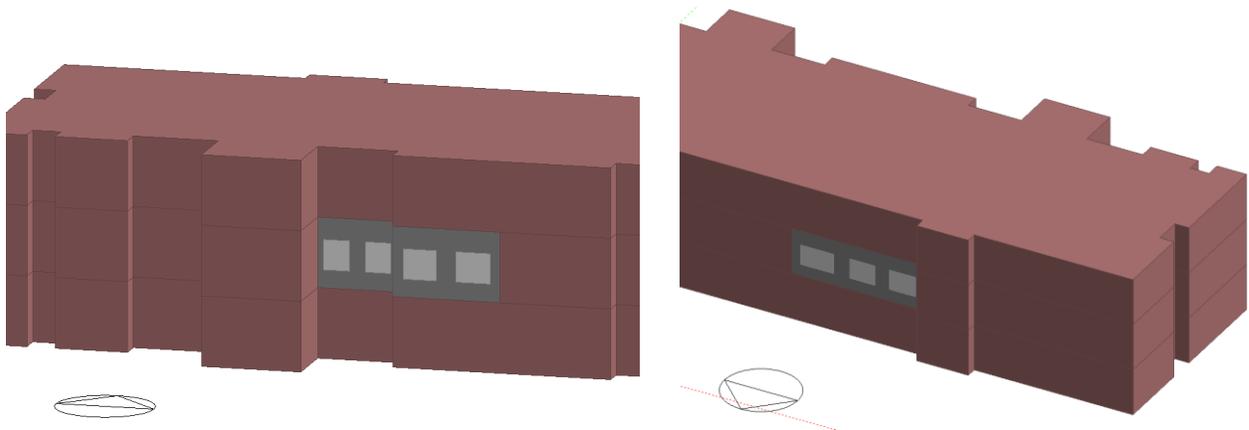
Parametric, Optimisation and UA/SA Analysis Settings				
Analysis Type	Objectives	Additional Outputs	Constraints	Design Variables
Name	Min/Max	Objective KPI		
_COOLING-LOAD	1-Min	Cooling load		

Fonte: autoria própria, 2024.

A ferramenta de otimização possibilita a simulação simultânea das variáveis, mas isso demanda custos computacionais elevados. Para obter os resultados das 192 simulações, os seis modelos (3 com e 3 sem ventilação natural para os anos de 2010, 2050 e 2090) passaram pelas análises de otimização. Os arquivos desenvolvidos para a condição de Modelo Base apresentaram tempos de simulação prolongados porque possuem configurações de mais apartamentos.

Considerando que esta pesquisa avalia uma UH representativa, para reduzir os custos computacionais, foi desenvolvido um Modelo Simplificado para rodar as simulações pela ferramenta de otimização (Figura 48). Isto porque, como foram modelados inteiramente nove apartamentos no Modelo Base, o tempo de simulações das variáveis se delongaria aproximadamente oito vezes mais para este modelo completo. As configurações do Modelo Simplificado seguem os mesmos padrões que o Modelo Base conforme metodologia descrita no item 4.4 - Modelagem – Modelos Base. A simplificação ocorre na não modelagem completa dos apartamentos vizinhos, sendo estes representados por zonas adiabáticas.

Figura 48 -Modelo Simplificado para simulações paramétricas de variáveis



Fonte: autoria própria, 2024.

Todas as variáveis apresentadas na Tabela 12 foram configuradas pela ferramenta de otimização conforme ilustrado em Figura 49, Figura 50, Figura 51, Figura 52 e Figura 53.

Figura 49 - Configuração de todas as variáveis

Analysis Type	Objectives	Additional Outputs	Constraints	Design Variables			
Name	Variable type	Min Value	Max Value	Step (parametric)	Step (optimisati...	Options list	Target objects
Window to Wall %	Window to wall...	18,00	36,00	2,00	18,000	-	Building
External wall co...	External wall c...	0,00	0,00	0,00	0,000	4 options	Building
Glazing type	Glazing type	0,00	0,00	0,00	0,000	2 options	Building
Window blind type	Window blind t...	0,00	0,00	0,00	0,000	2 options	Building

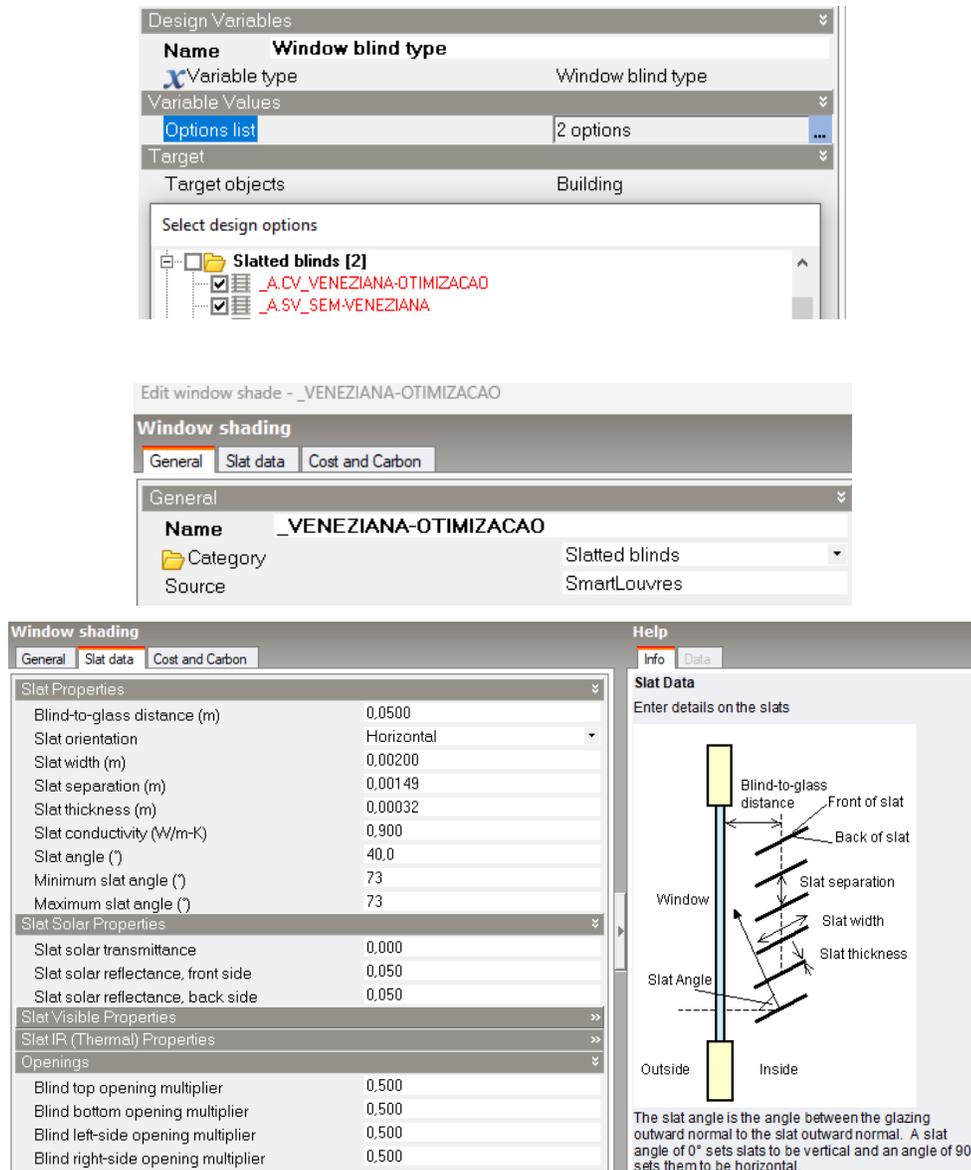
Fonte: autoria própria, 2024.

Figura 50 - Configuração variável janelas – dimensões de aberturas (WWR)

Design Variables	
<b>Name</b>	Window to Wall %
<b>Variable type</b>	Window to wall %
Range	
Min Value	18,00
Max Value	36,00
Increment Step	
Step (parametric)	2,00
Step (optimisation)	18,000
Target	
Target objects	Building

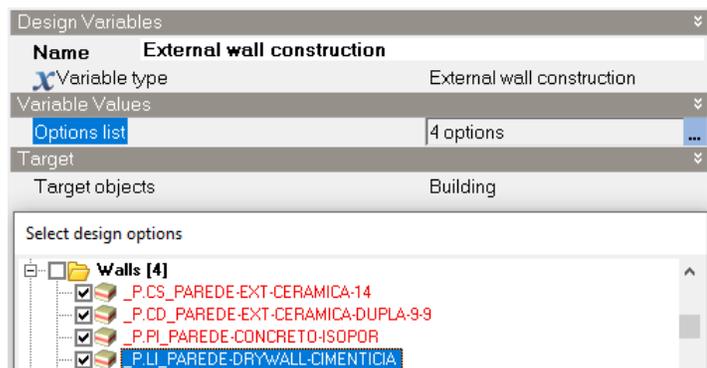
Fonte: autoria própria, 2024.

Figura 51 - Configuração variável sombreamento venezianas



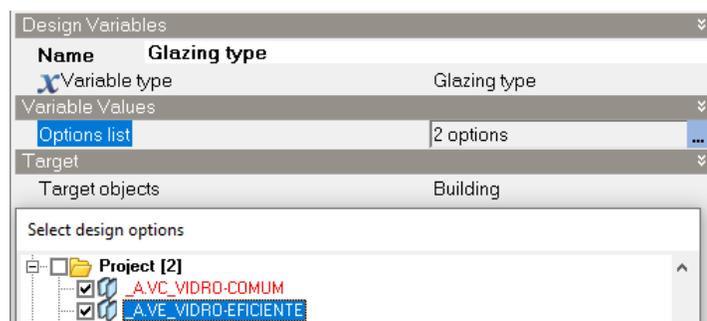
Fonte: autoria própria, 2024.

Figura 52 - Configuração variável paredes externas



Fonte: autoria própria, 2024.

Figura 53 - Configuração variável tipo de vidro



Fonte: autoria própria, 2024.

Após a conclusão das simulações de variáveis, os resultados foram analisados graficamente quanto aos objetivos traçados. O próprio *software* já indica os cenários mais otimizados, mas optou-se por exportar os resultados para melhor comparação entre os 32 cenários de cada um dos 6 modelos. Por conseguinte, os dados coletados foram importados na ferramenta Excel para análise do impacto, relevância e consistência de cada variável.

#### 4.5.3 Modelos Propostos – Com variáveis selecionadas

A partir das análises de resultados, foi possível selecionar os cenários de maior desempenho em relação aos modelos com e sem ventilação natural e diferentes cenários climáticos. No entanto, tais resultados foram obtidos em um Modelo Simplificado, o qual não considerava trocas térmicas com apartamentos vizinhos da forma mais assertiva.

Além disso, os objetivos da ferramenta de otimização do DesignBuilder não são totalmente compatíveis com a metodologia de desempenho térmico utilizada em edifícios habitacionais no Brasil, a NBR 15575.

Sendo assim, os cenários considerados mais adequados foram configurados nos seis Modelos Base, os quais foram sofrerem modificações nas paredes externas e aberturas para contemplarem as variáveis escolhidas. Estes foram chamados de Modelos Propostos e são considerados adequados para serem comparados com os Modelos Base por possuírem os mesmos parâmetros de modelagens, configurações e metodologia de avaliação, apenas otimizando paredes e aberturas.

Posteriormente, os resultados foram analisados a partir da Planilha de Cálculo da NBR 15575 disponibilizada pelo LabEEE, assim como os dados dos Modelos Base. Desta forma, foi possível comparar os indicadores de PHFT e CgTT, entre os Modelos Propostos e os Modelos Base.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 Comparação de arquivos climáticos de 2010, 2050 e 2090

Ao analisar os arquivos climáticos escolhidos para simulação do objeto de estudo desta pesquisa, é possível perceber aquecimento médio anual em relação ao clima atual de Brasília de 2,67 °C até 2050 e de 5,42 °C até 2090, o que representa um aumento de 125% em termos de temperatura do ar até 2090.

Considerando uma análise mensal, os meses de outubro e novembro são considerados os mais críticos (Tabela 13). O mês de outubro apresenta temperatura média de 24,64 °C no clima atual, subindo para 27,68 °C em 2050 e 32,05 °C em 2090, ao todo um acréscimo de 7,41 °C em relação à temperatura atual. Já o mês de novembro demonstra aumento de temperatura de 22,80 °C para 27,10 °C em 2050 e 31,45 °C em 2090, ao todo um acréscimo de 8,65 °C na temperatura atual.

Tabela 13 - Temperaturas externas de bulbo seco nos cenários climáticos analisados

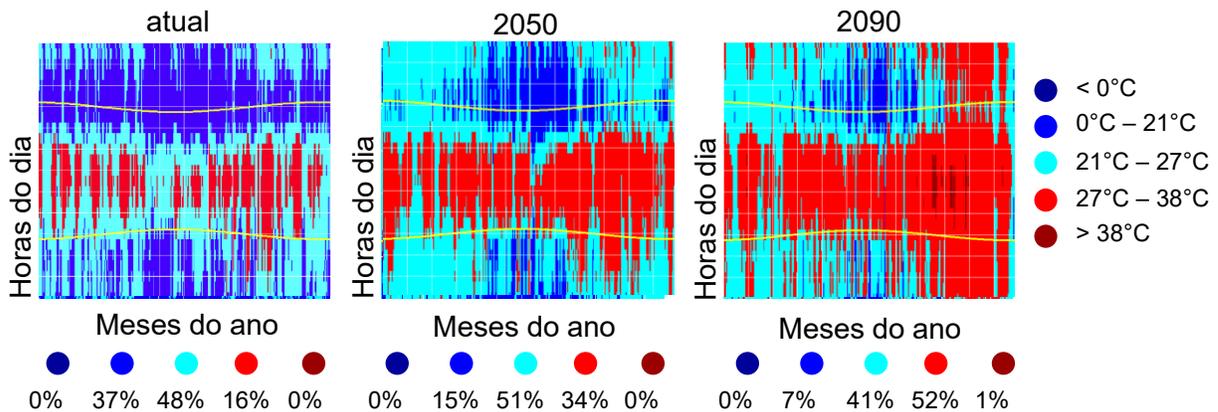
	2010	2050	2090	Δ °C entre 2010 e 2090
<i>janeiro</i>	22,50	25,48	26,42	3,93
<i>fevereiro</i>	22,82	24,50	26,48	3,65
<i>março</i>	22,52	24,41	26,23	3,70
<i>abril</i>	22,37	24,73	26,13	3,77
<i>maio</i>	20,97	23,33	25,73	4,76
<i>junho</i>	20,30	22,75	25,05	4,75
<i>julho</i>	19,73	21,66	24,88	5,15
<i>agosto</i>	21,20	23,91	26,36	5,16
<i>setembro</i>	22,68	25,36	30,00	7,32
<i>outubro</i>	24,64	27,68	32,05	7,41
<i>novembro</i>	22,80	27,10	31,45	8,65
<i>dezembro</i>	22,28	25,35	27,66	5,38

Fonte: Autoria própria, 2024.

As imagens extraídas do *software* ClimateConsultant indicam que as temperaturas anuais entre 27°C e 38°C atualmente representam 16% das horas do ano, mas a previsão é que haja aumento para 34% das horas em 2050 e 52% das horas em 2090 (Figura 54).

Além disso, atualmente as horas do ano acima de 38 °C são desprezíveis, porém estas representarão 1% das horas do ano em 2090.

Figura 54- Temperatura de bulbo seco nos cenários de clima atual, em 2050 e em 2090



Fonte: Autoria própria via *software* ClimateConsultant, 2024.

Conforme mencionado no item 4.3, a NBR 15575 estabelece três intervalos de temperaturas externas para serem considerados nos cálculos de desempenho térmico no Brasil. No intervalo 1, em que Brasília se enquadra, é necessário avaliar as cargas térmicas não apenas de resfriamento, como também de aquecimento, pois nela se enquadram localidades que podem apresentar desconforto por frio. Segundo os arquivos climáticos escolhidos, a cidade continuará se enquadrando no Intervalo 1 em 2050, porém quase no seu limite com TBSm de 24,69 °C. Já em 2090, Brasília passaria a se enquadrar no Intervalo 3, considerado o mais quente, com TBSm de 27,37 °C (Tabela 14). Desta forma, a carga térmica para aquecimento seria desconsiderada na análise, porém seguida de provável aumento da carga térmica de resfriamento.

Tabela 14- Arquivos climáticos para Brasília analisados quanto aos intervalos de temperaturas externas de bulbo seco

Ano representativo	Média anual da temperatura dos arquivos climáticos	Intervalos	Média anual da temperatura externa de bulbo seco (TBSm) °C
2010	22,06 °C	Intervalo 1	TBSm < 25,0 °C
2050	24,69 °C		
-	-	Intervalo 2	25,0 °C ≤ TBSm < 27,0 °C
2090	27,37 °C	Intervalo 3	TBSm ≥ 27,0 °C

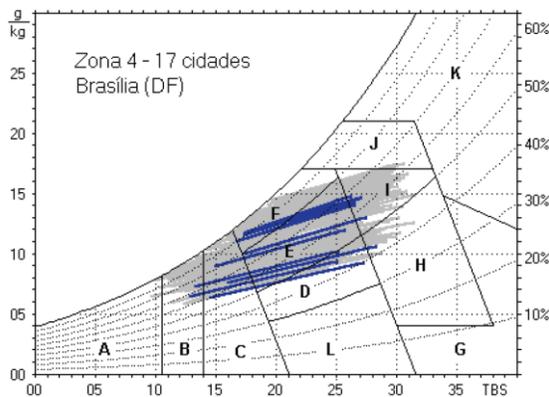
Fonte: autoria própria, 2024.

Além dos intervalos climáticos indicados pela NBR 15575, outra metodologia de enquadramento climático brasileiro é apontada pela NBR 15220. Esta norma divide o Brasil em 8 possíveis Zonas Bioclimáticas (ZB) de acordo com as condições de cada cidade (ABNT, 2005).

Atualmente, Brasília está inserida na ZB 4. No entanto, considerando as previsões de cenários climáticos futuros com maiores temperaturas e menor umidade relativa do ar, a capital do país possivelmente terá condições climáticas mais próximas às estabelecidas para a ZB 7. Isto é, analisando os arquivos climáticos pessimistas em questão, o clima de Brasília transitará suas condições de forma que fique mais próximo aos climas atuais de cidades como Cuiabá e Teresina ainda neste século.

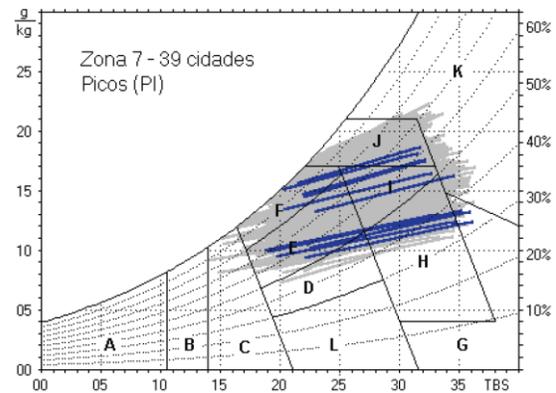
A Figura 55 representa a carta bioclimática da ZB4 e a Figura 56 representa a ZB7 conforme a NBR 15220 (2005). As cartas bioclimáticas representam os dados de temperaturas e umidade de cada mês do ano (linhas em azul). Os agrupamentos representados pelas letras indicam as estratégias bioclimáticas que devem ser adotadas buscando o conforto térmico para cada condição de temperatura e umidade.

Figura 55 – Carta bioclimática das normais climatológicas da ZB4



Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, (2005).

Figura 56 – Carta bioclimática das normais climatológicas da ZB7

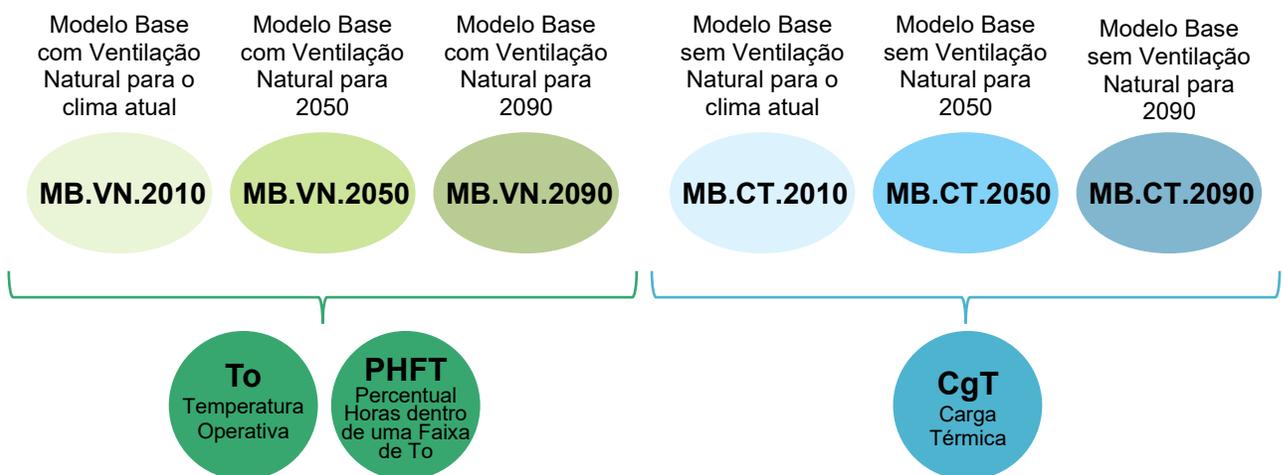


Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, (2005).

A partir destas imagens, é possível perceber que as diferenças climáticas impactam nas estratégias bioclimáticas adequadas para cada situação. O campo “E”, indicado como zonas de conforto pela norma, é predominante na ZB4, e passa a ser menos encontrado na ZB7. Além disso, a estratégia “J” inexistente na ZB4, é indicada para a ZB7. Esta estratégia indica a necessidade de ventilação seletiva, pois em alguns períodos é possível que a temperatura do ar externo seja tão quente que não seja desejável em ambientes internos.

## 5.2 Resultados de simulações computacionais dos Modelos Base

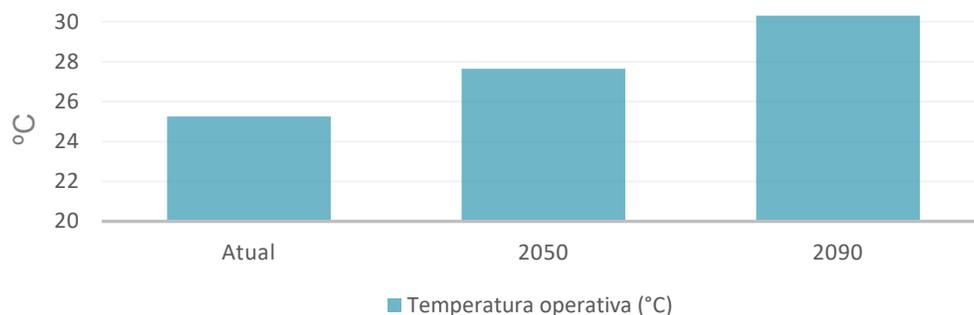
Neste item, são apresentados os resultados comparativos entre os Modelos Base simulados. Estes se dividem em seis modelos para comparação dos cenários climáticos futuros, sendo a metade deles considerando ventilação natural e a outra metade não. Os indicadores selecionados para a análise dos Modelos Base de Ventilação Natural (MB.VN) foram as Temperaturas Operativas ( $T_o$ ) e o Percentual de Horas dentro de uma Faixa de Temperatura Operativa (PHFT). Já para os Modelos Base sem Ventilação Natural (MB.CT), o indicador de análise foi a Carga Térmica (CgT).



### 5.2.1 Condição com ventilação natural

Os resultados dos MB.VN demonstram que há previsão de aumento das  $T_o$  médias anuais internas de 109% em 2050 e 120% em 2090. Este indicador reflete a média de todas as horas do ano na UH completa, incluindo tanto APPs quanto APTs. Sendo assim, é um dado mais universalista e permite a compreensão macro do apartamento como um todo independente de horários de ocupação (Gráfico 12).

Gráfico 12 - Média anual das temperaturas operativas dos modelos MB.VN.2010, MB.VN.2050 e MB.VN.2090



Fonte: Autoria própria, 2024.

Em termos percentuais, o impacto das mudanças climáticas na média anual de temperaturas de ambientes internos parece ser mais sutil. Entretanto, ao analisar a diferença de temperaturas em °C, percebe-se que o aumento será muito expressivo. Caso a prospecção climática selecionada para este estudo seja consolidada, a  $T_o$  média anual da UH subirá de 25,25 °C para 30,31 °C em 2090, um aumento de mais de 5 °C (Tabela 15).

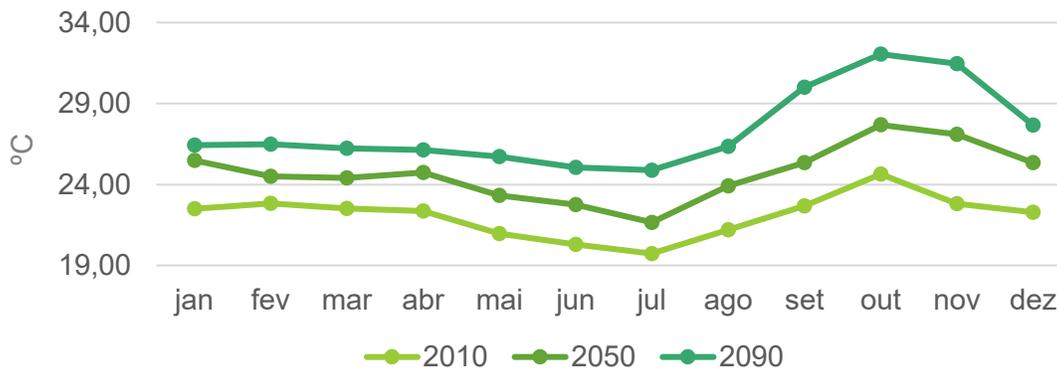
Tabela 15 - Média anual das temperaturas operativas dos modelos MB.VN.2010, MB.VN.2050 e MB.VN.2090

Cenário climático	Temperatura operativa (°C)	Taxa de crescimento (%)
Atual	25,25	100%
2050	27,64	109%
2090	30,31	120%

Fonte: Autoria própria, 2024.

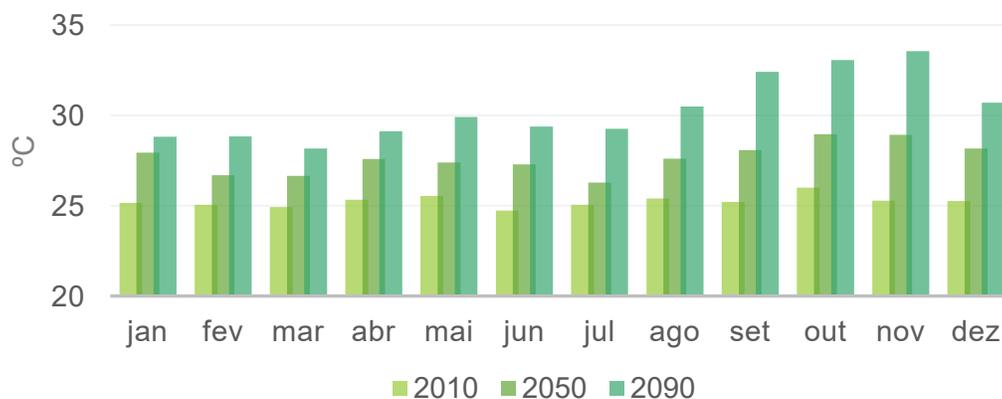
Ressalta-se que, a média anual engloba situações mensais mais ou menos quentes e amortece os números entre todas as temperaturas aferidas. Portanto, é necessária uma análise mais pontual mensal, diária e horária para a compreensão dos dados de forma mais assertiva. Ao analisar os resultados da média mensal de  $T_o$ , é possível observar que os meses mais quentes são outubro e novembro (Gráfico 14). Este dado indica que as temperaturas internas acompanham a tendência de temperaturas externas de bulbo seco (Gráfico 13).

Gráfico 13 - Média mensal das temperaturas externas de bulbo seco



Fonte: Autoria própria, 2024.

Gráfico 14 - Média mensal das temperaturas operativas dos modelos MB.VN.2010, MB.VN.2050 e MB.VN.2090 acompanhando tendência de temperaturas externas



Fonte: Autoria própria, 2024.

No clima atual, a média de  $T_o$  interna mensal não apresenta variações expressivas durante o ano, pois o mês mais frio (junho) apresenta temperatura média mensal de  $24,73^{\circ}\text{C}$ , apenas  $1,28^{\circ}\text{C}$  mais baixa que a temperatura média mensal do mês mais quente (outubro), que indica média mensal de  $26,01^{\circ}\text{C}$ . Já as temperaturas externas (TE) atuais indicam maiores variações ( $\Delta$ ): em julho a média da TE é de  $19,73^{\circ}\text{C}$  e em outubro é de  $24,64^{\circ}\text{C}$ , uma diferença de  $4,90^{\circ}\text{C}$ . Observa-se então não apenas que as temperaturas internas são mais quentes que as externas, mas também que isso ocorre com mais intensidade nos períodos menos quentes do ano. Sendo assim, apesar das  $T_o$

acompanharem as tendências das TE, o edifício tem comportamento térmico variável ao longo do ano e demonstra uma variação maior durante o inverno (Tabela 16).

Tabela 16 – Dados de To média mensal, TE média mensal, diferenças de temperaturas ( $\Delta$ ) entre meses mais quentes e mais frios, e diferenças entre To e TE para os cenários climáticos avaliados

	2010			2050			2090		
	To	TE	$\Delta$ °C To x TE	To	TE	$\Delta$ °C To x TE	To	TE	$\Delta$ °C To x TE
jan	25,15	22,50	2,65	27,93	25,48	2,45	28,82	26,42	2,39
fev	25,05	22,82	2,22	26,69	24,50	2,19	28,83	26,48	2,35
mar	24,93	22,52	2,41	26,65	24,41	2,24	28,16	26,23	1,94
abr	25,33	22,37	2,96	27,58	24,73	2,85	29,11	26,13	2,98
mai	25,54	20,97	4,57	27,40	23,33	4,06	29,91	25,73	4,18
jun	24,73	20,30	4,43	27,29	22,75	4,55	29,39	25,05	4,33
jul	25,05	19,73	5,31	26,28	21,66	4,63	29,26	24,88	4,37
ago	25,41	21,20	4,20	27,61	23,91	3,70	30,49	26,36	4,13
set	25,21	22,68	2,53	28,09	25,36	2,73	32,41	30,00	2,41
out	26,01	24,64	1,37	28,96	27,68	1,28	33,06	32,05	1,01
nov	25,28	22,80	2,48	28,93	27,10	1,83	33,56	31,45	2,11
dez	25,26	22,28	2,97	28,17	25,35	2,83	30,70	27,66	3,04
$\Delta$ °C máx. meses	1,28	4,90	-	2,67	6,02	-	5,40	7,17	-

Fonte: Autoria própria, 2024.

Ao analisar as condições do projeto analisado e a sua orientação solar, é possível perceber o porquê de as To de inverno serem tão próximas das To no verão mesmo havendo maior variação entre as TE. A UH avaliada possui a fachada com maiores aberturas voltadas para a orientação Norte e, no caso de Brasília, esta fachada não recebe radiação solar direta nos meses de verão, apenas no inverno. Este dado foi indicado no item 4.1.3, do Capítulo 4 e ilustrado pela Figura 21. Sendo assim, o objeto de estudo recebe ganho térmico elevado no inverno e, por isso não acompanha a queda de TE para este mesmo período.

Ao comparar o mesmo dado para arquivos climáticos futuros, é possível perceber que o  $\Delta$  máximo de temperatura entre os meses do ano continua menor nas To do que nas TE. Todavia, esta variação aumenta com as prospecções futuras em ambos os casos, chegando a 5,40 °C em temperaturas internas e 7,17 °C em TE no ano de 2090 (Tabela

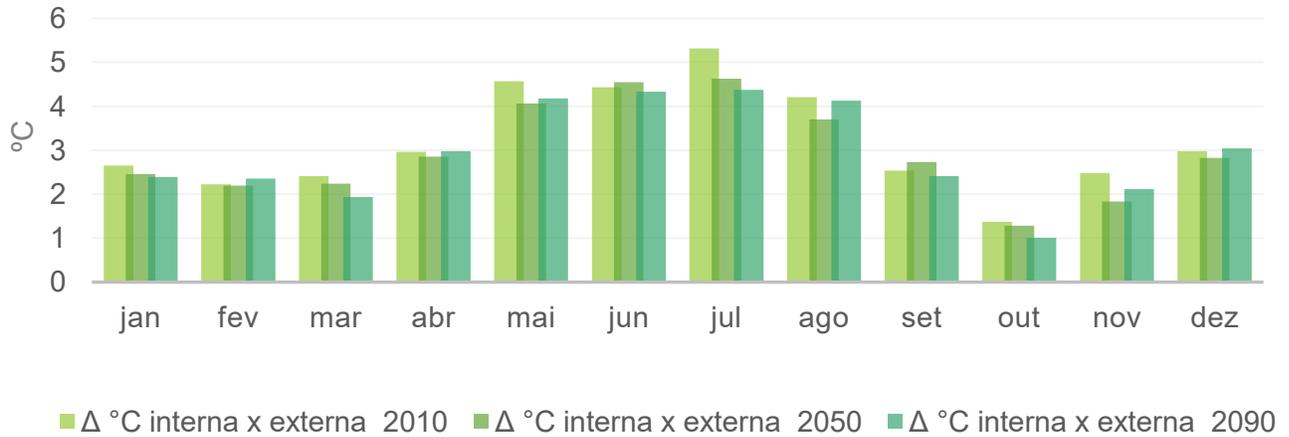
16). Esta variação de temperatura entre os meses do ano pode passar a impressão de que, no futuro, as temperaturas de verão ficarão mais quentes e de inverno ficarão mais frias. Porém, ao avaliar as temperaturas mensais, é possível compreender que, na verdade, todas as temperaturas aumentarão, inclusive no inverno. Mas o aumento dos meses mais quentes será tão expressivo que, mesmo o inverno estando mais quente, o  $\Delta$  entre os meses será 4,2 vezes maior em 2090 do que atualmente.

Comparando os valores de  $T_o$  com as  $T_E$ , a média mensal apresenta temperaturas internas mais elevadas que as temperaturas externas em todos os anos analisados. Isso significa que a envoltória do edifício não está sendo eficiente para o conforto térmico passivo do edifício. Para evitar o uso de estratégias ativas que consomem energia, o ideal é que o edifício promova temperaturas internas mais baixas que as externas para aumentar a sensação de conforto dos ocupantes e reduzir a dependência por ar-condicionado nos períodos de desconforto por calor (ABNT, 2013).

Por outro lado, a diferença entre as temperaturas internas e externas tende a diminuir levemente entre os arquivos climáticos futuros, mas não de forma relevante (Gráfico 15). Por exemplo, no clima atual, as temperaturas internas podem alcançar até  $5,31^{\circ}\text{C}$  a mais que as temperaturas externas no inverno, em 2050 esta diferença cai para  $4,63^{\circ}\text{C}$  e em 2090 para  $4,37^{\circ}\text{C}$  (Tabela 16). Desta forma, as temperaturas internas estão claramente aumentando entre os anos, mas aparentemente não na mesma intensidade do que o aumento de temperaturas externas.

Novamente, o  $\Delta$  entre as temperaturas internas e externas maior no inverno indica a condição de ganhos térmicos elevados da orientação Norte mais envidraçada do objeto de estudo em questão.

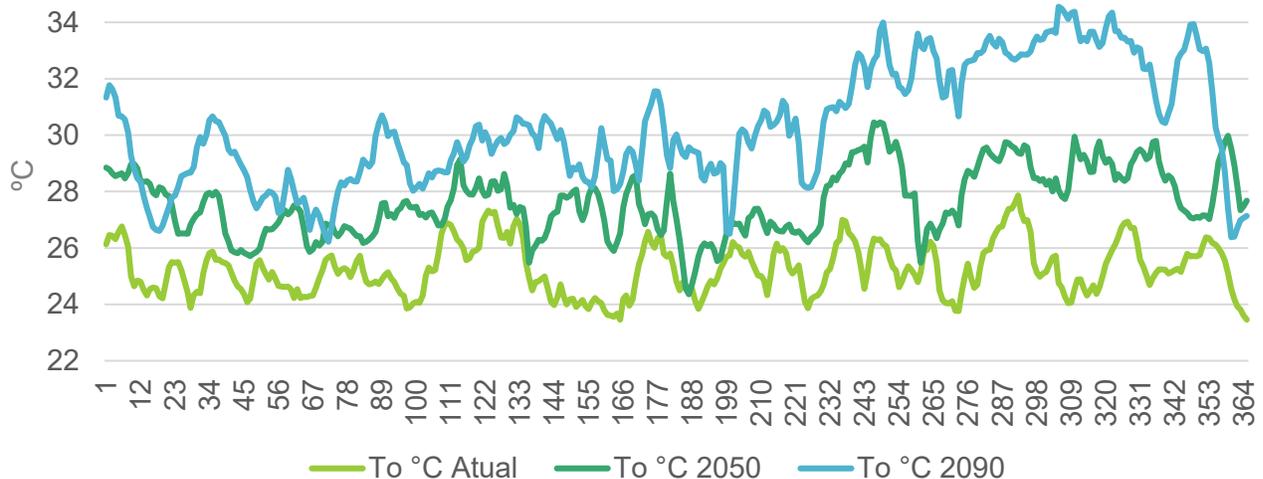
Gráfico 15 – Diferenças ( $\Delta$ ) entre temperaturas internas ( $T_o$ ) e externas ( $T_E$ ) por meses nos anos analisados



Fonte: Autoria própria, 2024.

Ao analisar os resultados por dias do ano, é possível observar que o aumento de temperaturas operativas é bastante heterogêneo, de forma que em alguns dias do ano, o aumento na  $T_o$  aumenta até 122% em 2050 e até 143% em 2090. A análise de temperaturas médias diárias expõe que atualmente o apartamento alcança média diária máxima de até 27,86 °C, porém em 2050, esta subirá 2,59 °C para 30,45 °C. Já em 2090, a temperatura máxima interna subirá 6,69 °C em relação ao clima atual para 34,55 °C.

Gráfico 16 - Resultado de aumento de  $T_o$  internas por dia nos arquivos climáticos avaliados



Fonte: Autoria própria, 2024.

Destaca-se aqui o fato de Brasília ser uma cidade com clima caracterizado pela alta amplitude térmica diária, com temperaturas diurnas muito maiores que as temperaturas noturnas. Portanto, os dados de temperaturas médias diárias podem mascarar os momentos de temperaturas extremas durante os dias, uma vez que as temperaturas caem bruscamente de madrugada. Assim, a análise das temperaturas seguindo a metodologia da NBR 15575 se mostra como mais assertiva e aprofundada, uma vez que esta exige a análise por hora de ocupação para cada APP. Por conseguinte, os dados de simulações foram extraídos por hora para cada APP e importados na planilha de cálculo da Norma conforme descrito no item 4.4.5 - Análise de indicadores do Modelo Base.

Gráfico 17 - To máxima por hora de ocupação em cada APP nos cenários climáticos avaliados



Fonte: Autoria própria, 2024.

Tabela 17 - To máxima por hora de ocupação em cada APP nos cenários climáticos avaliados

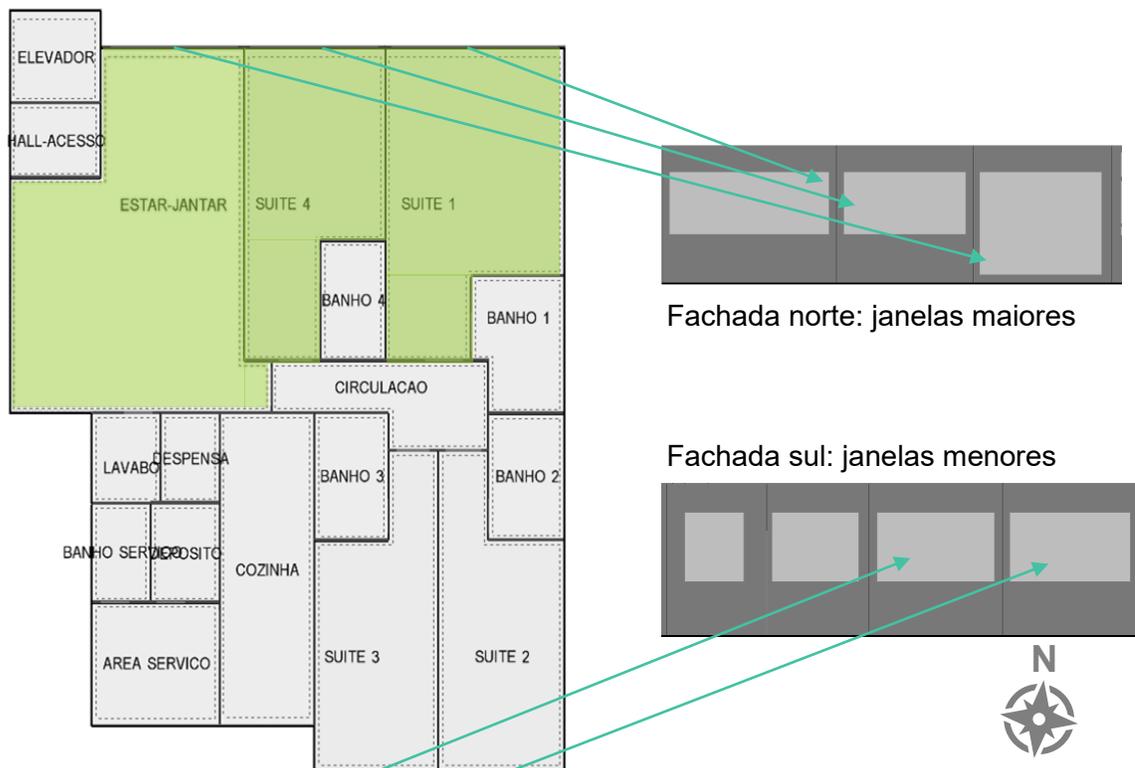
Tomax	Estar	Suite 1	Suite 2	Suite 3	Suite 4
2010	29,8	29,2	28,2	27,8	29,1
2050	33	31	30,9	30,3	30,7
2090	36,2	35,7	35,2	34,6	35,5

Fonte: Autoria própria, 2024.

A partir dos dados de To para cada hora ocupada dos APP, observam-se To máximas mais elevadas nos ambientes de sala de estar, suíte 1 e suíte 4 (Gráfico 17 e Tabela 17). Tal resultado se justifica pelo projeto e orientação solar, uma vez que estes

são os ambientes com fachadas voltadas para o Norte, a qual possui janelas maiores principalmente no ambiente de estar (Figura 57). Ao comparar as  $T_o$  máximas dos APPs no clima atual em relação ao clima de 2050, há aumento de temperatura de até  $3,2\text{ }^\circ\text{C}$  na sala de estar, ambiente com maior abertura. Já em 2090, os aumentos nas  $T_o$  máximas em todos os APPs, é entre  $6,4\text{ }^\circ\text{C}$  e  $7\text{ }^\circ\text{C}$ . Neste cenário, haverá picos de temperaturas elevados em horários ocupados em todos os ambientes, sendo que a sala de estar alcançará  $36,2\text{ }^\circ\text{C}$ .

Figura 57 – UH avaliada com APPs destaque em APPs de  $T_o$  máxima mais elevadas e suas aberturas



Fonte: Autoria própria, 2024.

Para a avaliação da UH por completo, a NBR 15575 indica que seja feita a média das  $T_o$  máximas dos APPs. Neste caso, é percebido um aumento de 111% nas  $T_o$  máximas entre o clima atual e 2050, com diferença de  $3,2\text{ }^\circ\text{C}$ . Este cenário se intensifica ainda mais em 2090, quando há aumento de 121% nas  $T_o$  máximas e subida de  $6,35\text{ }^\circ\text{C}$  no apartamento avaliado (Gráfico 18 e Tabela 18).

Gráfico 18 - To máxima por hora de ocupação da UH nos cenários climáticos avaliados



Fonte: Autoria própria, 2024.

Tabela 18 - To máxima por hora de ocupação da UH nos cenários climáticos avaliados

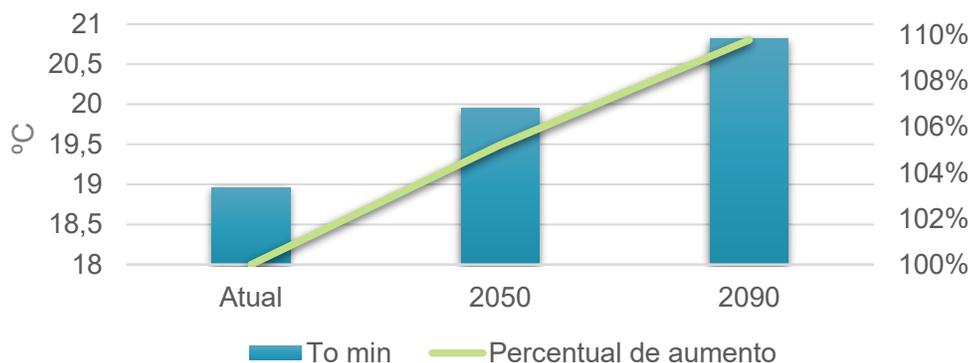
	To máx	Percentual de aumento	Aumento em °C
<b>Atual</b>	29,82	100%	-
<b>2050</b>	33,02	111%	3,2
<b>2090</b>	36,17	121%	6,35

Fonte: Autoria própria, 2024.

Já em relação às temperaturas operativas mínimas, é possível perceber que o desconforto por frio não é relevante para o apartamento avaliado. No cenário atual, a To mínima da UH em relação aos horários ocupados dos APPs é de 18,96 °C (Gráfico 19 e Tabela 19). O limite mínimo da faixa de temperatura operativa para o Intervalo 1, em que está Brasília, é de 18 °C, portanto, a To mínima da UH não indica desconforto por frio.

Fica claro também o aumento das To mínimas em relação aos arquivos climáticos futuros, indicando temperaturas mais quentes nos períodos de inverno com o passar dos anos. Em 2050, a To mínima alcança 19,95 °C, um valor de 0,99 °C a mais do que atualmente, representando um aumento de 105% em relação ao clima atual. Já em 2090, a To mínima sobe 1,86 °C em relação ao resultado atual, alcançando 20,82 °C representando um aumento de 110%.

Gráfico 19 - To mínima por hora de ocupação da UH nos cenários climáticos avaliados



Fonte: Autoria própria, 2024.

Tabela 19 - To mínima por hora de ocupação da UH nos cenários climáticos avaliados

	To mín.	Percentual de aumento	Aumento em °C
<b>Atual</b>	18,96	100%	-
<b>2050</b>	19,95	105%	0,99
<b>2090</b>	20,82	110%	1,86

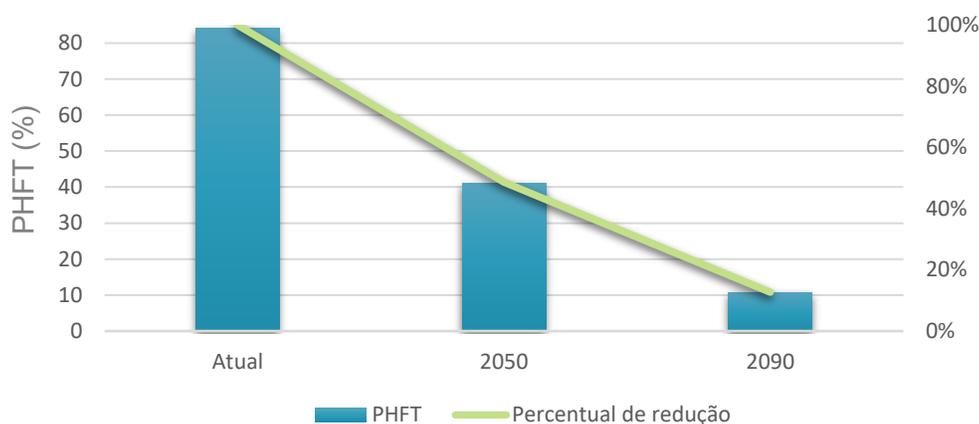
Fonte: Autoria própria, 2024.

Com base nos dados de To de cada hora dos APPs, a planilha de Excel (LabEEE, 2020) para cálculo dos indicativos da Norma desenvolve a contabilização do PHFT para cada APP e para a UH completa. Neste caso, é possível perceber uma queda drástica nas horas consideradas dentro da faixa de temperatura operativa, apontada como uma faixa aceitável para o conforto térmico dos ocupantes. No clima atual, o PHFT é de 84,15%, ou seja, grande parte das horas ocupadas do apartamento analisado estão dentro da faixa de temperatura entre 18 °C e 26 °C (Intervalo 1 da NBR 15575).

Todavia, em 2050 o PHFT cairá para 40,99% no cenário climático escolhido, uma redução de 49% em relação ao valor de PHFT do clima atual. Isso significa que em menos da metade das horas ocupadas da UH haverá temperaturas consideradas aceitáveis para o conforto considerando a ventilação natural. Em 2090, a situação se torna ainda mais preocupante, com uma queda do PHFT para 10,68%. Este valor representa apenas 13% do PHFT alcançado atualmente (Gráfico 20 e Tabela 20).

Os valores de redução do PHFT são mais acentuados do que os valores de análise de temperatura isoladamente porque este é um indicador binário. Se a temperatura não se enquadrar no intervalo estabelecido naquele momento, a hora não é contabilizada como confortável. Apesar de suas limitações este indicador é assertivo para exemplificar a transição de condições climáticas de conforto na maior parte do ano de Brasília para condições climáticas de calor extremo em que a ventilação natural é insuficiente para reestabelecer o conforto.

Gráfico 20 – Resultados de PHFT para a UH e percentual de redução deste indicativo entre anos climáticos avaliados



Fonte: Autoria própria, 2024.

Tabela 20 - Resultados de PHFT para a UH e percentual de redução deste indicativo entre anos climáticos avaliados

	PHFT	% de PHFT dos climas futuros em comparação com o atual
<b>Atual</b>	84,15%	100%
<b>2050</b>	40,99%	49%
<b>2090</b>	10,68%	13%

Fonte: Autoria própria, 2024.

Estes resultados demonstram a importância de estudos dos impactos do aquecimento global em diferentes localizações, especialmente em climas já quentes no presente momento. Se as horas fora da faixa de temperatura operativa forem consideradas como horas de desconforto, este dado sairia de 15,85% no clima atual para 89,32% em 2090, representando um aumento de desconforto nas horas ocupadas de

564%. A pesquisa de Hosseini *et al.* (2022), citada no item 3.1.1, também avalia simula edifícios residenciais para analisar os impactos das mudanças climáticas, porém no contexto do clima sueco. Neste estudo, o aumento do percentual de desconforto por calor dos edifícios simulados foi de 140%, representando 4 vezes menos desconforto do que os resultados do presente estudo no clima de Brasília.

Claramente, esta comparação apresenta ressalvas pois as condições de simulação são distintas tanto no objeto de estudo, quanto na metodologia de análise e nos arquivos climáticos. No entanto, como as temperaturas subirão em todo o globo, é natural que cidades com temperaturas atualmente mais frias sofram menos com desconforto quando comparadas com cidades com temperaturas já quentes que alcançarão extremos climáticos no futuro.

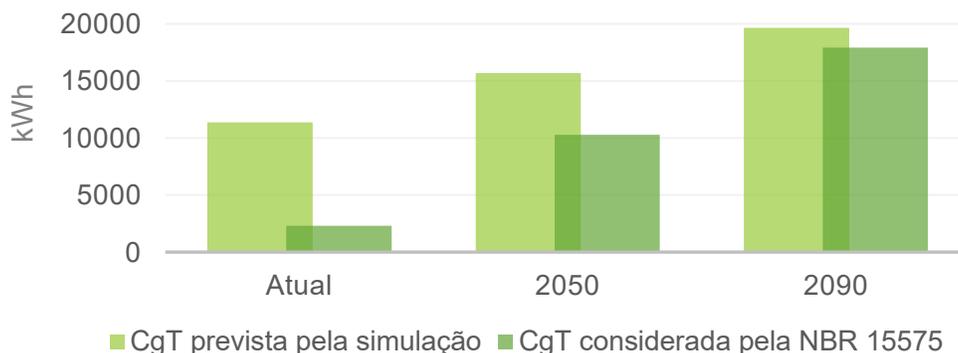
### 5.2.2 Condição sem ventilação natural

Os arquivos de Modelos Base sem ventilação natural (MB.CT) foram configurados para a contabilização de carga térmica (CgT) necessária para reestabelecer o conforto de APPs sempre que ocupados considerando o *setpoint* de 23 °C para resfriamento e de 21 °C para aquecimento. No entanto, a NBR 15575 estabelece que a CgT seja contabilizada para o Intervalo 1 apenas quando as temperaturas operativas do modelo com ventilação natural forem maiores que 26 °C para resfriamento e menores que 18° C para aquecimento. Sendo assim, os resultados de CgT gerados pelo DesignBuilder nos MB.CT foram inseridos na planilha de cálculo de indicadores da norma (LabEEE, 2020) para que pudessem ser contabilizadas de acordo com as To dos MB.VN.

Foi possível perceber diferenças expressivas entre os valores de carga térmica extraídos do software e os valores adquiridos após o cálculo da planilha de indicadores da norma, principalmente para o MB.CT.2010. Isso porque, no clima atual, o MB.VN apresenta poucas To acima de 26 °C, portanto apenas 20% da CgT prevista pelo *software* é considerada pela metodologia da NBR 15575. Já em 2050, a quantidade de horas de ocupação dos APPs acima de 26 °C sobre consideravelmente e 65% da CgT total prevista é considerada pela norma. Em 2090, como grande parte das To ocupadas são acima de

26 °C, 91% de toda a carga térmica prevista pelo software é considerada pela NBR 15575 (Gráfico 21 e Tabela 21).

Gráfico 21 - Comparação entre resultados de Carga Térmica (CgT) previstos pela simulação e considerados pela NBR 15575 de acordo com os cenários climáticos



Fonte: Autoria própria, 2024.

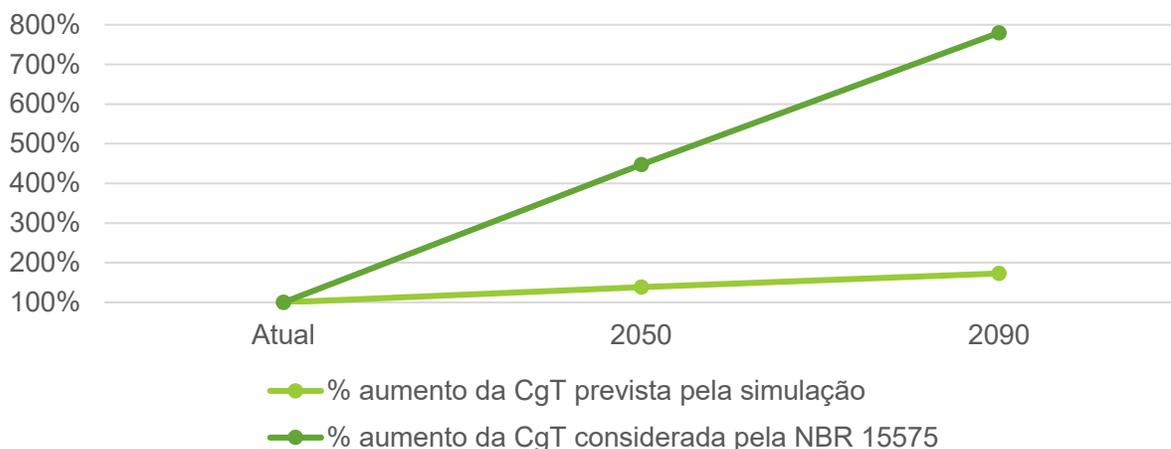
Tabela 21 – Comparação entre resultados de Carga Térmica (CgT) previstos pelo software e considerados pela NBR 15575 de acordo com os cenários climáticos

	CgT prevista pela simulação (kWh)	% aumento	CgT considerada pela NBR 15575 (kWh)	% aumento	% da CgT da simulação considerada pela NBR 15575
<b>Atual</b>	11357,35	-	2298,97	-	20%
<b>2050</b>	15694,7	138%	10275,72	447%	65%
<b>2090</b>	19645,13	173%	17926,94	780%	91%

Fonte: Autoria própria, 2024.

Considerando esta condição de análise, o percentual de aumento da CgT entre os cenários climáticos avaliados é muito menor para os dados extraídos pelo DesignBuilder do que o percentual de aumento da carga térmica contabilizada pela NBR 15575. No primeiro caso, há um aumento expressivo de 138% na CgT prevista para 2050 e de 173% na CgT prevista para 2090. Este aumento extraído das simulações dos MB.CT já é considerado elevado, mas é substancialmente inferior ao percentual de aumento da CgT considerada pela Norma. Ao considerar este indicador apenas quando as To dos MB.VN forem acima de 26 °C, o percentual de aumento da CgT sobe para 447% em 2050, e para 780% em 2090 (Gráfico 22).

Gráfico 22 – Percentual de aumento de Carga Térmica (CgT) previstos pelo software e considerados pela NBR 15575 de acordo com os cenários climáticos



Fonte: Autoria própria, 2024.

Os valores de CgT de resfriamento encontrados nesta pesquisa são consideravelmente maiores do que os encontrados Jalali *et al.* (2023), o qual avaliou edifícios residenciais na Nova Zelândia. Nesta pesquisa, o consumo de ar-condicionado em 2080 subiria em 89% para a cidade de Auckland, 130% em Wellington e 48% em Christchurch. Já no artigo de Rodrigues *et al.* (2023), o aumento da CgT para resfriamento aumentaria 121% em 2080 para um edifício em Portugal. No entanto, é importante salientar novamente que comparações entre estudos devem ser feitas com ressalvas, uma vez que as condições de simulação, método, objeto de estudo e parâmetros de arquivos climáticos não são equiparáveis.

Os valores de carga térmica mensal e horários foram considerados conforme proposto pela NBR 15575, por ser um método amplamente validado e adequado à realidade nacional. Ao avaliar mensalmente o resultado de CgT, os meses com maiores valores deste indicador estão presentes no segundo semestre, assim como as temperaturas externas. Em todos os cenários climáticos analisados, o mês com maior previsão de CgT para resfriamento é outubro, com valores de 484kWh no clima atual, 1.463kWh em 2050 e 1.997kWh em 2090 (Tabela 22).

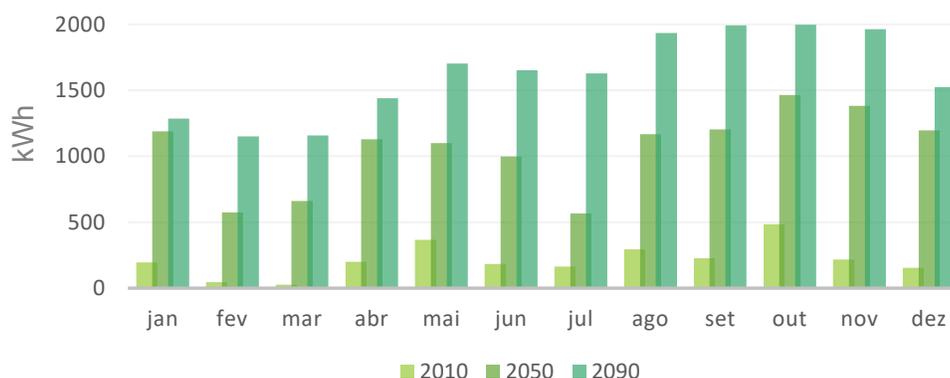
Tabela 22 – Dados de previsão de cargas térmicas mensais em kWh entre os cenários climáticos analisados

	2010	2050	2090
jan	194,13	1189,68	1284,82
fev	45,06	573,85	1150,29
mar	25,61	661,69	1158,28
abr	199,35	1128,51	1440,99
mai	365,63	1101,22	1704,18
jun	183,45	998,64	1651,67
jul	164,67	567,03	1629,40
ago	294,07	1168,41	1935,02
set	226,77	1202,98	1993,66
out	484,42	1463,95	1997,93
nov	217,34	1383,39	1963,77
dez	154,32	1197,06	1524,16

Fonte: Autoria própria, 2024.

Observa-se que no inverno há previsão alta de carga térmica principalmente nos arquivos climáticos futuros. Provavelmente este dado se justifica porque, especificamente nesta planta, a maioria dos APPs estão voltados para norte, a qual em Brasília não recebe radiação direta no verão, apenas no inverno (Gráfico 23). Além disso, conforme item 5.2.1, há tendência de subida nas To no inverno para as condições climáticas futuras.

Gráfico 23 - Dados de previsão de cargas térmicas mensais entre os cenários climáticos

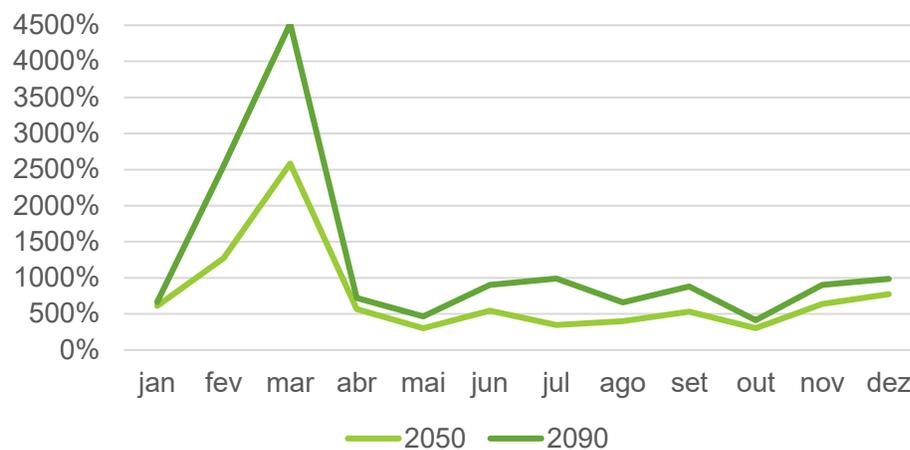


Fonte: Autoria própria, 2024.

Apesar de o mês com maior carga térmica ter sido outubro, os primeiros meses do ano apresentaram maior diferença entre a CgT prevista para o clima atual em comparação com a previsão de cenários climáticos futuros. O mês que apresenta a maior

diferença é março, com percentuais de aumento de 2.584% em 2050 e 4.523% em 2090 em comparação com a carga térmica para o mesmo mês prevista para o arquivo climático atual. Isso porque atualmente março é o mês com To mais amenas e praticamente não há previsão de CgT, com valor de apenas 26kWh. Em 2050 e 2090, março continua sendo um dos meses com menor previsão de CgT, mas os valores sobem consideravelmente para 662kWh no primeiro ano e 1.158kWh no segundo ano (Gráfico 24).

Gráfico 24 – Percentual de diferença entre valores de cargas térmicas previstas para cada mês de 2050 e 2090 em relação ao clima atual



Fonte: Autoria própria, 2024.

Os resultados de simulação indicaram que não há carga térmica para aquecimento em todos os MB.CT. Isso porque, conforme a metodologia da NBR 15575, esta deve ser considerada apenas quando as To dos APPs do modelo com ventilação natural forem menores que 18 °C. Conforme indicado no item 5.2.1, as To mínimas das UHs de todos os cenários climáticos se mantêm abaixo de 18 °C, demonstrando que não há necessidade de uso de energia ativa (aquecedores de ambiente) para estabelecer o conforto em dias mais frios no objeto de estudo avaliado.

### 5.3 Resultados de simulações simultâneas de variáveis de projeto

As simulações simultâneas de variáveis geraram 32 combinações de resultados possíveis de desconforto térmico e carga térmica em cada arquivo climático considerado (Tabela 23), sendo ao todo 192 possibilidades simuladas. A combinação número 6 foi destacada na tabela por ser o cenário simulado nos Modelos Base cujos resultados foram explanados no item 5.2.

Tabela 23 – Combinações entre variáveis projetuais simuladas pela ferramenta de otimização para cada condição de ventilação e clima

Combinação	Paredes	Janela	Vidro	Sombreamento
1	P.CS	A.JP	A.VC	A.CV
2	P.CS	A.JP	A.VC	A.SV
3	P.CS	A.JP	A.VE	A.CV
4	P.CS	A.JP	A.VE	A.SV
5	P.CS	A.JM	A.VC	A.CV
6	P.CS	A.JM	A.VC	A.SV
7	P.CS	A.JM	A.VE	A.CV
8	P.CS	A.JM	A.VE	A.SV
9	P.CD	A.JP	A.VC	A.CV
10	P.CD	A.JP	A.VC	A.SV
11	P.CD	A.JP	A.VE	A.CV
12	P.CD	A.JP	A.VE	A.SV
13	P.CD	A.JM	A.VC	A.CV
14	P.CD	A.JM	A.VC	A.SV
15	P.CD	A.JM	A.VE	A.CV
16	P.CD	A.JM	A.VE	A.SV
17	P.PI	A.JP	A.VC	A.CV
18	P.PI	A.JP	A.VC	A.SV
19	P.PI	A.JP	A.VE	A.CV
20	P.PI	A.JP	A.VE	A.SV
21	P.PI	A.JM	A.VC	A.CV
22	P.PI	A.JM	A.VC	A.SV
23	P.PI	A.JM	A.VE	A.CV
24	P.PI	A.JM	A.VE	A.SV
25	P.LI	A.JP	A.VC	A.CV
26	P.LI	A.JP	A.VC	A.SV
27	P.LI	A.JP	A.VE	A.CV
28	P.LI	A.JP	A.VE	A.SV
29	P.LI	A.JM	A.VC	A.CV
30	P.LI	A.JM	A.VC	A.SV
31	P.LI	A.JM	A.VE	A.CV
32	P.LI	A.JM	A.VE	A.SV

Fonte: Autoria própria, 2024.

Legenda Tabela 23:

**Paredes:**

P.CS: Parede simples de bloco cerâmico ( $U=1,83W/m^2.K$ ,  $CT=161kJ/m^2.K$ )

P.CD: Parede dupla de blocos cerâmicos ( $U=1,27W/m^2.K$ ,  $CT=195kJ/m^2.K$ )

P.PI: Parede pesada isolada pré-moldada com concreto armado e isopor ( $U=0,40W/m^2.K$ ,  $CT=193kJ/m^2.K$ )

P.LI: Parede leve isolada em drywall com placa cimentícia, lã de rocha e gesso ( $U=0,40W/m^2.K$ ,  $CT=53kJ/m^2.K$ )

**Aberturas:**

A.JM: Aberturas com janelas médias ( $WWR=36\%$ )

A.JP: Aberturas com janelas pequenas ( $WWR=18\%$ )

A.VC: Abertura com vidro comum ( $FS=87\%$ )

A.VE: Abertura com vidro eficiente ( $FS=40\%$ )

A.SV: Abertura sem veneziana (sombreamento  $0\%$ )

A.CV: Abertura com veneziana (sombreamento  $100\%$ )

**Desconforto ASHRAE 55:**

Horas de desconforto segundo metodologia de aceitabilidade de conforto adaptativo da ASHRAE 55 para  $80\%$  das pessoas

A partir dos dados coletados foi possível selecionar a combinação de variáveis que refletiu melhores resultados para cada condição de ventilação e cada clima. Os dados mais importantes serão discorridos de forma resumida neste capítulo. No entanto, todos os resultados dos modelos ventilados naturalmente foram compilados na tabela disposta no APÊNDICE I. Já os resultados dos modelos sem ventilação natural, foram apresentados na tabela do APÊNDICE III. Além disso, cada variável foi analisada quanto ao impacto nos resultados para a compreensão de grau de relevância de cada uma.

### 5.3.1 Condição naturalmente ventilada

#### 5.3.1.1 Melhores combinações

Para os modelos que consideram a ventilação natural, o melhor cenário de combinação de variáveis para o clima atual foi o número 11, o qual combina paredes duplas de blocos cerâmicos (P.CD), janelas pequenas (A.JP), vidros eficientes (A.VE) e sombreamento por venezianas (A.CV). Já para os cenários climáticos de 2050 e 2090, o melhor cenário de combinações de variáveis foi o número 3. Esta opção mantém

exatamente as mesmas variáveis do que a combinação 11, exceto as paredes externas, que são em blocos cerâmicos simples (P.CS) (Tabela 26).

Tabela 24 – Resultados das combinações de variáveis com menor desconforto para os cenários climáticos avaliados

	Combinação	Conforto ASHRAE 55 (horas)	Paredes	Janela	Vidro	Sombream.
<b>2010</b>	11	240	<b>P.CD</b>	A.JP	A.VE	A.CV
<b>2050</b>	3	954	<b>P.CS</b>	A.JP	A.VE	A.CV
<b>2090</b>	3	1601	<b>P.CS</b>	A.JP	A.VE	A.CV

Fonte: Autoria própria, 2024.

Atualmente, a parede mais indicada para o modelo simulado seria a parede dupla, o que indica que hoje em dia, valores mais altos de capacidade térmica e de inércia térmica podem beneficiar as condições térmicas na UH avaliada. No entanto, com o aquecimento global, a simulação indica que a parede simples seria mais indicada, o que sugere que com climas mais quentes, a capacidade térmica não deve ser tão alta. Isso porque as temperaturas externas serão naturalmente mais quentes e a amplitude térmica diária menor.

Ainda assim, a diferença de conforto entre o tipo de parede mais adequado para o clima atual e os cenários climáticos futuros não é tão representativa. A Tabela 25 demonstra os percentuais de diferenças em valores de desconforto quando comparados às combinações 3 e 11 entre os arquivos climáticos atuais e futuros. A alteração entre parede simples ou dupla tem influência de 4% no desconforto do clima atual, 7% para 2050 e 3% para 2090.

Tabela 25 – Comparação entre resultados de desconforto de diferentes combinações para os cenários climáticos avaliados

	Combinação 11 (P.CD) (horas)	Combinação 3 (P.CS) (horas)	% entre 3 e 11	Combinação 6 (m. base) (horas)	% entre 6 e 11	% entre 6 e 3
<b>2010</b>	240	250	104%	1274	531%	510%
<b>2050</b>	1025	954	93%	1833	179%	192%
<b>2090</b>	1651	1601	97%	2001	121%	125%

Fonte: Autoria própria, 2024.

Por outro lado, ao comparar o benefício da combinação otimizada de cada clima com a combinação 6 (condições do Modelo Base), a diferença no nível de conforto é extremamente alta principalmente para o clima atual. Pelos dados ilustrados na Tabela 25, é possível constatar aumento superior a 5 vezes no conforto para o clima atual se qualquer uma das combinações 3 ou 11 fosse adotada. Esta melhoria de resultados cai intensamente nos cenários climáticos futuros, entre 179% e 192% em 2050 e entre 121% e 125% em 2090. Este dado indica que mesmo com a melhor combinação entre as variáveis testadas, ainda não seria o suficiente para estabelecer o conforto da UH como no clima atual.

Com base nos dados apresentados, entende-se que tanto a combinação de variáveis 3, quanto a combinação número 11 seriam adequadas ao modelo naturalmente ventilado e teriam capacidade de reduzir o desconforto da UH avaliada, principalmente no clima atual.

### 5.3.1.2 Impacto de variáveis

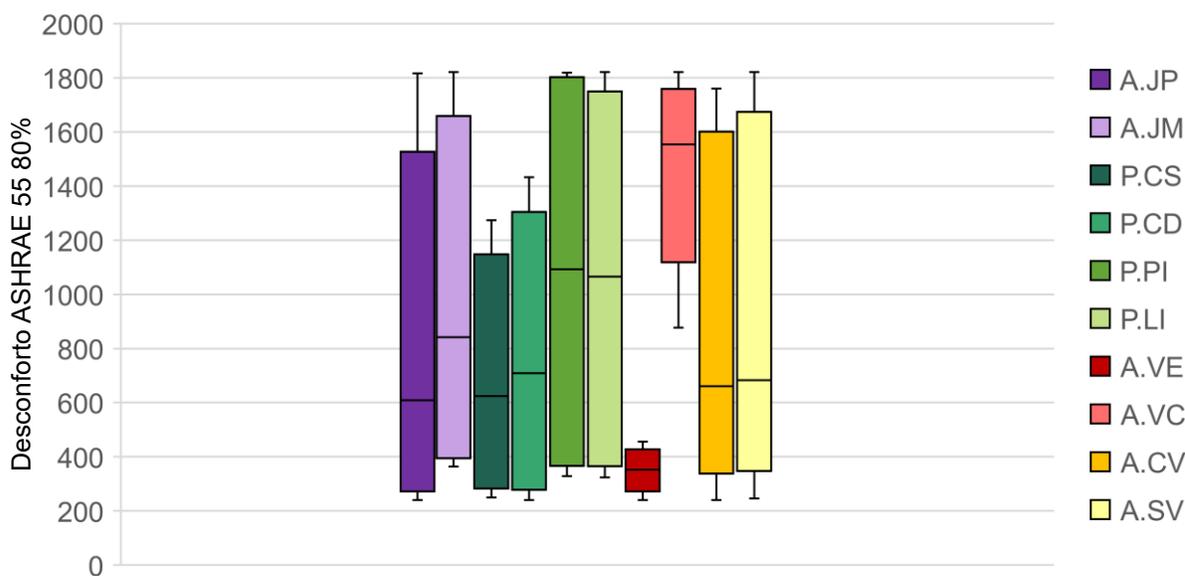
Para avaliar a relevância de cada variável nos resultados para as simulações, foram compilados os valores de desconforto disponíveis pra cada uma delas e gerados gráficos de *boxplot* (diagrama de caixas). Tal tipologia de gráfico permite a visualização da distribuição de dados, ilustrando valores mínimos e máximos que cada variável alcança, além de indicar a concentração de resultados dispostos pela mediana.

Foram gerados gráficos de *boxplot* para os resultados de simulações dos três arquivos climáticos estudados para os modelos de ventilação natural. Em todos os anos, os resultados apresentaram o mesmo padrão de relevância entre as estratégias apresentadas, com poucas variações entre eles. Assim sendo, a análise deste capítulo irá considerar os dados extraídos do modelo com arquivo climático atual. Todavia, gráficos gerados para os anos de 2050 e 2090 foram ilustrados no APÊNDICE IV deste documento.

Para facilitar a leitura do gráfico, as variáveis foram agrupadas por cores. As dimensões de janelas representadas em roxo/lilás, as paredes externas em verde, os tipos de vidros em vermelho e o uso da veneziana em amarelo.

Ao analisar os dados dispostos no Gráfico 25, é possível concluir que a variável que mais tem influência nos resultados de menor desconforto é o vidro eficiente. A característica compilada da caixa e concentrada na parte inferior do gráfico demonstra consistência nos resultados de baixo desconforto. Os tipos de paredes estão em segundo lugar na relevância dos resultados. Principalmente as paredes de blocos cerâmicos simples e dupla, as quais concentraram melhores resultados quanto aos tipos de paredes. Há uma maior variabilidade entre os dados de paredes, mas é possível perceber concentração de resultados com baixo desconforto em ambos os casos de blocos cerâmicos vide locação da mediana no quadrante inferior do gráfico.

Gráfico 25 – *Boxplots* de relevância de cada variável nos resultados do modelo com ventilação natural para o clima atual



Fonte: Autoria própria, 2024.

O tamanho das aberturas apresenta grande variabilidade de resultados, mas é possível perceber que as janelas pequenas apresentam concentração da mediana inferior às janelas médias, indicação clara que janelas menores seriam mais favoráveis. O impacto de maneira secundária deste dado pode ser justificado pois, ao mesmo tempo

que janelas menores reduzem o ganho térmico por radiação, elas apresentam menos área de ventilação efetiva, o que prejudica a renovação de ar e resfriamento de temperaturas internas.

Por fim, o uso de veneziana, apesar de aparecer nas combinações de menor desconforto (3 e 11), parece não ter tanto impacto nos resultados. Esta variável apresenta grande variabilidade de resultados e as medianas estão muito próximas, o que indica que ela não apresenta relevância expressiva. Este dado pode ser justificado porque a NBR15575 estabelece que as venezianas devem ser consideradas apenas quando as temperaturas externas forem maiores que 26 °C, diferentemente do vidro, que evita o ganho térmico em todas as horas de sol. Além disso, por se tratar de venezianas, o seu uso acaba prejudicando a ventilação para o modelo ventilado naturalmente pois, quando estas estão fechadas, a ventilação efetiva é reduzida significativamente e ocorre apenas pelos orifícios das venezianas.

Ademais, é importante lembrar que, o conforto é um valor binário e não reflete necessariamente o impacto da estratégia caso não se alcance uma temperatura mínima. Ao avaliar apenas a temperatura operativa, esta variável provoca uma diferença de até 0,6 °C em dias mais quentes. Porém, a diferença que a estratégia causa não é suficiente para que a  $T_o$  seja considerada confortável na maioria das vezes.

### 5.3.2 Condição de climatização artificial

#### 5.3.2.1 Melhores combinações

Para os modelos que não consideram a ventilação natural, o melhor cenário de combinação de variáveis para o clima atual e para o clima de 2050 foi o número 27, o qual combina paredes leves e isoladas em placa cimentícia + lã de rocha + gesso (P.LI), janelas pequenas (A.JP), vidros eficientes (A.VE) e sombreamento por venezianas (A.CV). Já para o cenário climático de 2090, o melhor cenário de combinações de

variáveis foi o número 19. Esta opção mantém exatamente as mesmas variáveis do que a combinação 27, exceto as paredes externas, que são pesadas e isoladas (P.PI) (Tabela 26).

Tabela 26 – Resultados das combinações de variáveis com menor carga térmica para os cenários climáticos avaliados

	Combinação	Carga térmica (kWh)	Paredes	Janela	Vidro	Sombream.
<b>2010</b>	27	3296	<b>P.LI</b>	A.JP	A.VE	A.CV
<b>2050</b>	27	4519	<b>P.LI</b>	A.JP	A.VE	A.CV
<b>2090</b>	19	5736	<b>P.PI</b>	A.JP	A.VE	A.CV

Fonte: Autoria própria, 2024.

A Tabela 27 demonstra que a diferença de quantidade de CgT prevista entre paredes leves e isoladas ou pesadas e isoladas não é significativa entre os anos avaliados. Constata-se que a diferença entre as combinações 19 e 27 geram alterações de 3% no resultado do clima atual, e apenas 1% nos climas futuros de 2050 e 2090. Entretanto, ao comparar o benefício da combinação otimizada de cada clima com a combinação 6 (condições do Modelo Base), a diferença na carga térmica é expressiva em todos os cenários climáticos, com aumento de 247% a 280%.

Tabela 27 – Comparação entre resultados de desconforto de diferentes combinações para os cenários climáticos avaliados

	Combinação 27 (P.LI) (horas)	Combinação 19 (P.PI) (horas)	% entre 19 e 27	Combinação 6 (horas)	% entre 6 e 27	% entre 6 e 19
<b>2010</b>	3296	3379	103%	9218	280%	273%
<b>2050</b>	4519	4578	101%	11827	262%	258%
<b>2090</b>	5769	5736	99%	14266	247%	249%

Fonte: Autoria própria, 2024.

Com base nos dados apresentados, entende-se que ambas as combinações de variáveis 19 e 27 seriam adequadas ao modelo sem ventilação natural e teriam grande impacto na redução da previsão de carga térmica da UH avaliada em todos os anos considerados.

### 5.3.2.2 Impacto de variáveis

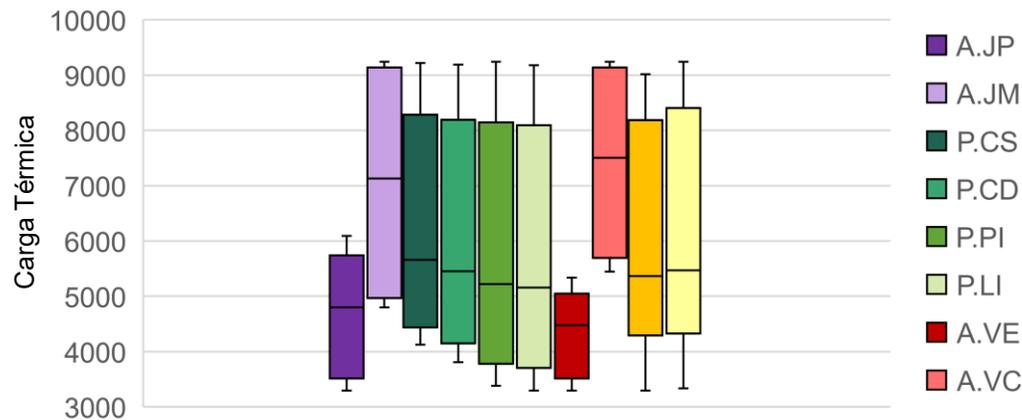
Assim como no modelo com ventilação natural, os resultados das simulações dos modelos sem ventilação natural foram compilados em gráficos de *boxplot* de acordo com a carga térmica prevista para cada variável proposta (Gráfico 26). Novamente, o tipo de vidro foi o fator mais sensível ao resultado. O gráfico demonstra grande consistência nos resultados apresentados pelo vidro eficiente, com valores concentrados na parte inferior demonstrando baixa carga térmica prevista.

Ao contrário dos modelos com ventilação natural, há diferença de concentração visível dos resultados de janelas menores em relação às maiores, sendo o segundo aspecto mais relevante nos resultados. Isso demonstra uma provável confirmação de que este dado era menos relevante para o modelo ventilado porque influencia no percentual de ventilação efetiva, condição desconsiderada para os modelos de avaliação de carga térmica. Além disso, ao considerar o uso de equipamentos de ar-condicionado, a redução de dimensões de aberturas também influencia na eficiência do sistema, já que as janelas são comumente um ponto frágil ao isolamento.

As paredes se comportaram de forma mais homogênea, porém, é possível perceber o impacto maior do isolamento nos resultados de carga térmica, mostrando melhores resultados nas paredes isoladas (P.LI e P.PI) com medianas concentradas na parte inferior do gráfico e valores mínimos mais baixos que as paredes de blocos cerâmicos.

Em relação ao uso de venezianas, os resultados não são tão expressivos porque segundo a NBR 15.575, as venezianas devem ser consideradas apenas quando as temperaturas externas forem superiores a 26 °C, o que normalmente ocorre durante o dia, quando não há ocupação nos APPs e, portanto, em horários em que a carga térmica não é considerada.

Gráfico 26 - *Boxplots* de relevância de cada variável nos resultados do modelo sem ventilação natural para o clima atual



Fonte: Autoria própria, 2024.

### 5.3.3 Impacto de utilização de melhores combinações de carga térmica nos modelos de ventilação natural

Os resultados de simulações simultâneas demonstram que as combinações de variáveis para a redução tanto do desconforto térmico quanto das cargas térmicas sempre envolvem as mesmas condições para aberturas: janelas pequenas (A.JP), vidros eficientes (A.VE) e utilização de venezianas (A.CV).

A única variável entre as combinações otimizadas é a composição de paredes externas. Para os modelos ventilados naturalmente (MVN), os resultados demonstraram que as paredes de blocos cerâmicos simples e duplas são as mais indicadas. Por outro lado, as paredes mais indicadas para os modelos sem ventilação natural (MCT) são as isoladas, sejam estas leves ou pesadas.

Conforme análise do item 5.3.1.1, entende-se que o impacto entre blocos simples ou duplos não é estritamente relevante para os MVN. O mesmo ocorre com o MCT, no qual não há diferenças expressivas de CgT entre paredes leves isoladas ou pesadas isoladas, conforme descrito no item 5.3.2.1. No entanto, como a UH irá funcionar com e sem ventilação natural a depender do comportamento do ocupante, é necessário

entender o impacto da parede mais adequada para o contexto ventilado quando aplicada no contexto de carga térmica e vice-versa.

Para fins de simplificação, foram consideradas as combinações 11 e 27, que configuram as melhores condições para o clima atual no modelo ventilado e não ventilado, respectivamente. A Tabela 28 indica que, ao utilizar paredes leves e isoladas no MVN, há aumento no desconforto de 135% para o clima atual, mas este percentual reduz para 122% para 2050 e 110% para 2090. No caso dos MCT, o efeito é inversamente proporcional. Ou seja, ao utilizar paredes de cerâmica dupla em modelos sem ventilação, há aumento da carga térmica de 115% para o clima atual, mas no futuro o aumento aumentará para 127% em 2050 e 130% em 2090.

Tabela 28 – Comparações de nível de desconforto e carga térmica entre os modelos ventilados naturalmente ou não em relação às combinações de variáveis otimizadas

	Modelo ventilado: desconforto ASHRAE 55			Modelo não ventilado: carga térmica		
	P.CD (horas)	P.LI (horas)	% diferença	P.LI (horas)	P.CD (horas)	% diferença
<b>2010</b>	240	324	135%	3296	3805	115%
<b>2050</b>	1025	1253	122%	4519	5744	127%
<b>2090</b>	1651	1810	110%	5769	7512	130%

Fonte: Autoria própria, 2024.

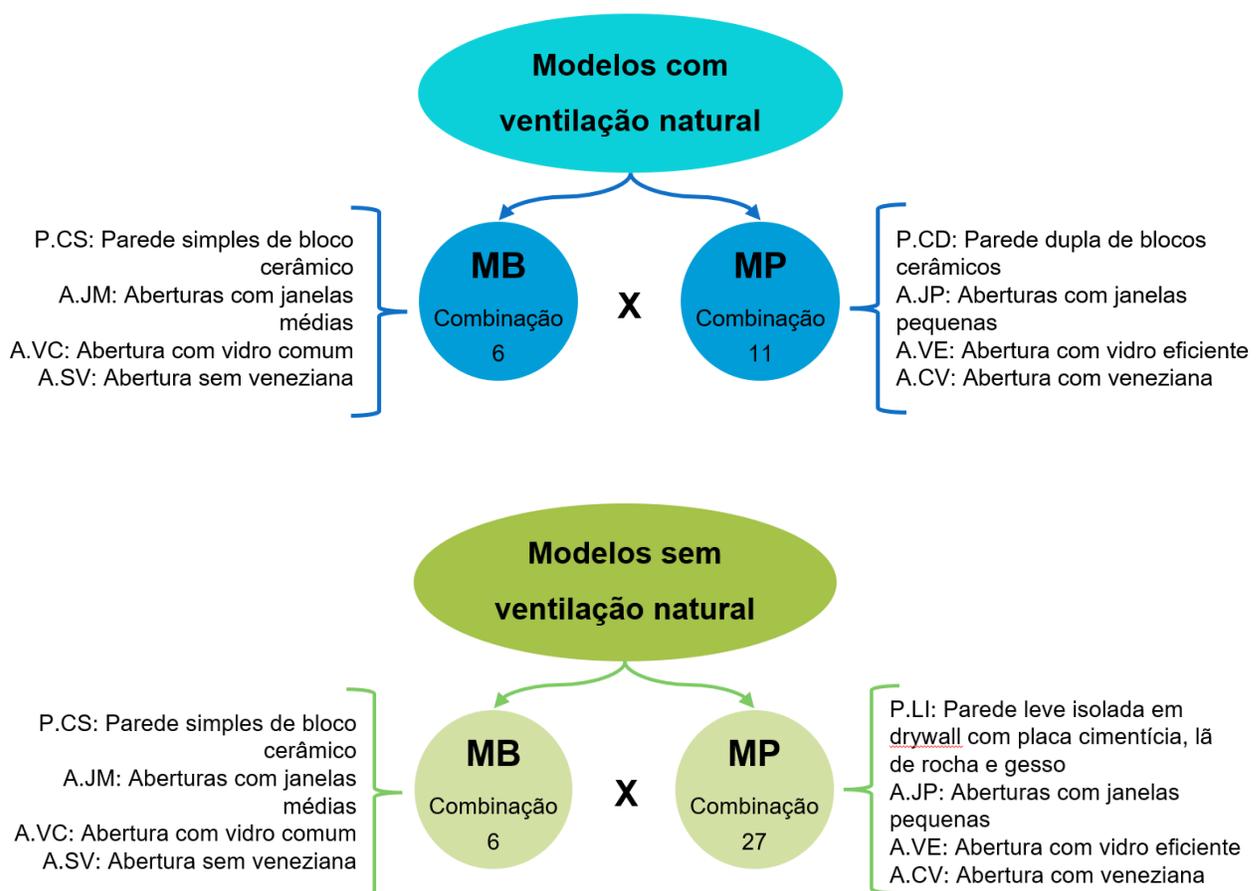
Estes resultados demonstram que a aplicação de paredes isoladas em modelos ventilados impacta mais percentualmente nos resultados de desconforto atualmente do que impactará futuramente. Contudo, o oposto é indicado nos modelos sem ventilação, em que a utilização de paredes de blocos cerâmicos impacta menos na previsão de carga térmica atual e mais no futuro.

É importante ressaltar que, segundo os resultados de PHFT discutidos no item 5.2.1, o percentual de horas de conforto no futuro será reduzido drasticamente. Assim, considera-se que a estratégia adaptativa mais prudente de adequação de edifícios aos cenários climáticos futuros será considerar estratégias que favorecem os modelos climatizados, devido à incapacidade de reestabelecer o conforto apenas por estratégias passivas.

## 5.4 Resultados de simulações dos Modelos Propostos

As combinações de variáveis mais adequadas para o clima atual dos modelos ventilados ou não naturalmente foram aplicadas nos modelos completos permitindo a comparação adequada destes Modelos Propostos (MP) com os Modelos Base (MB). Com estes novos resultados de simulações, foi possível extrair os dados segundo a metodologia proposta pela NBR 15575 e compará-los aos dados já analisados no item 5.2 - Resultados de simulações computacionais dos Modelos Base.

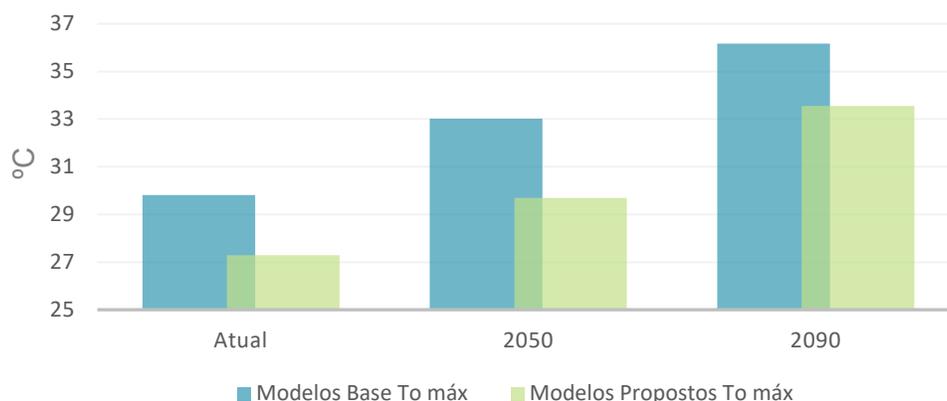
Como forma de demonstrar os benefícios de estratégias bioclimáticas de acordo com as prospecções climáticas no caso em questão, foram considerados os seguintes cenários:



### 5.4.1 Condição naturalmente ventilada

Os dados extraídos do software de simulação foram importados na planilha de indicadores da NBR 15575 (LabEEE, 2020) para a obtenção dos valores de  $T_o$  máxima e PHFT de cada APP e da UH avaliada. O Gráfico 27 compara os dados de  $T_o$  máxima anual do MB com o MP e ilustra a redução na temperatura interna ao adotar estratégias de melhoria de todos os cenários climáticos. É possível perceber que o Modelo Proposto é capaz de reduzir as temperaturas operativas máximas de forma que, em 2050, estas sejam praticamente equivalentes ao Modelo base do clima atual.

Gráfico 27 – Comparação de resultados de  $T_o$  máxima na UH entre MB e MP em relação aos cenários climáticos distintos



Fonte: Autoria própria, 2024.

Tabela 29 - Comparação de resultados de  $T_o$  máxima na UH entre MB e MP em relação aos cenários climáticos distintos

	MB To máx (°C)	MP To máx (°C)	°C diferença entre base e proposto (°C)	% melhoria entre base e proposto
<b>Atual</b>	29,82	27,29	-2,53	92%
<b>2050</b>	33,02	29,69	-3,33	90%
<b>2090</b>	36,17	33,56	-2,61	93%

Fonte: Autoria própria, 2024.

A Tabela 29 evidencia que a combinação de estratégias projetuais passivas provoca redução de até 2,53 °C no clima atual, com um percentual de redução de 8%.

Em 2050, o Modelo Proposto revela a redução de 3,33 °C em relação à To máxima anual da UH do Modelo Base, uma redução de 10%. Já em 2090, há queda de 2,61 °C entre os modelos, com percentual de 7% de melhoria no MP.

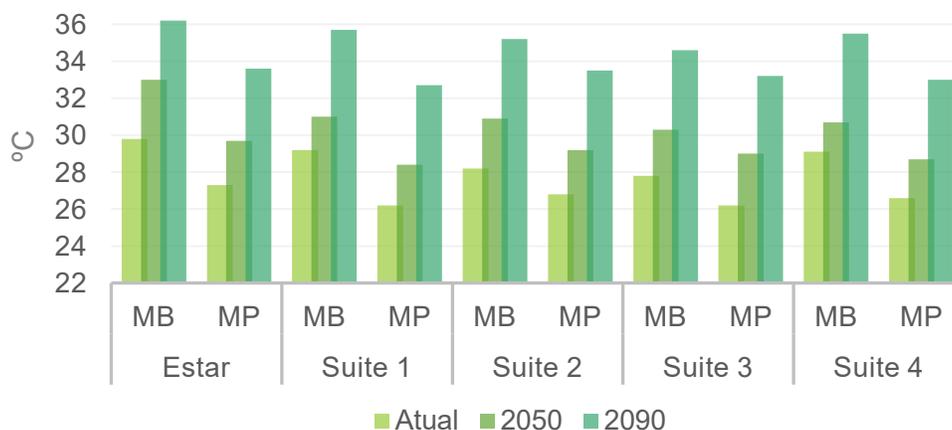
Ao analisar as To máximas por ambientes, é possível perceber que o Modelo Proposto provoca melhorias mais expressivas em APPs voltados para a fachada Norte, o estar, suíte 1 e suíte 4 (Tabela 30 e Gráfico 28). Esta fachada é caracterizada por ser sombreada no verão, mas recebe radiação intensa no inverno, além de apresentar janelas maiores no MB do que a fachada Sul. Nos APPs com a orientação Norte, a diferença de temperatura entre os MP e os MB varia entre 2 °C e 3,3 °C entre os anos considerados. Já nos ambientes voltados para a fachada Sul, a diferença de temperatura entre os modelos varia de 1 °C a 1,7 °C.

Tabela 30 - Comparação de resultados de To máxima de cada APP entre MB e MP em relação aos cenários climáticos distintos

		<b>Atual</b>	<b>2050</b>	<b>2090</b>
<b>Estar</b>	MB – To máx. (°C)	29,8	33	36,2
	MP – To máx. (°C)	27,3	29,7	33,6
	°C diferença MB MP	<b>-2,5</b>	<b>-3,3</b>	<b>-2,6</b>
<b>Suíte 1</b>	MB – To máx. (°C)	29,2	31	35,7
	MP – To máx. (°C)	26,2	28,4	32,7
	°C diferença MB MP	<b>-3,0</b>	<b>-2,6</b>	<b>-3,0</b>
<b>Suíte 2</b>	MB – To máx. (°C)	28,2	30,9	35,2
	MP – To máx. (°C)	26,8	29,2	33,5
	°C diferença MB MP	-1,4	-1,7	-1,7
<b>Suíte 3</b>	MB – To máx. (°C)	27,8	30,3	34,6
	MP – To máx. (°C)	26,8	29,2	33,5
	°C diferença MB MP	-1,0	-1,1	-1,1
<b>Suíte 4</b>	MB – To máx. (°C)	29,1	30,7	35,5
	MP – To máx. (°C)	26,6	28,7	33
	°C diferença MB MP	<b>-2,5</b>	<b>-2,0</b>	<b>-2,5</b>

Fonte: Autoria própria, 2024.

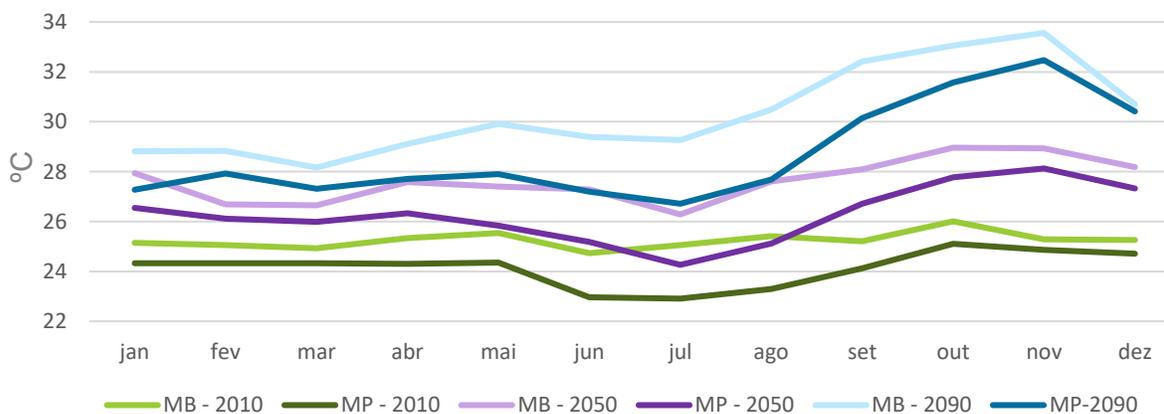
Gráfico 28 - Comparação de resultados de To máxima de cada APP entre MB e MP em relação aos cenários climáticos distintos



Fonte: Autoria própria, 2024.

As temperaturas operativas também foram analisadas pela média mensal para compreender em quais meses há maior influência das estratégias bioclimáticas no MP. O Gráfico 29 ilustra que o MP de 2050 chega a ter uma To média no inverno menor que o MB do clima atual. Já nos meses mais quentes do ano, as estratégias propostas reduzem a To média em relação ao mesmo ano, mas em proporções bem menores, e esta redução não é capaz de alcançar as To do clima atual, como ocorre no inverno. Os modelos do clima de 2090 acompanham a mesma tendência, com melhorias do MP em relação ao MB maiores nos meses de inverno.

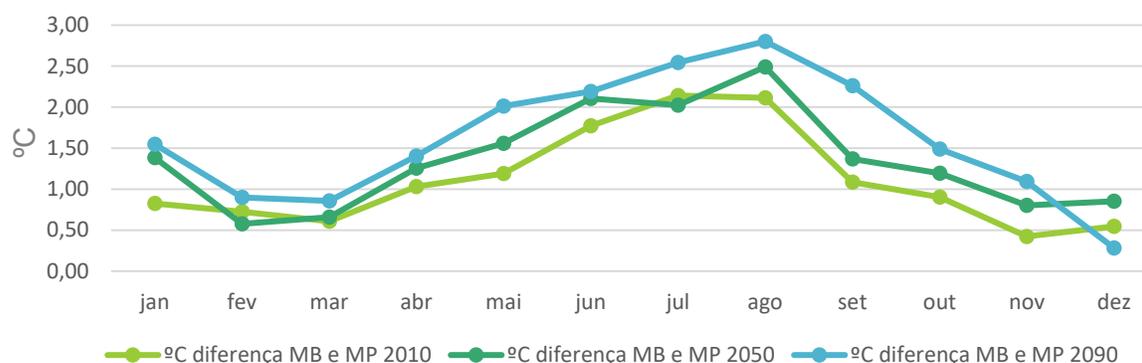
Gráfico 29 – Resultados de To médias mensais



Fonte: Autoria própria, 2024.

A Tabela 31 e o Gráfico 30 demonstram que as temperaturas operativas médias mensais da UH avaliada chegam a uma redução de 10% nos meses de julho e agosto, até 2,14° C a menos em 2010, 2,11 °C em 2050 e 2,80 °C em 2090. O menor impacto na To média da UH entre os MP e MB é evidenciado nos meses de novembro, fevereiro e dezembro nos climas avaliados. Assim como já apontado em outros indicativos já analisados, este dado também sugere que as variáveis bioclimáticas são mais efetivas em climas mais amenos como o inverno em Brasília.

Gráfico 30 – Diferenças em °C da To média da UH em cada mês dos anos avaliados entre MB e MP



Fonte: Autoria própria, 2024.

Tabela 31 – Resultados de To média da UH em cada mês dos anos avaliados, percentuais de melhorias dos MP e diferença em °C entre MB e MP

		MB – To média (°C)	MP – To média (°C)	% melhoria	°C diferença
<b>2010</b>	jan	25,15	24,32	103%	-0,83
	fev	25,05	24,32	103%	-0,72
	mar	24,93	24,32	103%	-0,61
	abr	25,33	24,30	104%	-1,03
	mai	25,54	24,35	105%	-1,19
	jun	24,73	22,96	108%	-1,77
	jul	25,05	22,91	109%	-2,14
	ago	25,41	23,29	109%	-2,11
	set	25,21	24,13	104%	-1,08
	out	26,01	25,10	104%	-0,90
	nov	25,28	24,86	102%	-0,42

2050	dez	25,26	24,71	102%	-0,55
	jan	27,93	26,55	105%	-1,39
	fev	26,69	26,11	102%	-0,58
	mar	26,65	25,99	103%	-0,66
	abr	27,58	26,33	105%	-1,25
	mai	27,40	25,84	106%	-1,56
	jun	27,29	25,19	108%	-2,11
	jul	26,28	24,26	108%	-2,02
	ago	27,61	25,12	110%	-2,49
	set	28,09	26,72	105%	-1,37
	out	28,96	27,77	104%	-1,19
	nov	28,93	28,13	103%	-0,80
dez	28,17	27,32	103%	-0,85	
2090	jan	28,82	27,27	106%	-1,55
	fev	28,83	27,93	103%	-0,90
	mar	28,16	27,31	103%	-0,85
	abr	29,11	27,71	105%	-1,40
	mai	29,91	27,90	107%	-2,01
	jun	29,39	27,19	108%	-2,19
	jul	29,26	26,71	110%	-2,55
	ago	30,49	27,69	110%	-2,80
	set	32,41	30,15	107%	-2,26
	out	33,06	31,57	105%	-1,49
	nov	33,56	32,47	103%	-1,09
	dez	30,70	30,41	101%	-0,28

Fonte: Autoria própria, 2024.

Conforme exigido pela NBR 15575, o PHFT da UH foi contabilizado para as horas de ocupação de cada APP dentro da Faixa de Temperatura Operativa do Intervalo 1, indicado para Brasília. Os resultados da Tabela 32 indicam que a diferença no conforto flutua entre 116% no clima atual, 122% em 2050 e 107% em 2090.

Conforme já apontado, o PHFT é um indicador binário e a hora é contabilizada apenas como confortável ou não de acordo com o enquadramento da To na faixa estabelecida. Portanto, o percentual de PFHT pode mudar de forma expressiva entre o MB e o MP caso as temperaturas estejam no limite do desconforto no MB. Isto porque

uma pequena alteração na  $T_o$  causada pelo MP já pode enquadrar a hora como confortável. Por isso, o indicador PHFT não apresenta uma lógica linear nos percentuais de diferença entre o MB e o MP entre os arquivos climáticos analisados.

Tabela 32 - Resultados de PHFT da UH em MB e MP nos anos avaliados

	MB - PHFT	MP - PHFT	% melhoria MP
<b>Atual</b>	84,15%	97,79%	116%
<b>2050</b>	40,99%	49,94%	122%
<b>2090</b>	10,68%	11,48%	107%

Fonte: Autoria própria, 2024.

É possível perceber melhora entre o PHFT dos MP em relação aos MB em todos os anos. Porém, ainda assim, há grande queda no PHFT entre os anos avaliados. No Modelo Proposto, o indicador cai de 97,79% no clima atual para 49,94% em 2050 e reduz mais ainda para 11,48% em 2090 (Gráfico 31). Estes valores indicam que, mesmo utilizando a melhor combinação de estratégias bioclimáticas testada, a UH em questão não alcançará níveis aceitáveis de conforto térmico no modelo de ventilação natural nas prospecções climáticas futuras avaliadas.

Gráfico 31 – Resultados de PHFT da UH em MB e MP nos anos avaliados



Fonte: Autoria própria, 2024.

O Gráfico 31 ilustra a pequena diferença entre os PHFT do MP em relação ao MB em 2090. Quando analisada a temperatura operativa, o modelo otimizado está menos

quente que o base, inclusive com mais intensidade no futuro (Tabela 29). Porém, como as temperaturas ainda assim são muito elevadas no futuro, mesmo com redução da  $T_o$  no MP, não é alcançado o conforto em ambientes naturalmente ventilados em climas futuros, fazendo com que estratégias arquitetônicas não sejam suficientes para restaurar o conforto nos ambientes internos. Este dado novamente indica que haverá dependência de estratégias ativas como o ar-condicionado para alcançar o conforto térmico de ambientes internos futuramente.

Vale destacar que os percentuais de melhoria no indicativo de conforto entre o MP e o MB são substancialmente menores do que os aferidos nos modelos de simulações paramétricas. Embora ambas as simulações estejam avaliando o conforto, as simulações paramétricas descritas no item 5.3.1 analisam o conforto através da ASHRAE 55 80%. Já os modelos propostos seguiram a metodologia da NBR 15575 que estabelece o conforto através do PHFT. Os indicadores em questão possuem diferenças de análise que geram resultados que não devem ser comparados entre si, pois não são equivalentes.

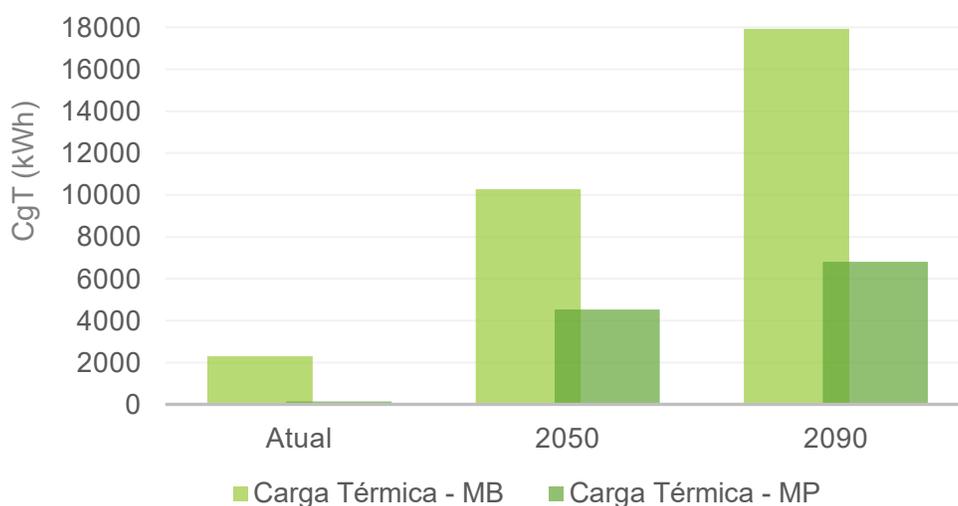
Enquanto o PHFT analisa uma única faixa de temperatura para cada Intervalo (Tabela 6), a ASHRAE 55 se baseia em parâmetros específicos como temperatura operativa, umidade relativa e velocidade do ar, em que pelo menos 80% dos ocupantes estejam confortáveis (Figura 45). Por uma questão de adequação ao contexto normativo nacional, a NBR 15575 foi escolhida como método de análise da pesquisa. Porém, não foi possível utilizar o indicativo de conforto da norma (PHFT) nas simulações simultâneas porque não havia esta possibilidade dentre as opções de objetivos da ferramenta de otimização do *software* DesignBuilder.

#### 5.4.2 Condição de climatização artificial

Os resultados de previsão de carga térmica indicam enorme relevância das estratégias bioclimáticas em todos os cenários climáticos verificados, principalmente no atual. O Gráfico 32 demonstra que, ao simular o modelo proposto com a combinação de

variáveis mais adequada (27), a carga térmica do clima atual cai radicalmente e praticamente se torna desnecessária. Este resultado está alinhado ao modelo ventilado naturalmente, que demonstrou que o PHFT do modelo proposto alcança 97,79%. Ou seja, para as condições climáticas atuais, se utilizadas as variáveis projetuais adequadas, os ambientes internos estariam alcançando o conforto de forma passiva em quase todas as horas do ano ocupadas em APPs (Tabela 33).

Gráfico 32 – Resultados de carga térmica prevista comparando Modelos Propostos com Modelos Base para os anos avaliados



Fonte: Autoria própria, 2024.

Tabela 33 – Resultados de carga térmica prevista de Modelos Base e Modelos Propostos para os anos avaliados

	Carga Térmica – MB (kWh)	Carga Térmica – MP (kWh)	% de CgT do MP em relação ao MB
<b>Atual</b>	2298,97	146,56	6%
<b>2050</b>	10275,72	4532,83	44%
<b>2090</b>	17926,94	6816	38%

Fonte: Autoria própria, 2024.

Além disso, ao analisar os valores de temperaturas do MBVN para o clima ameno atual, é possível perceber que grande parte das To nos horários ocupados estão próximas ao limite estabelecido pela Norma para considerar a carga térmica (26 °C). Ao considerar as variáveis otimizadas no Modelo Proposto, a temperatura operativa por hora muitas

vezes cai abaixo de 26 °C, e então toda a carga térmica prevista pelo *setpoint* de 23 °C nas horas ocupadas é desconsiderada.

Nos anos de 2050 e 2090, a redução da carga térmica prevista a partir das estratégias também é bastante expressiva, representando apenas 44% e 38% da carga térmica prevista para os mesmos anos no modelo base. Isso indica que a envoltória mais isolada impacta na eficiência do sistema de ar-condicionado, uma vez que evita a dissipação de energia térmica e a transmitância do calor do meio externo nos ambientes internos.

Considerando os resultados encontrados para o objeto de estudo analisado nesta pesquisa, é possível compreender que os benefícios propostos por estratégias bioclimáticas geram impactos expressivos nas cargas térmicas previstas para todos os anos avaliados, inclusive nos climas futuros. Como apresentado nos indicadores dos modelos ventilados naturalmente, apesar de influenciar de forma relevante nas To internas, as estratégias bioclimáticas não serão suficientes para garantir o conforto térmico dos ambientes internos para as prospecções climáticas futuras consideradas.

Desta forma, caso a prospecção climática pessimista avaliada se torne realidade, seria considerado mais adequado à UH avaliada adotar a combinação de estratégias apropriada para os modelos propostos sem ventilação natural. Esta combinação (27) inclui as mesmas variáveis que causam impacto positivo nos modelos ventilados naturalmente, exceto as paredes externas. Tendo em conta a provável dependência por equipamentos de ar-condicionado no futuro, seria considerado mais adequado utilizar paredes isoladas do que paredes com transmitância média e atraso térmico, buscando a minimização de cargas térmicas previstas e consequente consumo energético.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os padrões de consumo de energia e emissões de CO<sub>2</sub> atuais resultam em mudanças climáticas que já são evidenciadas em diversos desastres naturais ocorrendo pelo mundo. O aquecimento global já é uma realidade, a temperatura atual da superfície é em média 1,1 °C acima do que costumava ser entre 1850-1900, e as previsões de climatologistas indicam que o aumento de temperatura poderá resultar em consequências catastróficas de fenômenos extremos se ultrapassados mais de 1,5 °C.

Segundo a norma de desempenho NBR 15575, os edifícios devem ser projetados para a vida útil de pelo menos 50 anos. Sendo assim, é essencial que estes projetos estejam adaptados para o cenário de emergência climática já em curso. As pessoas passam em média 90% do tempo dentro de edifícios, os quais são responsáveis pelo consumo de mais da metade da energia no Brasil. O aquecimento global tende a aumentar o consumo de energia elétrica, uma vez que as pessoas necessitarão cada vez mais de estratégias ativas como o ar-condicionado para reestabelecer o conforto térmico nos ambientes internos.

No entanto, o projeto arquitetônico pode influenciar no ganho térmico de edifícios e reduzir a dependência por condicionamento de ar de acordo com a orientação solar, volumetria, materiais empregados na construção, sombreamentos e quantidade de envidraçamento. As simulações termoenergéticas são ferramentas extremamente úteis no processo projetual pois permitem a estimativa de conforto térmico e de consumo energético para testar estratégias de melhorias antes mesmo da construção.

Sendo assim, esta pesquisa avaliou o impacto das mudanças climáticas em edifícios residenciais comparando o desempenho térmico dos ambientes internos do clima atual, clima futuro a curto prazo (2050) e clima futuro a longo prazo (2090). Este estudo incluiu a quantificação da redução do conforto térmico e do aumento na carga térmica devido à emergência climática. Além disso, testou diferentes estratégias bioclimáticas visando para redução de danos devido ao aumento de temperaturas.

Para tal, foi desenvolvida a modelagem para simulação termoenergética de uma unidade habitacional representativa localizada no Distrito Federal utilizando arquivos climáticos futuros considerando o pior cenário preditivo para Brasília (Modelo Climático Global GCMs: HadGEM2; Modelo Climático Regional RCMs: regcm e caminho de concentração representativa RCP: 8.5). Foi utilizada a metodologia de modelagem, configurações e indicadores de avaliação da NBR 15575 por ser uma metodologia desenvolvida nacionalmente especificamente para edifícios residenciais. Esta norma é adequada à realidade construtiva brasileira e amplamente validada, além de ter sofrido atualizações recentemente para se tornar mais assertiva.

As simulações foram divididas em três etapas, sendo a primeira voltada para a análise do impacto das mudanças climáticas na UH modelada conforme características de projeto (Modelos Base). A segunda etapa envolveu a simulação paramétrica de diversas variáveis projetuais em um modelo simplificado visando selecionar a melhor combinação de variáveis para os modelos com e sem ventilação natural. A terceira etapa de simulação aplicou a combinação de variáveis otimizadas nos modelos completos (Modelos Propostos) para comparar com os indicadores extraídos dos Modelos Base.

Os resultados das simulações dos Modelos Base com Ventilação Natural (MBVN) indicaram um aumento de 3,2 °C nas temperaturas operativas ( $T_o$ ) máximas para 2050 e 6,35 °C para 2090 comparados ao clima atual. O PHFT apresentou queda expressiva entre os anos avaliados, caindo de 84,15% no clima atual para 40,99% em 2050 e apenas 10,68% em 2090. Estes resultados indicam que, no objeto de estudo em questão, há predominância das horas de conforto apenas pela ventilação natural atualmente. No entanto, ao considerar os arquivos climáticos futuros, há uma redução drástica deste indicador que aponta para a necessidade de estratégias ativas para reestabelecer o conforto térmico.

A previsão de carga térmica (CgT) dos Modelos Base sem Ventilação Natural (MBCT) apresentou subida preocupante. Este indicador foi 4,5 vezes maior em 2050 e quase 8 vezes maior em 2090 em comparação com a CgT prevista para o cenário climático atual. Este dado está alinhado com a queda do PHFT dos MBVN, uma vez que

o conforto não é alcançado pela ventilação, o sistema de climatização fica sobrecarregado.

As simulações paramétricas geraram 32 combinações de variáveis distintas para cada condição de ventilação e de arquivos climáticos, somando ao todo 192 possibilidades de resultados. As estratégias mais adequadas para otimizar o desempenho térmico foram: vidro eficiente, janelas menores, uso de venezianas e paredes externas em blocos cerâmicos para a condição de ventilação natural (MVN), ou paredes externas isoladas para a condição sem ventilação natural (MCT).

Dentre as variáveis, o vidro eficiente se mostrou como o elemento mais sensível para a otimização de resultados em ambas as condições de ventilação. O tipo de paredes foi o segundo dado mais relevante para MVN, e o terceiro para MCT. Já os tamanhos das aberturas são mais relevantes para os MCT do que para os MVN porque ao mesmo tempo que reduzem o ganho térmico, a redução nas dimensões de janelas pode afetar a ventilação efetiva. Por fim, o uso de venezianas foi a variável de menos impacto nos resultados de ambas as condições de ventilação devido ao padrão de setagem proposto pela Norma e também por prejudicar a ventilação natural quando fechada.

A terceira etapa de simulações permitiu a comparação entre os Modelos Bases (MB) com os Modelos Propostos (MP) utilizando as mesmas condições de modelagem completa e os mesmos indicadores de desempenho térmico exigidos pela NBR 15575. Os resultados demonstraram que as variáveis projetuais mais adequadas para os MP com ventilação natural resultaram em melhorias no PHFT de todos os anos avaliados, quando comparados aos MB. No entanto, mesmo melhorando os resultados, as estratégias projetuais não foram suficientes para permitir o conforto passivo na maioria das horas do ano no futuro.

No clima atual, o PHFT subiria de 84,15% para 97,79% com a utilização de estratégias bioclimáticas, indicando que a grande maioria das horas ocupadas de APP apresentariam temperaturas aceitáveis ao conforto. Todavia, em 2050 o PHFT que seria de 40,99% no MB sobe para apenas 49,94%, demonstrando desconforto térmico em praticamente metade das horas ocupadas nos APPs. Em 2090, a situação se agrava

ainda mais, sendo o PHFT de apenas 10,68% no MB e 11,48% no MP, demonstrando dependência de estratégias ativas para alcance do conforto térmico.

Em relação aos modelos sem ventilação natural, os resultados demonstraram redução drástica da previsão de carga térmica de MP em comparação aos MB. No clima atual, a adoção de estratégias projetuais faz com que a carga térmica prevista seja mínima, representando apenas 6% do valor previsto nos MB. Em 2050 e em 2090, a redução não é tão drástica quanto no clima atual porque as temperaturas serão mais elevadas, mas ainda assim a CgT de MP representa apenas 44% da calculada para o MB em 2050, e 38% em 2090.

Os resultados da pesquisa demonstram mudanças expressivas no padrão comportamental de temperaturas internas, conforto térmico e consumo previsto para ar-condicionado do apartamento simulado, demonstrando a urgência na necessidade de mitigação das mudanças climáticas e adaptação em projetos de edifícios para que possam reduzir os impactos do aumento de temperaturas nos ambientes construídos.

A pesquisa mostra que as estratégias bioclimáticas têm um impacto significativo nas cargas térmicas previstas, especialmente em climas futuros. Nos modelos ventilados naturalmente, essas estratégias influenciam as temperaturas internas ( $T_o$ ), mas não garantem conforto térmico em cenários climáticos futuros.

Levando em conta a provável dependência futura de ar-condicionado se as previsões climáticas pessimistas se confirmarem, seria considerado mais indicado para a UH estudada adotar as variáveis climáticas mais adequadas para o modelo sem ventilação. Esta combinação de estratégias inclui as mesmas variáveis que beneficiam os modelos ventilados naturalmente, com exceção das paredes externas que seriam preferencialmente em blocos cerâmicos para modelos ventilados. Considerando a predominância de horas do ano no futuro com o uso de ar-condicionado para o caso em questão, entende-se que seria mais vantajoso utilizar paredes isoladas como forma de adaptação às mudanças climáticas.

## 6.1 Limitações de pesquisa

Apesar de ser uma metodologia recentemente atualizada, validada e amplamente utilizada no Brasil, a NBR 15575 possui limitações que podem impactar nos resultados alcançados. Por exemplo, apesar de serem extremamente relevante nos resultados, os cronogramas de ocupação são estimados de forma generalista e não consideram as mudanças de rotina de ocupantes. Pela NBR 15575, os dormitórios são avaliados apenas no período noturno e a sala de estar seria o único ambiente com ocupação vespertina, e ainda assim de apenas 50%. Isto pode ser considerado uma limitação, especialmente pela tendência de aumento de pessoas trabalhando de suas residências, a qual se intensificou após a pandemia do coronavírus.

Além disso, é importante ressaltar que os indicadores de conforto térmico e carga térmica são fatores binários que apenas são considerados em determinadas situações pré-estabelecidas. Quando a temperatura operativa de um APP é acima da faixa de conforto estabelecida pela NBR 15575 ou pela ASHRAE 55, esta hora é contabilizada como desconfortável independentemente do nível de desconforto. Ou seja, independente se a  $T_o$  for de 35 °C ou de 40 °C, o indicador de desconforto será contabilizado da mesma forma neste horário específico.

Uma limitação semelhante ocorre no indicador de carga térmica, que é contabilizado apenas quando o ambiente é ocupado. Ademais, conforme a NBR 15575, este indicador deve ser considerado apenas quando a  $T_o$  do ambiente ventilado for acima de 26 °C. Assim, mesmo o *setpoint* do sistema de refrigeração sendo de 21 °C, a carga térmica é desconsiderada integralmente no cálculo se não se enquadrar nas condições descritas acima.

Como recorte de pesquisa, buscou-se avaliar a unidade habitacional mais representativa no bairro analisado. Porém, vale salientar que esta análise não se estende às demais condições de orientações, layouts e volumetrias presentes no Setor Noroeste. Para compreender o impacto das mudanças climáticas e variáveis projetuais no contexto geral do bairro, seria relevante ampliar estes estudos para outras tipologias de unidades habitacionais distribuídas em diferentes condições.

As variáveis selecionadas para simulações de otimização também foram restritas às condições da UH selecionada. As dimensões de aberturas, tipos de vidros e sombreamentos foram considerados de forma binária como recorte de pesquisa. Mas outras condições podem ser avaliadas em estudos futuros como outros tipos de sombreamentos que não sejam venezianas, por exemplo.

Ademais, foi considerado apenas o pior cenário climático para o desenvolvimento das simulações. Cenários mais otimistas foram desconsiderados na pesquisa por avaliações de históricos de emissões de GEE e políticas públicas atuais. No entanto, é indicado expandir a pesquisa em diferentes condições climáticas para uma análise mais aprofundada com avaliações probabilísticas. Destaca-se também que a pesquisa se limitou ao clima de Brasília e que as mudanças climáticas não ocorrem de forma homogênea no globo terrestre.

Por fim, ressalta-se que a presente pesquisa teve o enfoque apenas no desempenho térmico. Fatores como o desempenho lumínico, desempenho acústico, fontes de energia e combustíveis de aquecimento de água não foram avaliados. Recentemente foi desenvolvido um mestrado na Universidade de Brasília com enfoque em análise de ciclo de vida e energia incorporada de materiais (Faria, 2023), mas este não foi alvo da presente pesquisa.

## 6.2 Recomendações para trabalhos futuros

A seguir, são apresentadas algumas recomendações para pesquisas futuras, considerando as lacunas e limitações identificadas durante o desenvolvimento deste estudo:

- Avaliação do impacto de outras variáveis bioclimáticas associadas às demandas dos usuários;

- Desenvolver simulações com diferentes cenários climáticos futuros, não apenas o mais pessimista;
- Simular diferentes tipologias de layouts, volumetrias de edifícios e orientações;
- Testar outras tipologias de sombreamento que não influenciem na ventilação natural como as venezianas;
- Simular todas as unidades habitacionais de um edifício para verificar diferenças de resultados;
- Vincular estudos de variáveis projetuais ao custo de implementação para indicar o custo-benefício de cada uma;
- Avaliar simultaneamente o desempenho lumínico para balancear a melhor condição para ambos os desempenhos;
- Avaliar o impacto das ilhas de calor no aumento de temperaturas além do aquecimento global;
- Discutir outros impactos ambientais para além do desempenho térmico do edifício, como carbono incorporado de materiais, impermeabilização do solo e impacto do vidro reflexivo no aumento da temperatura externa do meio urbano.

## 7 REFERÊNCIAS

ABNT. **NBR 15220: 2005 - Desempenho térmico de edificações Partes 1, 2, 3, 4 e 5.** [S. l.: s. n.], 2005.

ABNT. **NBR 15575-1: Edifícios habitacionais - Desempenho: Parte 1: Requisitos gerais.** Rio de Janeiro: [s. n.], 2013.

ABNT. **NBR 15575-1: Edifícios habitacionais -Desempenho: Parte 1: Requisitos gerais - Emenda 1.** Rio de Janeiro: [s. n.], 2021a.

ABNT. **NBR 15575-4: Edifícios habitacionais - Desempenho: parte 4: Sistemas de vedações verticais externas e internas - Emenda 1.** Rio de Janeiro: [s. n.], 2021b.

ABNT. **NBR 15575-5: Edifícios habitacionais - Desempenho: parte 5: Requisitos para sistemas de coberturas - Emenda 1.** Rio de Janeiro: [s. n.], 2021c.

ABREU, M.C. *et al.* Long-term trend analysis in annual, seasonal and monthly rainfall in East Northeast of Brazil and the influence of modes of climate variability. **International Journal of Climatology**, [s. l.], v. 43, n. 16, p. 7463–7480, 2023.

AGUILLO, Isidro F. Is Google Scholar useful for bibliometrics? A webometric analysis. **Scientometrics**, [s. l.], v. 91, n. 2, p. 343–351, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11192-011-0582-8>.

ALVES, Carolina Abrahão. **Resiliência das edificações às mudanças climáticas na região Metropolitana de São Paulo. Estudo de caso: desempenho térmico de edifícios residenciais para idosos.** 2014. 1–169 f. Dissertação mestrado - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

ALWETAISHI, Mamdooh *et al.* An investigation of shading devices in a hot region: A case study in a school building. **Ain Shams Engineering Journal**, [s. l.], v. 12, n. 3, p. 3229–3239, 2021.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, Refrigerating and Air-conditioning Engineers - ASHRAE. **Handbook of Fundamentals. American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers.** Nova Iorque: [s. n.], 1993.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, Refrigerating and Air-conditioning En. **Standard 90.1-1989: Energy Efficient Design of New Buildings Except Low-Rise Residential Buildings.** Atlanta: [s. n.], 1989.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, Refrigerating and Air-conditioning Engineers - ASHRAE. **Standard 90-1975: Energy Conservation in New Building Design.** Atlanta: [s. n.], 1975.

AMORIM, Cláudia *et al.* Retrofit e preservação de edifícios não residenciais modernos em Brasília – uma abordagem para eficiência energética e iluminação natural. **Editora Científica Digital**, [s. l.], n. 23, p. 339–357, 2021.

ANDRIĆ, Ivan; KOC, Muammer; AL-GHAMDI, Sami G. **A review of climate change implications for built environment: Impacts, mitigation measures and associated challenges in developed and developing countries.** [S. l.]: Elsevier Ltd, 2019.

ASHRAE. **ANSI/ASHRAE 55-2004: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy.** Atlanta: [s. n.], 2004.

AUSTRALIAN BUILDING CODES BOARD - ABCB. **National Construction Code.** Canberra: [s. n.], 2022.

BAZAZZADEH, Hassan *et al.* The Impact Assessment of Climate Change on Building Energy Consumption in Poland. **Energies**, [s. l.], v. 14, n. 14, p. 4084, 2021.

BELCHER, SE; HACKER, JN; POWELL, DS. Constructing design weather data for future climates. **Building Services Engineering Research and Technology**, [s. l.], v. 26, n. 1, p. 49–61, 2005.

BERARDI, Umberto. A cross-country comparison of the building energy consumptions and their trends. **Resources, Conservation and Recycling**, [s. l.], v. 123, p. 230–241, 2017.

BHERWANI, Hemant; SINGH, Anju; KUMAR, Rakesh. Assessment methods of urban microclimate and its parameters: A critical review to take the research from lab to land. **Urban Climate**, [s. l.], v. 34, p. 100690, 2020. Disponível em: Acesso em: 3 fev. 2024.

BOURISLI, Raed I.; ALTARAKMA, Mohammed A.; ALANZI, Adnan A. General Correlation of Building Energy Use Via Hybrid Genetic Programming/Genetic Algorithm. **Journal of Solar Energy Engineering**, [s. l.], v. 140, n. 4, 2018.

BRACHT, M. K. *et al.* Brazil – Future weather files for building energy simulation. [s. l.], 2023.

BRACHT, Matheus K. *et al.* Multiple regional climate model projections to assess building thermal performance in Brazil: Understanding the uncertainty. **Journal of Building Engineering**, [s. l.], v. 88, p. 109248, 2024.

BRAGER, Gail; DE DEAR, Richard. A standard for natural ventilation. **Ashrae Journal**, [s. l.], v. 42, p. 21-23+25, 2000.

BRASIL. **Anexo Geral V - Catálogo de Propriedades Térmicas de Paredes, Coberturas e Vidros**. [S. l.]: Ministério de Minas e Energia, Eletrobras, PROCEL, INMETRO, 2013a.

BRASIL. **Anexo geral V - Catálogo de propriedades térmicas de paredes, coberturas e vidros**. [S. l.: s. n.], 2013b.

BRASIL. **Decreto n. 4.059, de 19 de dezembro de 2001. Regulamenta a Lei no 10.295, de 17 de outubro de 2001, que dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia, e dá outras providências**. Brasília: [s. n.], 2001a.

BRASIL. **INI Comercial - Instrução Normativa do Inmetro para edificações comerciais, de serviço e públicas**. [S. l.: s. n.], 2022a. Disponível em: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgiclfndmkaj/https://pbeedifica.com.br/sites/default/files/INI-C\_Portaria\_309\_de\_2022\_COM%20CAPA.pdf. Acesso em: 7 fev. 2024.

BRASIL. **INI Residencial - Instrução normativa do Inmetro para edificações residenciais.** [S. l.: s. n.], 2022b. Disponível em: [chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://pbeedifica.com.br/sites/default/files/ANEXO%20II\\_INI-R\\_Portaria%20309\\_2022\\_COM%20CAPA.pdf](chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://pbeedifica.com.br/sites/default/files/ANEXO%20II_INI-R_Portaria%20309_2022_COM%20CAPA.pdf). Acesso em: 7 fev. 2024.

BRASIL. **Instrução Normativa no 02, de 21 de janeiro de 2014. Dispõe sobre regras para a aquisição ou locação de máquinas e aparelhos consumidores pela Administração Pública Federal direta, autárquica e fundacional, e uso da Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE) nos projetos e respectivas edificações públicas federais novas ou que recebam retrofit.** Brasília: [s. n.], 2014.

BRASIL. **Lei n. 10.295, de 17 de outubro de 2001. Dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia.** Brasília: [s. n.], 2001b.

BRASIL. **Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais.** [S. l.: s. n.], 2012. Disponível em: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://pbeedifica.com.br/sites/default/files/projetos/etiquetagem/residencial/downloads/RTQR.pdf>. Acesso em: 7 fev. 2024.

BRASIL. **Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos.** [S. l.: s. n.], 2010. Disponível em: [chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://pbeedifica.com.br/sites/default/files/projetos/etiquetagem/comercial/downloads/Port372-2010\\_RTQ\\_Def\\_Edificacoes-C\\_rev01.pdf](chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://pbeedifica.com.br/sites/default/files/projetos/etiquetagem/comercial/downloads/Port372-2010_RTQ_Def_Edificacoes-C_rev01.pdf). Acesso em: 7 fev. 2024.

BRASIL. MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA. ELETROBRÁS. PROCEL EDIFICA. **Manual de Conservação de Energia Elétrica – Edifícios Públicos e Comerciais.** [S. l.: s. n.], 1994.

BRE, Facundo; ROMAN, Nadia; FACHINOTTI, Víctor D. An efficient metamodel-based method to carry out multi-objective building performance optimizations. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 206, p. 109576, 2020. Disponível em: Acesso em: 7 fev. 2024.

BUONOCORE, Carolina *et al.* Influence of recent and long-term exposure to air-conditioned environments on thermal perception in naturally-ventilated classrooms. **Building and Environment**, [s. l.], v. 156, p. 233–242, 2019. Disponível em: Acesso em: 7 fev. 2024.

CABEZA, Luisa F.; CHÀFER, Marta; MATA, Érika. Comparative analysis of web of science and scopus on the energy efficiency and climate impact of buildings. **Energies**, [s. l.], v. 13, n. 2, 2020.

CALVIN, Katherine *et al.* **IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland. [S. l.: s. n.], 2023.**

CAMILLERI, M.; JAQUES, R.; ISAACS, N. Impacts of climate change on building performance in New Zealand. **Building Research and Information**, [s. l.], v. 29, n. 6, p. 440–450, 2001.

CAMPAGNA, Ludovica Maria; FIORITO, Francesco. On the Impact of Climate Change on Building Energy Consumptions: A Meta-Analysis. **Energies**, [s. l.], v. 15, n. 1, p. 354, 2022.

CAMPBELL, Richard J. **CRS Report for Congress Weather-Related Power Outages and Electric System Resiliency Specialist in Energy Policy Weather-Related Power Outages and Electric System Resiliency Congressional Research Service Weather-Related Power Outages and Electric System Resiliency Congressional Research Service.** [S. l.: s. n.], 2012. Disponível em: [www.crs.gov](http://www.crs.gov).

CÂNDIDO, Christhina *et al.* Cooling exposure in hot humid climates: are occupants ‘addicted’? **Architectural Science Review**, [s. l.], v. 53, n. 1, p. 59–64, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.3763/asre.2009.0100>.

CARLO, Joyce Correna; LAMBERTS, Roberto. Parâmetros e métodos adotados no regulamento de etiquetagem da eficiência energética de edifícios: parte 1: método prescritivo. **Ambiente Construído**, [s. l.], v. 10, n. 2, p. 7–26, 2010.

CBECS. **Information on the Commercial Building Sector**. [S. l.], 2003. Disponível em: <http://www.eia.doe.gov/emeu/cbecs>. Acesso em: 14 fev. 2024.

CHEN, Yang *et al.* Annual Review of Environment and Resources Recent Progress and Emerging Topics on Weather and Climate Extremes Since the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. [s. l.], 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1146/annurev-environ->

CHEN, Y. *et al.* Impacts of climate change and building energy efficiency improvement on city-scale building energy consumption. **Journal of Building Engineering**, [s. l.], v. 78, 2023.

CIANCIO, Virgilio *et al.* Energy demands of buildings in the framework of climate change: An investigation across Europe. **Sustainable Cities and Society**, [s. l.], v. 60, p. 102213, 2020. Disponível em: Acesso em: 19 fev. 2024.

CLARKE, J A. 3 - Building simulation. *In*: CLARKE, J A (org.). **Energy Simulation in Building Design (Second Edition)**. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2001. p. 64–98. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780750650823500036>.

CLIMATE CHANGE COMMITTEE - CCC. **Independent Assessment of UK Climate Risk: Advice to Government for the UK's Third Climate Change Risk Assessment (CCRA3)**. Londres: [s. n.], 2021.

COLEY, David; KERSHAW, Tristan. Changes in internal temperatures within the built environment as a response to a changing climate. **Building and Environment**, [s. l.], v. 45, n. 1, p. 89–93, 2010. Disponível em: Acesso em: 12 fev. 2024.

COSTA, Lúcio. **Brasília Revisitada**. [S. l.: s. n.], 1987.

CRAWLEY, Drury B. Impact of Climate Change on Buildings. *In*: , 2003, Edinburgh. **CIBSE/ASHRAE International Conference**. Edinburgh: CIBSE/ASHRAE International Conference, 2003.

CRAWLEY, D. B.; LAWRIE, L. **Climate.OneBuilding.Org**. [S. l.], [s. d.]. Disponível em: [https:// climate.onebuilding.org/](https://climate.onebuilding.org/). Acesso em: 9 maio 2024.

CRONIN, Jennifer; ANANDARAJAH, Gabriel; DESSENS, Olivier. Climate change impacts on the energy system: a review of trends and gaps. **Climatic Change**, [s. l.], v. 151, n. 2, p. 79–93, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10584-018-2265-4>.

CRUZ, Hildebrando; VIEGAS, João Carlos. On-site assessment of the discharge coefficient of open windows. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 126, p. 463–476, 2016.

CUI, Cheng *et al.* On the robustness of thermal comfort against uncertain future climate: A Bayesian bootstrap method. **Building and Environment**, [s. l.], v. 226, 2022.

DAY, Julia K.; O'BRIEN, William. Oh behave! Survey stories and lessons learned from building occupants in high-performance buildings. **Energy Research & Social Science**, [s. l.], v. 31, p. 11–20, 2017. Disponível em: Acesso em: 7 fev. 2024.

DE OLIVEIRA ROZA, M.P. *et al.* Natural disasters related to rainfall trends in Espírito Santo, southeastern Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, [s. l.], v. 155, n. 2, p. 1451–1466, 2024.

DE WILDE, Pieter; COLEY, David. **The implications of a changing climate for buildings**. [S. l.: s. n.], 2012.

DENG, Z. *et al.* Using urban building energy modeling to quantify the energy performance of residential buildings under climate change. **Building Simulation**, [s. l.], v. 16, n. 9, p. 1629–1643, 2023.

DI LUCA, Alejandro; DE ELÍA, Ramón; LAPRISE, René. Potential for small scale added value of RCM's downscaled climate change signal. **Climate Dynamics**, [s. l.], v. 40, n. 3–4, p. 601–618, 2013.

DORNELLES, Kelen Almeida. **Absortância solar de superfícies opacas: métodos de determinação e base de dados para tintas látex acrílica e PVA**. 2008. 160 f. Tese de Doutorado - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

DUARTE, C.; MORAIS, A. Legislative developments in Portugal of the concept of NZEB's. *In: , 2017. Challenges for Technology Innovation: An Agenda for the Future - Proceedings of the International Conference on Sustainable Smart Manufacturing, S2M 2016*. [S. l.: s. n.], 2017. p. 7–10.

ELETROBRAS. **Pesquisa de Posse e Hábitos de Uso de Equipamentos Elétricos na Classe Residencial**. [S. l.: s. n.], 2019. Disponível em: <https://q.eletrabras.com/pt/Paginas/PPH-2019.aspx>. Acesso em: 2 fev. 2024.

ELETROBRÁS *et al.* **Primeira Versão da Nota Técnica da Análise de Impacto Regulatório (AIR) - Projeto Avaliação de Impacto Regulatório e Plano de Implementação da Compulsoriedade do PBE Edifica**. [S. l.: s. n.], 2021.

ELGUINDI, N.; GIORGI, F.; TURUNCOGLU, U. Assessment of CMIP5 global model simulations over the subset of CORDEX domains used in the Phase I CREMA. **Climatic Change**, [s. l.], v. 125, n. 1, p. 7–21, 2014.

ELI, Letícia Gabriela *et al.* Análise da Eficiência Energética da Envoltória de Edificações Residenciais Conforme a Instrução Normativa do Inmetro (INI-R). *In:* , 2021, Palmas. **XVI Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído - ENCAC e XII Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído - ELACAC**. Palmas: ENCAC e ELACAC, 2021. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/355492374>.

EMPLAVI. **Setor Noroeste em Brasília: por que morar aqui**. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://emplavi.com.br/blog/setor-noroeste-em-brasilia/>. Acesso em: 6 fev. 2024.

EPE. **Balanco Energético Nacional 2021 - BEN - Ano base 2020**. [S. l.: s. n.], 2021a.

EPE. **Balanco Energético Nacional 2022 - BEN - Ano base 2021**. [S. l.: s. n.], 2022a. Disponível em: <http://www.epe.gov.br>.

EPE. **Balanco Energético Nacional 2023 - BEN - Ano base 2022**. [S. l.: s. n.], 2023a. Disponível em: <http://www.epe.gov.br>.

EPE. **Demanda de energia em ar-condicionado - Metodologia para avaliação da eficiência energética**. [S. l.: s. n.], 2022b. Disponível em: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.epe.gov.br/sites->

pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-656/EPEFactSheetArCondicionado\_2022\_03\_23.pdf. Acesso em: 2 fev. 2024.

EPE. **Nota técnica EPE 030/2018. Uso de ar condicionado no setor residencial brasileiro: Perspectivas e contribuições para o avanço em eficiência energética.** Rio de Janeiro: [s. n.], 2018.

EPE. **Plano 10 anos de expansão de energia - 2031.** [S. l.: s. n.], 2021b.

EPE. **Relatório Síntese 2023 Balanço Energético Nacional - BEN - Ano base 2022.** [S. l.: s. n.], 2023b.

ESCANDÓN, Rocío *et al.* Predicting the impact of climate change on thermal comfort in a building category: The Case of Linear-type Social Housing Stock in Southern Spain. **Energies**, [s. l.], v. 12, n. 11, 2019.

EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY - EEA. **Annual European Union Greenhouse Gas Inventory 1990–2019 and Inventory Report 2021: Submission to the UNFCCC Secretariat.** Copenhagen: [s. n.], 2021.

FALAGAS, Matthew E. *et al.* Comparison of PubMed, Scopus, Web of Science, and Google Scholar: strengths and weaknesses. **The FASEB Journal**, [s. l.], v. 22, n. 2, p. 338–342, 2008.

FANGER, P. O. Assessment of man's thermal comfort in practice. **Occupational and Environmental Medicine**, [s. l.], v. 30, n. 4, p. 313–324, 1973.

FANGER, P. O. **Thermal Comfort Analysis and Applications in Environmental Engineering.** Copenhagen: Danish Technical Press, 1970.

FAR, Claire; FAR, Harry. Improving energy efficiency of existing residential buildings using effective thermal retrofit of building envelope. **Indoor and Built Environment**, [s. l.], v. 28, n. 6, p. 744–760, 2019.

FARIA, Roberta Carolina Assunção. **Metodologia de avaliação da emissão embutida de GEE no estoque de edifícios construídos.** 2023. Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília, Brasília, 2023.

FATHI, Soheil *et al.* AI-based campus energy use prediction for assessing the effects of climate change. **Sustainability (Switzerland)**, [s. l.], v. 12, n. 8, p. 1–22, 2020.

FERNANDES, J. T. **Inserção de conceitos bioclimáticos, conforto térmico e eficiência energética**. 2009. Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília - UnB, Brasília, 2009.

FERREIRA, M. L. Extreme rain event highlights the lack of governance to face climate change in the Southeastern coast of Brazil. **Geography and Sustainability**, [s. l.], 2023.

FORASTIERE, Simone *et al.* Towards Achieving Zero Carbon Targets in Building Retrofits: A Multi-Parameter Building Information Modeling (BIM) Approach Applied to a Case Study of a Thermal Bath. **Energies**, [s. l.], v. 16, n. 12, 2023.

GASPARRINI, A.; GUO, Y.; HASHIZUME, M. Mortality risk attributable to high and low ambient temperature: a multicountry observational study. **The Lancet**, [s. l.], v. 386, n. 9991, p. 369–375, 2015. Disponível em: Acesso em: 2 fev. 2024.

GIORGI, Filippo *et al.* The CORDEX-CORE EXP-I Initiative: Description and Highlight Results from the Initial Analysis. **Bulletin of the American Meteorological Society**, [s. l.], v. 103, n. 2, p. E293–E310, 2022.

GÓES, Thiago. **Fachadas Duplas: Análise do Desempenho Termoenergético em Edifícios Comerciais no Contexto Climático de Brasília - DF**. 2018. Dissertação de Mestrado em Arquitetura e Urbanismo - Universidade de Brasília, Brasília, 2018.

GOLDSWORTHY, Mark; PORUSCHI, Lavinia. Air-conditioning in low income households; a comparison of ownership, use, energy consumption and indoor comfort in Australia. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 203, p. 109411, 2019. Disponível em: Acesso em: 7 fev. 2024.

HAN, M.; WANG, Z.; ZHANG, X. An approach to data acquisition for urban building energy modeling using a Gaussian mixture model and expectation-maximization algorithm. **Buildings**, [s. l.], v. 11, n. 1, p. 1–19, 2021.

HARZING, Anne-Wil; ALAKANGAS, Satu. Google Scholar, Scopus and the Web of Science: a longitudinal and cross-disciplinary comparison. **Scientometrics**, [s. l.], v. 106, n. 2, p. 787–804, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11192-015-1798-9>.

HARZING, AWK; VAN DER WAL, R. Google Scholar as a new source for citation analysis. **Ethics in Science and Environmental Politics**, [s. l.], v. 8, p. 61–73, 2008.

HASAN, Agha *et al.* Investigating the potential impact of future climate change on uk supermarket building performance. **Sustainability (Switzerland)**, [s. l.], v. 13, n. 1, p. 1–24, 2021a.

HASAN, Agha *et al.* Investigating the potential impact of future climate change on uk supermarket building performance. **Sustainability (Switzerland)**, [s. l.], v. 13, n. 1, p. 1–24, 2021b.

HEIDRICH, Oliver *et al.* A critical review of the developments in building adaptability. **International Journal of Building Pathology and Adaptation**, [s. l.], v. 35, n. 4, p. 284–303, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1108/IJBPA-03-2017-0018>.

HENSEN, J. L. M.; LAMBERTS, Roberto. **Building Performance Simulation for Design and Operation**. 2<sup>a</sup>ed. Second edition. | Abingdon, Oxon; New York, NY: Routledge, 2019.: Routledge, 2019.

HERRERA, M. *et al.* A review of current and future weather data for building simulation. **Building Services Engineering Research and Technology**, [s. l.], v. 38, n. 5, p. 602–627, 2017.

HERRERA, Manuel *et al.* A review of current and future weather data for building simulation. **Building Services Engineering Research and Technology**, [s. l.], v. 38, n. 5, p. 602–627, 2017.

HONG, Tianzhen *et al.* Ten questions concerning occupant behavior in buildings: The big picture. **Building and Environment**, [s. l.], v. 114, p. 518–530, 2017. Disponível em: Acesso em: 7 fev. 2024.

HONG, T. *et al.* Ten questions on urban building energy modeling. **Building and Environment**, [s. l.], v. 168, 2020.

HOSSEINI, Mohammad; JAVANROODI, Kavan; NIK, Vahid M. High-resolution impact assessment of climate change on building energy performance considering extreme weather events and microclimate – Investigating variations in indoor thermal comfort and degree-days. **Sustainable Cities and Society**, [s. l.], v. 78, 2022.

HUANG, Yuting; LI, Chao. Accurate heating, ventilation and air conditioning system load prediction for residential buildings using improved ant colony optimization and wavelet neural network. **Journal of Building Engineering**, [s. l.], v. 35, p. 101972, 2021.

HUMPHREYS, Michael. Quantifying occupant comfort: Are combined indices of the indoor environment practicable?. **Building Research and Information - BUILDING RES INFORM**, [s. l.], v. 33, p. 317–325, 2005.

IEA. **World Energy Outlook 2022**<https://www.iea.org/t%26c/>. Paris: [s. n.], 2022. Disponível em: International Energy Agency. Acesso em: 1 maio 2024.

IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, IEA Atlas of Energy. **CO2 Emissions from Fuel Combustion**. [S. l.], 2019. Disponível em: <https://www.iea.org/countries/brazil>. Acesso em: 2 fev. 2024.

IMAM, Mohamed; CHEN, Yu; MARSHALL, Tyrone. Integrating Climate Change Projections in Building Performance Simulations: Case Study of 17 North American Cities. **Journal of Architectural Engineering**, [s. l.], v. 29, n. 3, 2023.

INDRAGANTI, Madhavi. Behavioural adaptation and the use of environmental controls in summer for thermal comfort in apartments in India. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 42, n. 7, p. 1019–1025, 2010. Disponível em: Acesso em: 7 fev. 2024.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **The Future of Cooling Opportunities for energy-efficient air conditioning Together Secure Sustainable**. [S. l.: s. n.], 2018. Disponível em: [www.iea.org/t&c/](http://www.iea.org/t&c/). Acesso em: 7 fev. 2024.

IPCC. **Climate Change 2014: Synthesis Report**. Genebra: [s. n.], 2014a.

IPCC. **Climate Change 2021: The Physical Science Basis**. Cambridge: [s. n.], 2021.

IPCC. **Climate change 2022**. Genebra: [s. n.], 2022a.

IPCC. **Global Warming of 1.5°C**. [S. l.]: Cambridge University Press, 2022b.

IPCC. **UN Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate change 2014**. Genebra: [s. n.], 2014b. Disponível em: [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/SYR\\_AR5\\_FINAL\\_full\\_wcover.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/SYR_AR5_FINAL_full_wcover.pdf). Acesso em: 2 fev. 2024.

IPHAN. **Conjunto urbanístico de Brasília - Portaria nº 166/2016 (Complementação da Portaria nº314/1992)**. Brasília: [s. n.], 2016.

JALALI, Zahra; SHAMSELDIN, Asaad Y.; GHAFFARIANHOSEINI, Amir. Impact assessment of climate change on energy performance and thermal load of residential buildings in New Zealand. **Building and Environment**, [s. l.], v. 243, p. 110627, 2023. Disponível em: Acesso em: 3 fev. 2024.

JALALI, Zahra; SHAMSELDIN, Asaad Y.; MANNAKKARA, Sandeeka. Evaluation of climate change effects on residential building cooling and heating demands in New Zealand: implications for energy efficiency standards and building codes. **International Journal of Building Pathology and Adaptation**, [s. l.], 2023.

JANKOVIC, Ljubomir. Lessons learnt from design, off-site construction and performance analysis of deep energy retrofit of residential buildings. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 186, p. 319–338, 2019.

JENTSCH, Mark F. *et al.* Transforming existing weather data for worldwide locations to enable energy and building performance simulation under future climates. **Renewable Energy**, [s. l.], v. 55, p. 514–524, 2013. Disponível em: Acesso em: 9 maio 2024.

JESSEL, Sonal; SAWYER, Samantha; HERNÁNDEZ, Diana. Energy, Poverty, and Health in Climate Change: A Comprehensive Review of an Emerging Literature. **Frontiers in Public Health**, [s. l.], v. 7, 2019. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpubh.2019.00357>.

KAEHLER, Maciel Jose Wagner. **Un outil d'aide a la decision et de gestion des actions pour la maitrise de la demande d'energie - de la conception au developpement**. 1993. 250 f. Tese doutorado - Ecole Nationale Superieure des Mines, Paris, 1993. Disponível em: <http://www.theses.fr/1993ENMP0412>.

KAMPELIS, Nikolaos *et al.* An integrated energy simulation model for buildings. **Energies**, [s. l.], v. 13, n. 5, 2020.

KESIK, Ted; O'BRIEN, William; OZKAN, Aylin. Toward a standardized framework for thermal resilience modelling and its practical application to futureproofing. **Science and Technology for the Built Environment**, [s. l.], v. 28, n. 6, p. 742–756, 2022.

KINGMA, Boris; VAN MARKEN LICHTENBELT, Wouter. Energy consumption in buildings and female thermal demand. **Nature Climate Change**, [s. l.], v. 5, n. 12, p. 1054–1056, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/nclimate2741>.

KLEPEIS, Neil E *et al.* The National Human Activity Pattern Survey (NHAPS): a resource for assessing exposure to environmental pollutants. **Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology**, [s. l.], v. 11, n. 3, p. 231–252, 2001. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/sj.jea.7500165>.

KOÇ, Sena Göknur; MAÇKA KALFA, Sibel. The effects of shading devices on office building energy performance in Mediterranean climate regions. **Journal of Building Engineering**, [s. l.], v. 44, p. 102653, 2021.

KOVATS, S.; BRISLEY, R. **Health, Communities and the Built Environment**. Londres: [s. n.], 2021.

KRELLING, A. F. *et al.* A thermal performance standard for residential buildings in warm climates: Lessons learned in Brazil. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 281, 2023.

KRELLING, Amanda F. *et al.* Proposta de método de avaliação do desempenho térmico de residências: NBR 15575. In: , 2020, Porto Alegre. **XVII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído - ENTAC**. Porto Alegre: ENTAC, 2020. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/345742006>.

LABEEE. **Planilha de cálculo dos indicadores NBR 15575**. [S. l.], 2020. Disponível em: <https://labee.ufsc.br/pt-br/NBR15575-2020>. Acesso em: 2 abr. 2024.

LAMBERTS, Roberto *et al.* **Análise de custo/benefício de parâmetros de eficiência energética em Habitações de interesse Social: Produtos I, II, III, IV e V**. [S. l.: s. n.], 2020.

LAMBERTS, Roberto. **Desempenho térmico de edificações. Apostila da disciplina ECV 5161 do Departamento de Engenharia Civil da UFSC**. Florianópolis: Departamento de Engenharia Civil da UFSC, 2016.

LAMBERTS, Roberto. Uso racional de energia em edificações. *In:* , 1991, Florianópolis. **Encontro Nacional de Normalização Ligada ao Uso Racional de Energia e ao Conforto Ambiental em Edificações**. Florianópolis: [s. n.], 1991.

LAMBERTS, Roberto; DUTRA, L.; PEREIRA, F. **Eficiência Energética na Arquitetura**. 3. ed. Florianópolis: [s. n.], 2014.

LI, Danny H.W.; YANG, Liu; LAM, Joseph C. **Impact of climate change on energy use in the built environment in different climate zones - A review**. [S. l.]: Elsevier Ltd, 2012.

LIMA, Mayara Costa; PAIVA, Ed Carlo Rosa. Análise do projeto de um edifício educacional com base nas diretrizes construtivas da ABNT NBR 15220:2005. *In:* , 2023. **Anais [...]**. [S. l.: s. n.], 2023. p. 1–10.

LITTLE, S. **Flooding, fires and heat: A year of unprecedented weather extremes in B.C.** [S. l.], 2021. Disponível em: <https://globalnews.ca/news/8438007/bc-year-in-review-weather-extremes/>. Acesso em: 2 fev. 2024.

LIU, Sheng; KWOK, Yu Ting; REN, Chao. Investigating the impact of urban microclimate on building thermal performance: A case study of dense urban areas in Hong Kong. **Sustainable Cities and Society**, [s. l.], v. 94, 2023.

LOPES, Adriano Felipe Oliveira; SILVA, Caio Frederico e. **Building Performance Simulation in Brazil: A systematic review**. [S. l.: s. n.], 2019.

LOPS, Camilla *et al.* Double-Skin Façades for Building Retrofitting and Climate Change: A Case Study in Central Italy. **Applied Sciences (Switzerland)**, [s. l.], v. 13, n. 13, 2023.

LYU, K. *et al.* Restorative benefits of semi-outdoor environments at the workplace: Does the thermal realm matter?. **Building and Environment**, [s. l.], v. 222, 2022.

MACHARD, Anaïs *et al.* A Methodology for Assembling Future Weather Files Including Heatwaves for Building Thermal Simulations from the European Coordinated Regional Downscaling Experiment (EURO-CORDEX) Climate Data. **Energies**, [s. l.], v. 13, n. 13, p. 3424, 2020.

MACIEL, Renata A. **Eficiência Energética De Edificações No Contexto Brasileiro: O Papel Das Empresas De Serviços De Energia – ESCOs**. 2021. Dissertação mestrado - Universidade de Brasília, Brasília, 2021.

MARQUES, Vinícius. **Zonas térmicas da Terra**. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://www.todamateria.com.br/zonas-termicas/>. Acesso em: 19 maio 2023.

MARTISKAINEN, Mari; KIVIMAA, Paula. Role of knowledge and policies as drivers for low-energy housing: Case studies from the United Kingdom. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 215, p. 1402–1414, 2019. Disponível em: Acesso em: 11 fev. 2024.

MAVROGIANNI, Anna *et al.* Building characteristics as determinants of propensity to high indoor summer temperatures in London dwellings. **Building and Environment**, [s. l.], v. 55, p. 117–130, 2012. Disponível em: Acesso em: 3 fev. 2024.

MEIRA, Ana Ceres. **Eficiência Energética de Edificações Residenciais no Plano Piloto de Brasília: Uma análise comparativa com utilização do RTQ-R**. 2014. Dissertação mestrado - Universidade de Brasília, Brasília, 2014.

MELO, A. P. *et al.* A novel surrogate model to support building energy labelling system: A new approach to assess cooling energy demand in commercial buildings. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 131, p. 233–247, 2016. Disponível em: Acesso em: 7 fev. 2024.

MELO, Ana Paula. **Desenvolvimento de um método para estimar o consumo de energia de edificações comerciais através da aplicação de redes neurais**. 2012. Tese doutorado - Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis, 2012.

MÉNDEZ ECHENAGUCIA, Tomás *et al.* The early design stage of a building envelope: Multi-objective search through heating, cooling and lighting energy performance analysis. **Applied Energy**, [s. l.], v. 154, p. 577–591, 2015. Disponível em: Acesso em: 7 fev. 2024.

MMA. **ProjetEEE - Componentes construtivos**. [S. l.], 2024. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/projeteee/>. Acesso em: 15 mar. 2024.

NEGENDAHL, Kristoffer. Building performance simulation in the early design stage: An introduction to integrated dynamic models. **Automation in Construction**, [s. l.], v. 54, p. 39–53, 2015. Disponível em: Acesso em: 7 fev. 2024.

NICOL, J. F.; HUMPHREYS, M. A. Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 34, n. 6, p. 563–572, 2002. Disponível em: Acesso em: 11 fev. 2024.

NICOL, Fergus; HUMPHREYS, Michael; ROAF, Susan. **Adaptive Thermal Comfort: Principles and Practice**. [S. l.]: Routledge, 2012.

NIK, Vahid M.; MOAZAMI, Amin. Using collective intelligence to enhance demand flexibility and climate resilience in urban areas. **Applied Energy**, [s. l.], v. 281, p. 116106, 2021.

NIK, Vahid M; PERERA, A T D; CHEN, Deliang. Towards climate resilient urban energy systems: a review. **National Science Review**, [s. l.], v. 8, n. 3, 2021.

ONU - ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Times of crisis, times of change: science for accelerating transformations to sustainable development. Global Sustainable Development Report 2023**. [S. l.: s. n.], 2023.

ØSTERGÅRD, Torben; JENSEN, Rasmus L.; MAAGAARD, Steffen E. Building simulations supporting decision making in early design – A review. **Renewable and**

**Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 61, p. 187–201, 2016. Disponível em: Acesso em: 7 fev. 2024.

O’SULLIVAN, Kimberley Clare; CHISHOLM, Elinor. Baby it’s hot outside: Balancing health risks and energy efficiency when parenting during extreme heat events. **Energy Research & Social Science**, [s. l.], v. 66, p. 101480, 2020. Disponível em: Acesso em: 3 fev. 2024.

OZARISOY, B. **Energy effectiveness of passive cooling design strategies to reduce the impact of long-term heatwaves on occupants’ thermal comfort in Europe: Climate change and mitigation**. [S. l.]: Elsevier Ltd, 2022.

P. TOOTKABONI, Mamak; BALLARINI, Ilaria; CORRADO, Vincenzo. Analysing the future energy performance of residential buildings in the most populated Italian climatic zone: A study of climate change impacts. **Energy Reports**, [s. l.], v. 7, p. 8548–8560, 2021. Disponível em: Acesso em: 19 fev. 2024.

PARKINSON, Thomas; DE DEAR, Richard. Thermal pleasure in built environments: physiology of alliesthesia. **Building Research & Information**, [s. l.], v. 43, n. 3, p. 288–301, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/09613218.2015.989662>.

PARKINSON, Thomas; DE DEAR, Richard; BRAGER, Gail. Nudging the adaptive thermal comfort model. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 206, p. 109559, 2020. Disponível em: Acesso em: 11 fev. 2024.

PBE EDIFICA. **Sobre o PBE Edifica**. [S. l.], 2020. Disponível em: <https://www.pbeedifica.com.br/sobre>. Acesso em: 14 fev. 2024.

PERERA, A T D *et al.* Quantifying the impacts of climate change and extreme climate events on energy systems. **Nature Energy**, [s. l.], v. 5, n. 2, p. 150–159, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41560-020-0558-0>.

PÉREZ-ANDREU, Víctor *et al.* Impact of climate change on heating and cooling energy demand in a residential building in a Mediterranean climate. **Energy**, [s. l.], v. 165, p. 63–74, 2018.

POKHREL, Rabindra; GONZÁLEZ-CRUZ, Jorge E. Mitigation Options to Reduce Peak Air Temperature and Air-Conditioning Demand in the Context of a Warming Climate for a Tropical Coastal City. **Journal of Engineering for Sustainable Buildings and Cities**, [s. l.], v. 2, n. 2, 2021.

P.TOOTKABONI, Mamak *et al.* A Comparative Analysis of Different Future Weather Data for Building Energy Performance Simulation. **Climate**, [s. l.], v. 9, n. 2, p. 37, 2021.

RAMOS, Greici *et al.* Adaptive behaviour and air conditioning use in Brazilian residential buildings. **Building Research and Information**, [s. l.], v. 49, n. 5, p. 496–511, 2021.

RAMOS, Greici. **Impactos Socioculturais e o Comportamento do Usuário em Edificações Residenciais**. 2020. Tese Doutorado - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2020.

RITCHIE, Hannah *et al.* **Population Growth**. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://ourworldindata.org/population-growth>. Acesso em: 26 fev. 2024.

RODRIGUES, Eugénio; FERNANDES, Marco S.; CARVALHO, David. Future weather generator for building performance research: An open-source morphing tool and an application. **Building and Environment**, [s. l.], v. 233, p. 110104, 2023.

RUMMUKAINEN, Markku. Added value in regional climate modeling. **WIREs Climate Change**, [s. l.], v. 7, n. 1, p. 145–159, 2016.

SANTAMOURIS, Mat. Cooling the buildings – past, present and future. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 128, p. 617–638, 2016.

SANTAMOURIS, M. On the energy impact of urban heat island and global warming on buildings. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 82, p. 100–113, 2014. Disponível em: Acesso em: 3 fev. 2024.

SANTAMOURIS, Mattheos; KOLOKOTSA, Dionysia. On the impact of urban overheating and extreme climatic conditions on housing, energy, comfort and environmental quality of vulnerable population in Europe. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 98, p. 125–133, 2015. Disponível em: Acesso em: 12 fev. 2024.

SANTOS, Flávia Maria Ávila dos; HIPPERT, Maria Aparecida Steinherz. NBR 15.575: desafios e adequações enfrentados pelas empresas de edificações frente à Norma de Desempenho. *In:* , 2016, Florianópolis. **ENSUS - IV Encontro de Sustentabilidade em Projeto**. Florianópolis: [s. n.], 2016.

SILVEIRA IMÓVEIS. **Tudo sobre a Região do Noroeste em Brasília**. [S. l.], 2023. Disponível em: Silveira Imóveis. Acesso em: 6 fev. 2024.

SINDICATO DA HABITAÇÃO DO DISTRITO FEDERAL - SECOVI/DF. **Boletim Imobiliário SECOVI: Amostra de Novembro de 2023**. Brasília: [s. n.], 2023.

SORGATO, Marcio José; *et al.* Análise do procedimento de simulação da NBR 15575 para avaliação do desempenho térmico de edificações residenciais. **Ambiente Construído**, [s. l.], v. 14, n. 4, p. 83–101, 2014.

SORGATO, Marcio José. **Desempenho térmico de edificações residenciais unifamiliares ventiladas naturalmente**. 2009. Dissertação de mestrado - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

SORGATO, Marcio José; *et al.* **Nota técnica referente à avaliação para a norma de desempenho NBR 15575 em consulta pública**. Florianópolis: [s. n.], 2012. Disponível em: <http://www.labeee.ufsc.br>|Telefones: .

STAGRUM, Anna Eknes *et al.* Climate Change Adaptation Measures for Buildings—A Scoping Review. **Sustainability**, [s. l.], v. 12, n. 5, p. 1721, 2020.

STEEMERS, Koen; YUN, Geun Young. Household energy consumption: a study of the role of occupants. **Building Research & Information**, [s. l.], v. 37, n. 5–6, p. 625–637, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/09613210903186661>.

STEG, Linda. Promoting household energy conservation. **Energy Policy**, [s. l.], v. 36, n. 12, p. 4449–4453, 2008. Disponível em: Acesso em: 7 fev. 2024.

STRENGERS, Yolande; MALLER, Cecily. Integrating health, housing and energy policies: social practices of cooling. **Building Research & Information**, [s. l.], v. 39, n. 2, p. 154–168, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/09613218.2011.562720>.

TEBALDI, Claudia *et al.* Extreme sea levels at different global warming levels. **Nature Climate Change**, [s. l.], v. 11, n. 9, p. 746–751, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01127-1>.

TOMRUKÇU, Gökçe; ASHRAFIAN, Touraj. Energy-efficient building design under climate change adaptation process: a case study of a single-family house. **International Journal of Building Pathology and Adaptation**, [s. l.], v. ahead-of-print, n. ahead-of-print, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1108/IJBPA-10-2021-0134>.

TRIANA, Maria Andrea; LAMBERTS, Roberto; SASSI, Paola. Should we consider climate change for Brazilian social housing? Assessment of energy efficiency adaptation measures. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 158, p. 1379–1392, 2018. Disponível em: Acesso em: 7 fev. 2024.

TROUP, Luke N.; FANNON, David J.; ECKELMAN, Matthew J. Spatio-temporal changes among site-to-source conversion factors for building energy modeling. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 213, 2020.

TWEED, Christopher *et al.* Thermal comfort practices in the home and their impact on energy consumption. **Architectural Engineering and Design Management**, [s. l.], v. 10, n. 1–2, p. 1–24, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/17452007.2013.837243>.

UNEP - UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. **Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector**. Nairobi: [s. n.], 2020. Disponível em: <https://globalabc.org/news/launched-2020-global-status-report-buildings-and-construction>. Acesso em: 2 fev. 2024.

UNITED NATIONS CLIMATE CHANGE. **Climate action and support trends**. [S. l.: s. n.], 2019.

VALDENEBRO, Esaiy; DIETRICH, Udo; INO, Akemi. Thermal comfort analysis of a representative multi-story social housing unit with wood as an alternative construction material in Brazil. *In:* , 2019. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**. [S. l.]: Institute of Physics Publishing, 2019.

VAN ECK, Nees Jan; WALTMAN, Ludo. Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. **Scientometrics**, [s. l.], v. 84, n. 2, p. 523–538, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11192-009-0146-3>.

VAN VUUREN, Detlef P. *et al.* The representative concentration pathways: an overview. **Climatic Change**, [s. l.], v. 109, n. 1–2, p. 5–31, 2011.

VECCHI, Renata De; CÂNDIDO, Christhina Maria; LAMBERTS, Roberto. Thermal history and comfort in a Brazilian subtropical climate: a “cool” addiction hypothesis. **Ambiente Construído**, [s. l.], v. 16, n. 1, p. 7–20, 2016.

VELLEI, M. *et al.* Thermal alliesthesia under whole-body step-change transients. *In: , 2023. E3S Web of Conferences*. [S. l.: s. n.], 2023.

VERSAGE, Rogério de Souza. **Metamodelo para estimar a carga térmica de edificações condicionadas artificialmente**. 2015. Tese doutorado - Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis, 2015.

VIEIRA, Elizabeth S; GOMES, José A N F. A comparison of Scopus and Web of Science for a typical university. **Scientometrics**, [s. l.], v. 81, n. 2, p. 587–600, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11192-009-2178-0>.

VON GLEHN, Patricia; KOS, Darja. Reflexão sobre o impacto dos códigos edíficos no desempenho térmico e lumínico de edifícios residenciais do bairro Noroeste, Brasília-DF. **Paranoá: cadernos de arquitetura e urbanismo**, [s. l.], n. 30, 2021.

WEBER, Fernando da Silva *et al.* **Desenvolvimento de um modelo equivalente de avaliação de propriedades térmicas para a elaboração de uma biblioteca de componentes construtivos brasileiros para o uso no programa EnergyPlus**. Florianópolis: [s. n.], 2017.

WEI, Yixuan *et al.* **A review of data-driven approaches for prediction and classification of building energy consumption**. [S. l.]: Elsevier Ltd, 2018.

WEISS, Margaret D. *et al.* Sleep Hygiene and Melatonin Treatment for Children and Adolescents With ADHD and Initial Insomnia. **Journal of the American Academy of Child & Adolescent Psychiatry**, [s. l.], v. 45, n. 5, p. 512–519, 2006.

WESTPHAL, Fernando. **Manual Técnico do Vidro Plano para Edificações**. [S. l.: s. n.], 2016.

WU, Zhibin *et al.* Effect of long-term indoor thermal history on human physiological and psychological responses: A pilot study in university dormitory buildings. **Building and Environment**, [s. l.], v. 166, p. 106425, 2019. Disponível em: Acesso em: 7 fev. 2024.

YAMAGUCHI, Yohei *et al.* Building stock energy modeling considering building system composition and long-term change for climate change mitigation of commercial building stocks. **Applied Energy**, [s. l.], v. 306, 2022.

YANG, Yuchen; JAVANROODI, Kavan; NIK, Vahid M. Climate change and energy performance of European residential building stocks – A comprehensive impact assessment using climate big data from the coordinated regional climate downscaling experiment. **Applied Energy**, [s. l.], v. 298, p. 117246, 2021. Disponível em: Acesso em: 2 fev. 2024.

YANG, Liu; YAN, Haiyan; LAM, Joseph C. Thermal comfort and building energy consumption implications – A review. **Applied Energy**, [s. l.], v. 115, p. 164–173, 2014. Disponível em: Acesso em: 7 fev. 2024.

YU J *et al.* A comparison of the thermal adaptability of people accustomed to air-conditioned environments and naturally ventilated environments. *Indoor Air*. **Indoor Air**, [s. l.], p. 110–8, 2012. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/21950966/>. Acesso em: 7 fev. 2024.

ZHAI, Zhiqiang John; HELMAN, Jacob Michael. Implications of climate changes to building energy and design. **Sustainable Cities and Society**, [s. l.], v. 44, p. 511–519, 2019.

ZHANG, J.; REN, G.; YOU, Q. Assessing the escalating human-perceived heatwaves in a warming world: The case of China. **Weather and Climate Extremes**, [s. l.], v. 43, 2024.

## APÊNDICE I CONFIGURAÇÕES DE CAMADAS DE MATERIAIS

- Paredes:

Edit material - \_ARGAMASSA\_ABS-60

**Materials**

General Surface properties Green roof Embodied carbon Phase change Cost

Surface Properties

Thermal absorptance (emissivity)	0,9000000
Solar absorptance	0,600
Visible absorptance	0,600
Roughness	3-Rough
<input type="checkbox"/> Colour	
<input checked="" type="checkbox"/> Texture	GranulatedGray453M

**Materials**

General Surface properties Green roof Embodied carbon Phase change Cost

General

**Name** \_P4.1\_BLOCO-CERAMICO-14X19X29

Description

Source CIBSE Guide A (2006)

Category Brick and blockwork

Region General

Material Layer Thickness

Thermal Properties

**Detailed properties**

Thermal Bulk Properties

Conductivity (W/m-K)	0,4280
Specific Heat (J/kg-K)	920,00
Density (kg/m3)	1627,00

Edit material - \_ARGAMASSA\_ABS-20

**Materials**

General Surface properties Green roof Embodied carbon Phase change Cost

Surface Properties

Thermal absorptance (emissivity)	0,9000000
Solar absorptance	0,200
Visible absorptance	0,200
Roughness	3-Rough
<input type="checkbox"/> Colour	
<input checked="" type="checkbox"/> Texture	GranulatedGray453M

Fonte: autoria própria.

- Lajes de entrepiso:

**Materials**

General Surface properties Green roof Embodied carbon Phase change Cost

General

**Name** \_CERAMICA\_ABS-60

Description

Source ISO 10456

Category Tiles

Region General

Material Layer Thickness

Thermal Properties

**Detailed properties**

Thermal Bulk Properties

Conductivity (W/m-K)	1,3000
Specific Heat (J/kg-K)	840,00
Density (kg/m3)	2300,00

Edit material - \_CERAMICA\_ABS-60

---

**Materials**

General Surface properties Green roof Embodied carbon Phase change Cost

Surface Properties

Thermal absorptance (emissivity)	0,9000000
Solar absorptance	0,600
Visible absorptance	0,600
Roughness	3-Rough

**Materials**

General Surface properties Green roof Embodied carbon Phase change Cost

General

**Name** CONTRAPISO-CONCRETO-AR-GESSO

Description

Source ISO 10456

Category Concretes

Region General

Material Layer Thickness

Force thickness

Thermal Properties

**Detailed properties**

Thermal Bulk Properties

Conductivity (W/m-K)	0,3730
Specific Heat (J/kg-K)	1000,00
Density (kg/m3)	5484,00

Edit material - \_GESSO\_ABS-20

---

**Materials**

General Surface properties Green roof Embodied carbon Phase change Cost

Surface Properties

Thermal absorptance (emissivity)	0,9000000
Solar absorptance	0,200
Visible absorptance	0,500
Roughness	3-Rough
<input type="checkbox"/> Colour	
<input checked="" type="checkbox"/> Texture	GranulatedGray1M

Fonte: autoria própria.

## APÊNDICE II RESULTADOS DE VARIÁVEIS ARQUITETÔNICAS PARA MODELOS COM VENTILAÇÃO NATURAL

Combinação	Paredes	Janela	Vidro	Sombreamento	Desconforto ASHRAE 55		
					2010	2050	2090
1	P.CS	A.JP	A.VC	A.CV	877	1568	1873
2	P.CS	A.JP	A.VC	A.SV	909	1601	1888
3	P.CS	A.JP	A.VE	A.CV	250	954	1601
4	P.CS	A.JP	A.VE	A.SV	255	963	1606
5	P.CS	A.JM	A.VC	A.CV	1227	1802	1982
6	P.CS	A.JM	A.VC	A.SV	1274	1833	2001
7	P.CS	A.JM	A.VE	A.CV	364	1018	1611
8	P.CS	A.JM	A.VE	A.SV	371	1029	1618
9	P.CD	A.JP	A.VC	A.CV	1039	1761	1989
10	P.CD	A.JP	A.VC	A.SV	1082	1803	2014
11	P.CD	A.JP	A.VE	A.CV	240	1025	1651
12	P.CD	A.JP	A.VE	A.SV	246	1038	1658
13	P.CD	A.JM	A.VC	A.CV	1379	1926	2060
14	P.CD	A.JM	A.VC	A.SV	1433	1963	2077
15	P.CD	A.JM	A.VE	A.CV	374	1067	1642
16	P.CD	A.JM	A.VE	A.SV	379	1082	1650
17	P.PI	A.JP	A.VC	A.CV	1733	2196	2226
18	P.PI	A.JP	A.VC	A.SV	1817	2205	2229
19	P.PI	A.JP	A.VE	A.CV	329	1316	1846
20	P.PI	A.JP	A.VE	A.SV	340	1331	1854
21	P.PI	A.JM	A.VC	A.CV	1760	2157	2192
22	P.PI	A.JM	A.VC	A.SV	1819	2172	2197
23	P.PI	A.JM	A.VE	A.CV	443	1222	1740
24	P.PI	A.JM	A.VE	A.SV	452	1238	1747
25	P.LI	A.JP	A.VC	A.CV	1675	2174	2208
26	P.LI	A.JP	A.VC	A.SV	1755	2187	2215
27	P.LI	A.JP	A.VE	A.CV	324	1253	1810
28	P.LI	A.JP	A.VE	A.SV	338	1268	1818
29	P.LI	A.JM	A.VC	A.CV	1734	2138	2180
30	P.LI	A.JM	A.VC	A.SV	1821	2155	2187
31	P.LI	A.JM	A.VE	A.CV	445	1202	1723
32	P.LI	A.JM	A.VE	A.SV	456	1216	1730

Fonte: autoria própria.

## **Legenda:**

### **PAREDES:**

P.CS: Parede simples de bloco cerâmico ( $U=1,83\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ ,  $CT=161\text{kJ/m}^2\cdot\text{K}$ )

P.CD: Parede dupla de blocos cerâmicos ( $U=1,27\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ ,  $CT=195\text{kJ/m}^2\cdot\text{K}$ )

P.PI: Parede pesada isolada pré-moldada com concreto armado e isopor ( $U=0,40\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ ,  $CT=193\text{kJ/m}^2\cdot\text{K}$ )

P.LI: Parede leve isolada em drywall com placa cimentícia, lã de rocha e gesso ( $U=0,40\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ ,  $CT=53\text{kJ/m}^2\cdot\text{K}$ )

### **ABERTURAS:**

A.JM: Aberturas com janelas médias ( $WWR=36\%$ )

A.JP: Aberturas com janelas pequenas ( $WWR=18\%$ )

A.VC: Abertura com vidro comum ( $FS=87\%$ )

A.VE: Abertura com vidro eficiente ( $FS=40\%$ )

A.SV: Abertura sem veneziana (sombreamento 0%)

A.CV: Abertura com veneziana (sombreamento 100%)

Desconforto ASHRAE 55: Horas de desconforto segundo metodologia de aceitabilidade de conforto adaptativo da ASHRAE 55 para 80% das pessoas

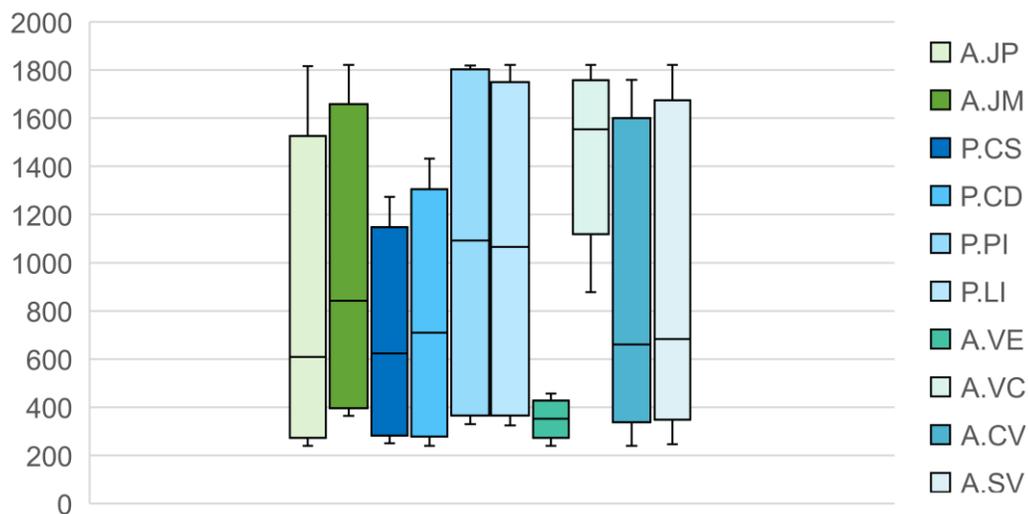
## APÊNDICE III RESULTADOS DE VARIÁVEIS ARQUITETÔNICAS PARA MODELOS SEM VENTILAÇÃO NATURAL

Combinação	Paredes	Janela	Vidro	Sombreamento	Carga Térmica		
					2010	2050	2090
1	P.CS	A.JP	A.VC	A.CV	5981	8382	10625
2	P.CS	A.JP	A.VC	A.SV	6092	8498	10747
3	P.CS	A.JP	A.VE	A.CV	4124	6508	8720
4	P.CS	A.JP	A.VE	A.SV	4151	6541	8758
5	P.CS	A.JM	A.VC	A.CV	9014	11610	14040
6	P.CS	A.JM	A.VC	A.SV	9218	11827	14266
7	P.CS	A.JM	A.VE	A.CV	5283	7873	10282
8	P.CS	A.JM	A.VE	A.SV	5335	7935	10351
9	P.CD	A.JP	A.VC	A.CV	5761	7702	9516
10	P.CD	A.JP	A.VC	A.SV	5889	7702	9654
11	P.CD	A.JP	A.VE	A.CV	3805	5744	7512
12	P.CD	A.JP	A.VE	A.SV	3837	5784	7556
13	P.CD	A.JM	A.VC	A.CV	8962	11206	13281
14	P.CD	A.JM	A.VC	A.SV	9186	11444	13530
15	P.CD	A.JM	A.VE	A.CV	5091	7342	9389
16	P.CD	A.JM	A.VE	A.SV	5147	7411	9467
17	P.PI	A.JP	A.VC	A.CV	5517	6710	7892
18	P.PI	A.JP	A.VC	A.SV	5671	6877	8069
19	P.PI	A.JP	A.VE	A.CV	3379	4578	5736
20	P.PI	A.JP	A.VE	A.SV	3420	4630	5795
21	P.PI	A.JM	A.VC	A.CV	8972	10654	12240
22	P.PI	A.JM	A.VC	A.SV	9241	10654	12560
23	P.PI	A.JM	A.VE	A.CV	4863	6564	8176
24	P.PI	A.JM	A.VE	A.SV	4928	6646	8271
25	P.LI	A.JP	A.VC	A.CV	5447	6676	7918
26	P.LI	A.JP	A.VC	A.SV	5601	6842	8096
27	P.LI	A.JP	A.VE	A.CV	3296	4519	5769
28	P.LI	A.JP	A.VE	A.SV	3337	4570	5829
29	P.LI	A.JM	A.VC	A.CV	8922	10639	12288
30	P.LI	A.JM	A.VC	A.SV	9178	10914	12580
31	P.LI	A.JM	A.VE	A.CV	4800	6520	8208
32	P.LI	A.JM	A.VE	A.SV	4864	6602	8306

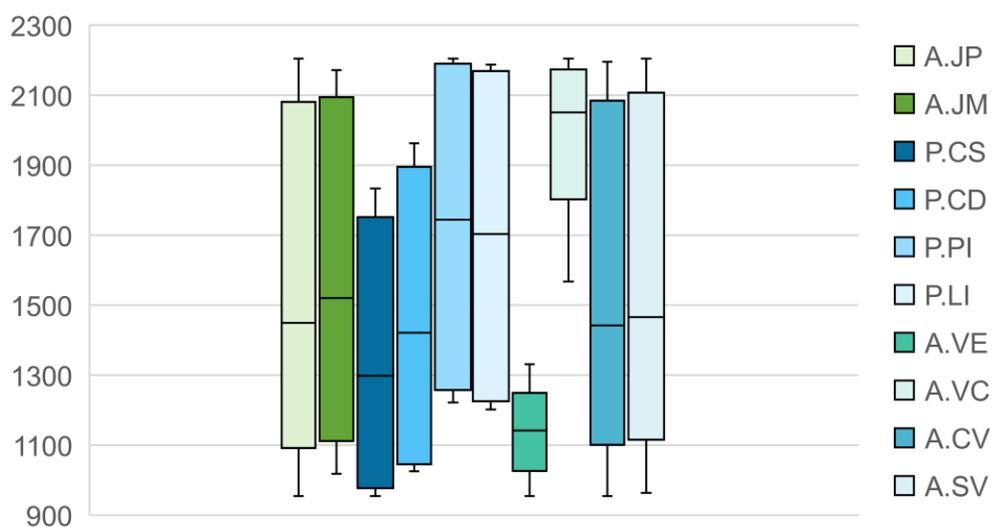
Fonte: autoria própria.

## APÊNDICE IV RESULTADOS DE RELEVÂNCIA DE CADA VARIÁVEL NOS RESULTADOS DO MODELO COM VENTILAÇÃO NATURAL PARA TODOS OS CENÁRIOS CLIMÁTICOS ANALISADOS

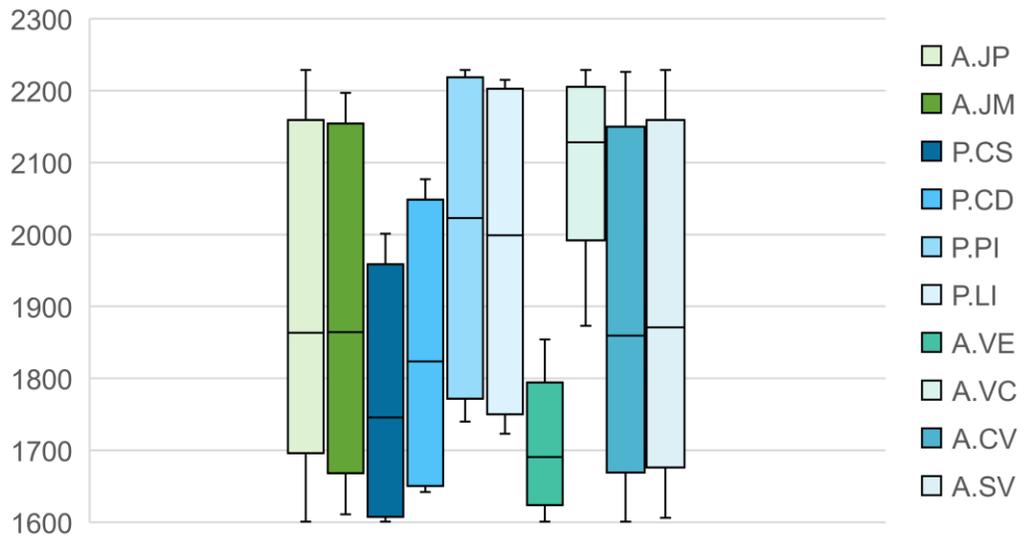
- Cenário climático atual



- Cenário climático 2050

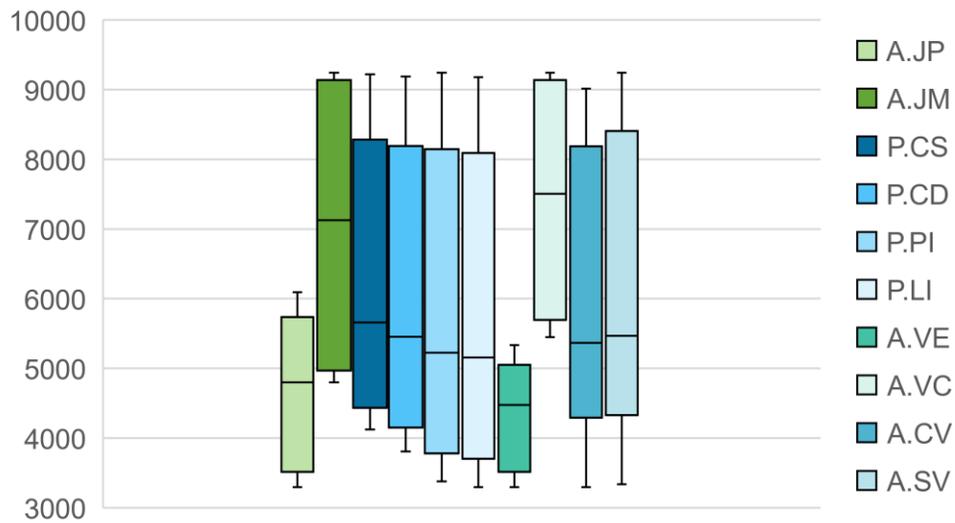


- Cenário climático 2090

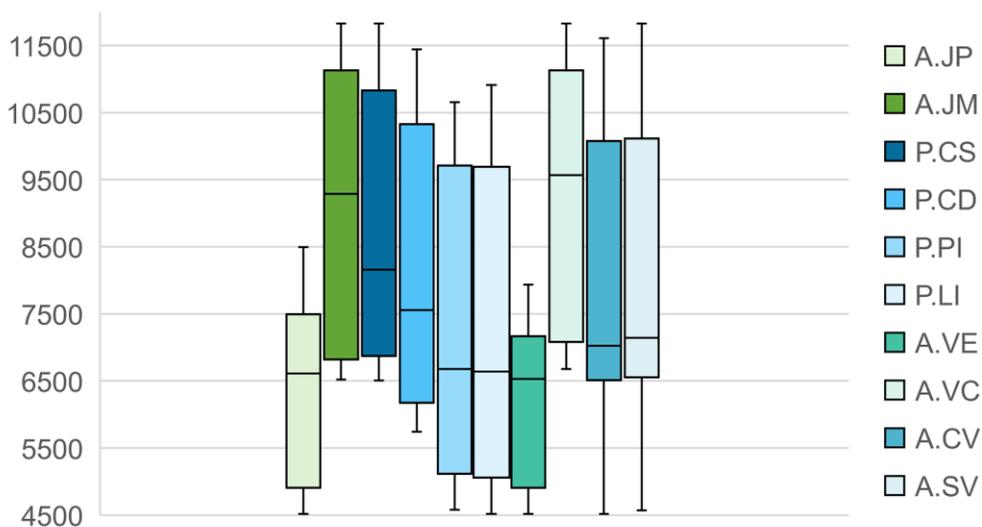


## APÊNDICE V RESULTADOS DE RELEVÂNCIA DE CADA VARIÁVEL NOS RESULTADOS DO MODELO SEM VENTILAÇÃO NATURAL PARA TODOS OS CENÁRIOS CLIMÁTICOS ANALISADOS

- Cenário climático atual



- Cenário climático 2050



- Cenário climático 2090

