



UNIVERSIDADE
ESTADUAL DE LONDRINA

GUSTAVO HENRIQUE NUNES

**INFLUÊNCIA DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA
SENSIBILIDADE GLOBAL DE PARÂMETROS
TERMOFÍSICOS DE HABITAÇÕES BRASILEIRAS**

Londrina
2021

GUSTAVO HENRIQUE NUNES

**INFLUÊNCIA DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA
SENSIBILIDADE GLOBAL DE PARÂMETROS
TERMOFÍSICOS DE HABITAÇÕES BRASILEIRAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual de Londrina, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadora: Profa. Dra. Thalita Gorban Ferreira Giglio

Londrina
2021

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UEL

N972 Nunes, Gustavo Henrique.

Influência das mudanças climáticas na sensibilidade global de parâmetros termofísicos de habitações brasileiras / Gustavo Henrique Nunes. - Londrina, 2021.

257 f. : il.

Orientador: Thalita Gorban Ferreira Giglio.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual de Londrina, Centro de Tecnologia e Urbanismo, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2021.

Inclui bibliografia.

1. Engenharia civil - Tese. 2. Construção civil - Tese. 3. Desempenho térmico e energético de edificações - Tese. 4. Simulação computacional - Tese. I. Gorban Ferreira Giglio, Thalita. II. Universidade Estadual de Londrina. Centro de Tecnologia e Urbanismo. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

CDU 62

GUSTAVO HENRIQUE NUNES

**INFLUÊNCIA DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA
SENSIBILIDADE GLOBAL DE PARÂMETROS
TERMOFÍSICOS DE HABITAÇÕES BRASILEIRAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual de Londrina, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

BANCA EXAMINADORA

Orientadora: Profa. Dra. Thalita Gorban Ferreira
Giglio
Universidade Estadual de Londrina - UEL

Profa. Dra. Ana Paula Melo
Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

Prof. Dr. Arthur Santos Silva
Universidade Federal de Mato Grosso do Sul -
UFMS

Profa. Dra. Camila Gregório Atem
Universidade Estadual de Londrina - UEL

Londrina, 22 de fevereiro de 2021.

Dedico este trabalho à Lucélia da Costa Nunes, mãe e professora sem igual; aos professores que me ensinaram, desde a escola; e aos pesquisadores brasileiros que contribuem com a ciência.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por tudo.

À minha mãe, Lucélia, que nunca mediu esforços para o meu bem-estar maior, visando sempre, não apenas minha formação intelectual e profissional, mas principalmente, minha felicidade e meu crescimento e realização pessoal. Sem sombra de dúvidas, a fé que ela tem em mim faz aumentar minha própria fé.

À minha vó, Olíria, que desempenha com propriedade o papel de avó. Como família, agradeço ainda à minha madrinha Luzia e, de maneira geral, a todos os familiares por sua importância particular em momentos vividos.

À minha excelente orientadora, Profa. Dra. Thalita Giglio, por acreditar no meu trabalho, por compartilhar seu conhecimento, pela sua dedicação e, sobretudo, pela sua prontidão e generosidade. Meu muito obrigado pelo apoio e atenção durante esta dissertação e todas as atividades e publicações desenvolvidas nesse período.

Aos membros da banca examinadora, que contribuíram muito para a qualidade do trabalho.

Aos amigos e aos colegas de UEL, Camila, David, Guilherme, Jéssica, Luis, Mariana, Mateus, Nádia, Rael, Rafaela e Vanessa, que participaram dessa etapa, cada um com uma importância e um significado.

À irmandade da graduação e aos amigos de longa data, sempre presentes, mesmo que distantes.

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da UEL, e à UEL como um todo, pela oportunidade de conhecimento e por me proporcionar uma nova formação e experiência de vida.

À Universidade do Estado de Mato Grosso, que me introduziu ao mundo da engenharia, e, em especial, ao Prof. Dr.-Ing. Marlon Leão e Prof. Dr. Flávio Crispim, que me apoiaram a ingressar no curso de mestrado. Agradeço também à Escola Municipal Prefeito Duílio Ribeiro Braga e à Escola Estadual Senador Filinto Müller, responsáveis pela minha base escolar.

À CAPES, pelo apoio financeiro para a realização da pesquisa.

Ao IAG-USP, que, gentilmente, cedeu dados obtidos em seu importante trabalho de monitoramento meteorológico.

Finalmente, agradeço a todos que contribuíram, cada um à sua maneira, de modo que eu pudesse desenvolver e defender com embasamento, resultados e conquistas que são parte dos meus projetos de realização pessoal e profissional.

*“A ciência não pode prever o que vai acontecer.
Só pode prever a probabilidade de algo
acontecer.”*

César Lattes

NUNES, Gustavo Henrique. **Influência das mudanças climáticas na sensibilidade global de parâmetros termofísicos de habitações brasileiras**. 2021. 257 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2021.

RESUMO

A construção civil é responsável por um grande impacto ambiental que contribui para alterações no clima mundial. Segundo a Administração Nacional norte-americana da Aeronáutica e do Espaço (NASA), a anomalia de temperatura, em 2020, foi 1,02 °C maior do que a temperatura média de 1951 a 1980, e o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) indica maiores aumentos para o futuro. Para resultados mais fiéis quanto ao desempenho termoenergético e intervenções para conforto térmico e eficiência energética em edificações ao longo de toda a sua vida útil, é necessário o desenvolvimento de estudos que analisem a influência de mudanças climáticas, bem como a resposta térmica e energética do ambiente construído frente às condições ambientais futuras. Isto posto, este trabalho teve como objetivo analisar os efeitos das mudanças climáticas no comportamento termoenergético de habitações sob os climas de Belém, Brasília, Curitiba e São Paulo, empregando simulações computacionais para identificar os índices de sensibilidade global de parâmetros termofísicos em diferentes períodos climáticos. Para o desenvolvimento da pesquisa, com auxílio da ferramenta de progressão de arquivos climáticos *CCWorldWeatherGen*, validada neste trabalho a partir de dados meteorológicos medidos na estação do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo, foram gerados arquivos climáticos que representaram condições ambientais futuras referentes aos períodos dos anos 2020 (2011 a 2040), 2050 (2041 a 2070) e 2080 (2071 a 2100), de acordo com o cenário A2 do IPCC. Os resultados da validação da ferramenta *CCWorldWeatherGen*, indicaram que a técnica é eficaz e que a progressão de variáveis como a temperatura de bulbo seco e umidade relativa do ar do arquivo climático para o período 2020, em São Paulo, principalmente nos meses mais quentes, possuem fidelidade pertinente aos valores medidos entre 2011 e 2019. Em relação aos anos climáticos de referência, os resultados das progressões sugeriram que, no período atual, 2020, a temperatura do ar de Belém, Brasília, Curitiba e São Paulo, em média anual, é superior em 1,33 °C, 1,14 °C, 1,08 °C e 0,91 °C, e, até 2100, será superior em 5,06 °C, 4,60 °C, 4,65 °C e 4,23 °C, influenciando no conforto térmico dos usuários e no consumo de energia das edificações. Dessa forma, a importância de parâmetros termofísicos, que refletem o desempenho térmico e energético do ambiente construído, também será afetada pelas mudanças climáticas. Em síntese, os índices de sensibilidade de Morris, mostraram que, em Belém e Brasília, considerando um indicador de desempenho agregado a partir de um sistema de ventilação natural e outro híbrido, os parâmetros termofísicos mais importantes, alternando a ordenação em Brasília ao longo dos anos, são o fator de ventilação, a absorvância solar da envoltória e a transmitância térmica das paredes. Em Curitiba e em São Paulo, que passarão por alterações climáticas mais determinantes, os parâmetros termofísicos mais importantes para o desempenho agregado são a transmitância e capacidade térmica das paredes e absorvância solar da envoltória. Concluiu-se, também, que o projeto de edificações deve, necessariamente, considerar mudanças climáticas, de modo que o ambiente construído possua resiliência em seu desempenho. Adicionalmente, mais estudos são fundamentais para mais avanços no tema.

Palavras-chave: aquecimento global; análise de sensibilidade; arquivos climáticos futuros; *ccworldweathergen*; conforto térmico adaptativo; desempenho térmico e energético de edificações.

NUNES, Gustavo Henrique. **Influence of climate change on the global sensitivity of thermophysical parameters of Brazilian dwellings**. 2021. 257 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2021.

ABSTRACT

Civil construction is responsible for a major environmental impact that contributes to changes in the global climate. According to the National Aeronautics and Space Administration (NASA), the temperature anomaly in 2020 was 1.02 °C higher than the 1951 to 1980 average temperature, and the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) indicates greater increases for the future. For more accurate results on thermo-energetic performance and thermal comfort and energy efficiency interventions in buildings throughout their lifetime, it is necessary to develop studies that analyze the influence of climate change as well as the thermal and energy response of the built environment to future environmental conditions. This paper aimed to analyze the effects of climate change on the thermo-energetic behavior of Brazilian dwellings under the climates of Belém, Brasília, Curitiba, and São Paulo, by using computer simulations to identify the global sensitivity indexes of thermophysical parameters in different periods. For this research, with the CCWorldWeatherGen tool, validated in this paper using meteorological data measured by the Institute of Astronomy, Geophysics and Atmospheric Sciences of the University of São Paulo, weather files were generated to represent future environmental conditions for the periods 2020 (2011 to 2040), 2050 (2041 to 2070) and 2080 (2071 to 2100), according to the IPCC A2 scenario. The results of the validation of the CCWorldWeatherGen tool indicated that the technique is effective and that the progression of variables such as air dry-bulb temperature and air relative humidity from the weather file for the period 2020 in São Paulo, especially in the hottest months, have pertinent accuracy to the values measured between 2011 and 2019. Compared to the test reference year, the results of the progressions suggested that, in the current period, 2020, the air temperature of Belém, Brasília, Curitiba, and São Paulo, in annual average, is superior in 1.33 °C, 1.14 °C, 1.08 °C and 0.91 °C, and, until 2100, will be superior in 5.06 °C, 4.60 °C, 4.65 °C, and 4.23 °C, affecting the thermal comfort and energy consumption in buildings. Thus, the importance of thermophysical parameters, which reflect the thermal and energy performance of the built environment, will also be affected by climate change. In summary, the Morris sensitivity indexes showed that in Belém and Brasília, considering an aggregate performance indicator from a natural ventilation system and another hybrid, the most important thermophysical parameters, alternating the ordering in Brasília over the years, are the ventilation factor, the solar absorptance of the envelope, and the thermal transmittance of the walls. In Curitiba and São Paulo, which will go through more decisive climate changes, the most important thermophysical parameters for the aggregate performance are the thermal transmittance and capacity of the walls and the solar absorptance of the envelope. It was also concluded that building design must necessarily consider climate change, to provide resilience in the built environment performance. Additionally, more research is essential for further advances in the subject.

Keywords: adaptive thermal comfort; ccworldweathergen; future weather files; global warming; sensitivity analysis; thermo-energetic performance of buildings.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Alteração da temperatura na Terra no período 2016–2020, em relação a 1951–1980	37
Figura 2 – Emissões de CO ₂ e aquecimento global: 1880 a 2017	38
Figura 3 – Quantidade de trabalhos publicados sobre o tema; foram utilizadas as palavras-chave “human influence” e “climate change”	38
Figura 4 – (a) Estimativa de consumo anual de energia elétrica por serviço no setor residencial e (b) Matriz elétrica brasileira.....	39
Figura 5 – Alterações globais ao longo dos anos	42
Figura 6 – Evolução do forçamento radioativo total, em relação ao período pré-industrial (1765), para os cenários SRES e RCP	46
Figura 7 – Histórico de desmatamento e focos de incêndio registrados no Brasil desde 2000.....	48
Figura 8 – Limites de conforto térmico adaptativo em função da temperatura média mensal prevalecente, conforme equações do modelo Standard 55	55
Figura 9 – Proposta de alteração da faixa de conforto térmico, a partir de dados de aceitabilidade térmica do experimento de De Vecchi (2011)	56
Figura 10 – Processo básico para análise de sensibilidade em simulações computacionais.....	61
Figura 11 – Resumo gráfico do processo de desenvolvimento da pesquisa.....	72
Figura 12 – Planta baixa e corte transversal da edificação residencial adotada (medidas em metros)	73
Figura 13 – Previsão de aumento da temperatura máxima diária do ar até 2100 (2081–2100), em relação a 1986–2005, e apontamento das cidades consideradas neste estudo	74
Figura 14 – Mapa mundial da classificação climática Köppen-Geiger, e apontamento das cidades consideradas neste estudo	75
Figura 15 – Variáveis climáticas de Belém, Brasília, Curitiba e São Paulo, em médias mensais horárias, conforme os arquivos climáticos TRY	76
Figura 16 – Situação da estação meteorológica do IAG-USP, na cidade de São Paulo.....	80
Figura 17 – Estação meteorológica do IAG-USP.....	81
Figura 18 – Modelo da habitação para as simulações computacionais	83

Figura 19 – Rotina de ocupação da habitação para as simulações computacionais	85
Figura 20 – Rotina de acionamento da iluminação da habitação para as simulações computacionais (0 significa desligada e 1 significa ligada).....	86
Figura 21 – Fluxograma do algoritmo de controle do sistema de ventilação natural para os dormitórios.....	88
Figura 22 – Fluxograma do algoritmo de controle do sistema de ventilação natural para a sala/cozinha	88
Figura 23 – Fluxograma do algoritmo de controle da integração do sistema de condicionamento artificial e da ventilação natural para os dormitórios.....	90
Figura 24 – Fluxograma do algoritmo de controle da integração do sistema de condicionamento artificial e da ventilação natural para a sala/cozinha	90
Figura 25 – Procedimento para análise de sensibilidade global – Método de Morris.....	91
Figura 26 – Limites de conforto térmico adaptativo	97
Figura 27 – Temperatura de bulbo seco de São Paulo.....	101
Figura 28 – Umidade relativa do ar de São Paulo	103
Figura 29 – Radiação solar global de São Paulo	104
Figura 30 – Velocidade do vento de São Paulo.....	106
Figura 31 – Variáveis climáticas de Belém, em médias mensais horárias, conforme arquivo climático TRY e progressões para 2020, 2050 e 2080	108
Figura 32 – Diagramas de caixa para variáveis climáticas de Belém, conforme arquivo climático TRY e progressões para 2020, 2050 e 2080	109
Figura 33 – Histogramas de frequência para variáveis climáticas de Belém, conforme arquivo climático TRY e progressões para 2020, 2050 e 2080	110
Figura 34 – Variáveis climáticas de Brasília, em médias mensais horárias, conforme arquivo climático TRY e progressões para 2020, 2050 e 2080	113
Figura 35 – Diagramas de caixa para variáveis climáticas de Brasília, conforme os períodos climáticos.....	114
Figura 36 – Histogramas de frequência para variáveis climáticas de Brasília, conforme os períodos climáticos.....	115
Figura 37 – Variáveis climáticas de Curitiba, em médias mensais horárias, conforme arquivo climático TRY e progressões para 2020, 2050 e 2080	117
Figura 38 – Diagramas de caixa para variáveis climáticas de Curitiba, conforme os períodos climáticos.....	118

Figura 39 – Histogramas de frequência para variáveis climáticas de Curitiba, conforme os períodos climáticos.....	119
Figura 40 – Variáveis climáticas de São Paulo, em médias mensais horárias, conforme arquivo climático TRY e progressões para 2020, 2050 e 2080	122
Figura 41 – Diagramas de caixa para variáveis climáticas de São Paulo, conforme os períodos climáticos.....	123
Figura 42 – Histogramas de frequência para variáveis climáticas de São Paulo, conforme os períodos climáticos.....	124
Figura 43 – Esquema genérico de áreas de classificação de parâmetros, a partir da relação σ/μ^*	127
Figura 44 – Índices de sensibilidade para o indicador GHR, em cada período climático de Belém.....	129
Figura 45 – Índices de sensibilidade para o indicador CR, em cada período climático de Belém.....	130
Figura 46 – Índices de sensibilidade para o indicador Ieq, em cada período climático de Belém.....	131
Figura 47 – Índices de sensibilidade para o indicador GHA, em cada período climático de Brasília.....	135
Figura 48 – Índices de sensibilidade para o indicador GHR, em cada período climático de Brasília.....	136
Figura 49 – Índices de sensibilidade para o indicador CA, em cada período climático de Brasília.....	137
Figura 50 – Índices de sensibilidade para o indicador CR, em cada período climático de Brasília.....	138
Figura 51 – Índices de sensibilidade para o indicador Ieq, em cada período climático de Brasília.....	139
Figura 52 – Índices de sensibilidade para o indicador GHA, em cada período climático de Curitiba	143
Figura 53 – Índices de sensibilidade para o indicador GHR, em cada período climático de Curitiba	144
Figura 54 – Índices de sensibilidade para o indicador CA, em cada período climático de Curitiba.....	145
Figura 55 – Índices de sensibilidade para o indicador CR, em cada período climático de Curitiba.....	146

Figura 56 – Índices de sensibilidade para o indicador Ieq, em cada período climático de Curitiba.....	147
Figura 57 – Índices de sensibilidade para o indicador GHA, em cada período climático de São Paulo	151
Figura 58 – Índices de sensibilidade para o indicador GHR, em cada período climático de São Paulo	152
Figura 59 – Índices de sensibilidade para o indicador CA, em cada período climático de São Paulo	153
Figura 60 – Índices de sensibilidade para o indicador CR, em cada período climático de São Paulo	154
Figura 61 – Índices de sensibilidade para o indicador Ieq, em cada período climático de São Paulo	155
Figura 62 – Temperatura de bulbo seco de Belém, conforme os períodos climáticos	208
Figura 63 – Umidade relativa do ar de Belém, conforme os períodos climáticos.....	209
Figura 64 – Radiação solar global de Belém, conforme os períodos climáticos.....	210
Figura 65 – Velocidade do vento de Belém, conforme os períodos climáticos	211
Figura 66 – Temperatura de bulbo seco de Brasília, conforme os períodos climáticos... ..	216
Figura 67 – Umidade relativa do ar de Brasília, conforme os períodos climáticos.....	217
Figura 68 – Radiação solar global de Brasília, conforme os períodos climáticos.....	218
Figura 69 – Velocidade do vento de Brasília, conforme os períodos climáticos	219
Figura 70 – Temperatura de bulbo seco de Curitiba, conforme os períodos climáticos... ..	224
Figura 71 – Umidade relativa do ar de Curitiba, conforme os períodos climáticos	225
Figura 72 – Radiação solar global de Curitiba, conforme os períodos climáticos	226
Figura 73 – Velocidade do vento de Curitiba, conforme os períodos climáticos.....	227
Figura 74 – Temperatura de bulbo seco de São Paulo, conforme os períodos climáticos	232
Figura 75 – Umidade relativa do ar de São Paulo, conforme os períodos climáticos	233
Figura 76 – Radiação solar global de São Paulo, conforme os períodos climáticos	234
Figura 77 – Velocidade do vento de São Paulo, conforme os períodos climáticos.....	235
Figura 78 – Indicadores de desempenho de cada modelo da amostra, para os diferentes períodos climáticos de Belém (continua)	244

Figura 79 – Indicadores de desempenho de cada modelo da amostra, para os diferentes períodos climáticos de Brasília (continua)	245
Figura 80 – Indicadores de desempenho de cada modelo da amostra, para os diferentes períodos climáticos de Curitiba (continua).....	247
Figura 81 – Indicadores de desempenho de cada modelo da amostra, para os diferentes períodos climáticos de São Paulo (continua).....	248

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 –	Resumo dos RCP's apresentados no IPCC AR5	45
Quadro 2 –	Abordagens para obtenção de dados climáticos futuros	59
Quadro 3 –	Resumo das definições de parâmetros e configurações computacionais... ..	84
Quadro 4 –	Parâmetros de fontes de calor para as simulações computacionais	86
Quadro 5 –	Variáveis independentes para a análise de sensibilidade global	96
Quadro 6 –	Média absoluta μ^* para as variáveis independentes em todas as variáveis dependentes, conforme análise de sensibilidade global de Morris, para cada período climático de Belém	132
Quadro 7 –	Média absoluta μ^* para as variáveis independentes em todas as variáveis dependentes, conforme análise de sensibilidade global de Morris, para cada período climático de Brasília	140
Quadro 8 –	Média absoluta μ^* para as variáveis independentes em todas as variáveis dependentes, conforme análise de sensibilidade global de Morris, para cada período climático de Curitiba	148
Quadro 9 –	Média absoluta μ^* para as variáveis independentes em todas as variáveis dependentes, conforme análise de sensibilidade global de Morris, para cada período climático de São Paulo	156
Quadro 10 –	Estatísticas para a temperatura de bulbo seco [°C] de Belém, conforme os períodos climáticos	212
Quadro 11 –	Estatísticas para a umidade relativa do ar [%] de Belém, conforme os períodos climáticos	213
Quadro 12 –	Estatísticas para a radiação solar global [W/m ²] de Belém, conforme os períodos climáticos	214
Quadro 13 –	Estatísticas para a velocidade do vento [m/s] de Belém, conforme os períodos climáticos	215
Quadro 14 –	Estatísticas para a temperatura de bulbo seco [°C] de Brasília, conforme os períodos climáticos	220
Quadro 15 –	Estatísticas para a umidade relativa do ar [%] de Brasília, conforme os períodos climáticos	221
Quadro 16 –	Estatísticas para a radiação solar global [W/m ²] de Brasília, conforme os períodos climáticos	222

Quadro 17 – Estatísticas para a velocidade do vento [m/s] de Brasília, conforme os períodos climáticos	223
Quadro 18 – Estatísticas para a temperatura de bulbo seco [°C] de Curitiba, conforme os períodos climáticos	228
Quadro 19 – Estatísticas para a umidade relativa do ar [%] de Curitiba, conforme os períodos climáticos	229
Quadro 20 – Estatísticas para a radiação solar global [W/m ²] de Curitiba, conforme os períodos climáticos.....	230
Quadro 21 – Estatísticas para a velocidade do vento [m/s] de Curitiba, conforme os períodos climáticos	231
Quadro 22 – Estatísticas para a temperatura de bulbo seco [°C] de São Paulo, conforme os períodos climáticos	236
Quadro 23 – Estatísticas para a umidade relativa do ar [%] de São Paulo, conforme os períodos climáticos.....	237
Quadro 24 – Estatísticas para a radiação solar global [W/m ²] de São Paulo, conforme os períodos climáticos.....	238
Quadro 25 – Estatísticas para a velocidade do vento [m/s] de São Paulo, conforme os períodos climáticos.....	239
Quadro 26 – Propriedades termofísicas de cada modelo da amostra (continua)	240
Quadro 27 – Algoritmo ‘morris.create’, em linguagem R.....	251
Quadro 28 – Algoritmo ‘morris.analyse’, em linguagem R (continua).....	252

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACOSSO	<i>Adaptive Component Selection and Smoothing Operator</i> (Seleção de Componentes Adaptativos e Suavização do Operador)
ANOVA	<i>Analysis of Variance</i> (Análise de Variância)
AR	<i>Assessment Report</i> (Relatório de Avaliação)
ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers</i> (Sociedade Americana de Engenheiros de Aquecimento, Refrigeração e Ar Condicionado)
CA	Consumo de Energia para Aquecimento
CB3E	Centro Brasileiro de Eficiência Energética
<i>CCWeatherGen</i>	<i>Climate Change Weather File Generator</i> (Gerador de Arquivos Climáticos para as Mudanças Climáticas)
<i>CCWorldWeatherGen</i>	<i>Climate Change World Weather File Generator</i> (Gerador de Arquivos Climáticos Mundiais para as Mudanças Climáticas)
CGEE	Centro de Gestão e Estudos Estratégicos
CH ₄	Metano
CLT	<i>Cross-laminated Timber</i> (Madeira Laminada Cruzada)
CO ₂	Dióxido de Carbono
CIBSE	<i>Chartered Institution of Building Services Engineers</i> (Instituição Licenciada de Engenheiros de Serviços de Construção)
CR	Consumo de Energia para Resfriamento
CRESESB	Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito
DATec	Documento de Avaliação Técnica
DOE	<i>United States Department of Energy</i> (Departamento de Energia dos Estados Unidos)
EMS	<i>Energy Management System</i> (Sistema de Gerenciamento de Energia)
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EPW	<i>EnergyPlus Weather File</i> (Arquivo climático para o <i>EnergyPlus</i>)
FAO	<i>Food and Agriculture Organization of the United Nations</i> (Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação)
FAST	<i>Fourier Amplitude Sensitivity Test</i> (Teste de Amplitude de Sensibilidade de Fourier)

GCM	<i>General Circulation Model</i> (Modelo de Circulação Geral)
GHA	Graus-hora para Aquecimento
GHR	Graus-hora para Resfriamento
GLULAM	<i>Glue-lam</i> (Madeira Laminada Colada)
HadCM3	<i>Hadley Centre Coupled Model version 3</i> (Modelo Acoplado do Centro Hadley versão 3)
HadCRUT4	<i>Hadley Centre Research Unit Temperature – fourth version</i> (Unidade de Pesquisa de Temperatura do Centro Hadley - quarta versão)
HVAC	<i>Heating, Ventilation and Air Conditioning</i> (Aquecimento, Ventilação e Condicionamento de ar)
IAG-USP	Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo
ICSU	<i>International Council of Scientific Unions</i> (Conselho Internacional de Ciência)
IEA	<i>International Energy Agency</i> (Agência Internacional de Energia)
INI-C	Instrução Normativa Inmetro para Classe de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas
INI-R	Instrução Normativa Inmetro para Classe de Eficiência Energética de Edificações Residenciais
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas)
IRENA	<i>International Renewable Energy Agency</i> (Agência Internacional de Energias Renováveis)
LI	Limite Inferior
LS	Limite Superior
MAPE	<i>Mean Absolute Percentual Error</i> (Erro Absoluto Médio Percentual)
MARS	<i>Multivariate Adaptive Regression Splines</i> (Linhas de Regressão Adaptativa Multivariada)
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i> (Administração Nacional norte-americana da Aeronáutica e do Espaço)

NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i> (Administração Nacional norte-americana Oceânica e Atmosférica)
N ₂ O	Óxido nitroso
OAT	<i>One-at-a-time</i> (um por vez)
PBE	Programa Brasileiro de Etiquetagem
PBMC	Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas
PRODES	Programa de Cálculo do Desflorestamento da Amazônia
RAN	Relatório de Avaliação Nacional
RCP	<i>Representative Concentration Pathway</i> (Patamares de Concentração Representativos)
RTQ-C	Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviço e Públicas
RTQ-R	Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais
SERG	<i>Sustainable Energy Research Group</i> (Grupo de Pesquisa em Energia Sustentável)
SINAT	Sistema Nacional de Avaliação Técnica
SRC	<i>Standardized Regression Coefficients</i> (Coeficientes de Regressão Padronizados)
SRES	<i>Special Report on Emissions Scenarios</i> (Relatório Especial sobre Cenários de Emissões)
SRRC	<i>Standardized Rank Regression Coefficient</i> (Coeficientes de Regressão Padronizados Ordenados)
SVM	<i>Support Vector Machine</i> (Máquina de Vetores de Suporte)
SWERA	<i>Solar and Wind Resource Assessment</i> (Avaliação dos Recursos Solares e Eólicos)
TMY	Typical Meteorological Year (Ano Meteorológico Típico)
TRY	<i>Test Reference Year</i> (Ano Climático de Referência)
UNEP	<i>United Nations Environmental Programme</i> (Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente)
UNESCO	<i>United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization</i> (Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura)

UNFCCC	<i>United Nations Framework Convention on Climate Change</i> (Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas)
WMO	<i>World Meteorological Organization</i> (Organização Meteorológica Mundial)
X-LAM	<i>Cross-lam</i> (Madeira laminada cruzada)

LISTA DE SÍMBOLOS

μ	Média dos efeitos elementares das variáveis [unidade de medida varia]
μ^*	Média, em valor absoluto, dos efeitos elementares das variáveis [unidade de medida varia]
σ	Desvio padrão dos efeitos elementares das variáveis [unidade de medida varia]
acob	Absortância solar da cobertura [-]
apar	Absortância solar das paredes [-]
CTcob	Capacidade térmica da cobertura [kJ/m ² K]
CTpar	Capacidade térmica das paredes [kJ/m ² K]
CTpis	Capacidade térmica do piso [kJ/m ² K]
ecob	Emissividade da face interna da cobertura [-]
FSvid	Fator solar dos vidros das janelas [-]
Fvent	Fator de ventilação das janelas [-]
I _{eq}	Indicador equivalente de desempenho da edificação [-]
OS	Orientação solar [°]
tvnez	Transmitância solar e visível das venezianas das janelas (sombreamento) [-]
Ucob	Transmitância térmica da cobertura [W/m ² K]
Upar	Transmitância térmica das paredes externas [W/m ² K]
Upis	Transmitância térmica do piso [W/m ² K]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	31
1.1	OBJETIVOS	33
1.1.1	Objetivo Geral	33
1.1.2	Objetivos Específicos	34
1.2	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	34
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	36
2.1	MUDANÇAS CLIMÁTICAS	36
2.1.1	Aquecimento Global.....	40
2.1.2	Cenários Climáticos Futuros	44
2.1.3	Panorama No Brasil.....	47
2.2	INFLUÊNCIA DO DESEMPENHO TERMOENERGÉTICO DAS EDIFICAÇÕES NAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS	49
2.2.1	Eficiência Energética Em Edificações	52
2.2.2	Conforto Térmico Do Usuário	54
2.2.3	Arquivos Climáticos Futuros.....	58
2.2.4	Análise De Sensibilidade De Parâmetros Termofísicos.....	61
2.3	ESTUDOS QUE CONSIDERAM OS EFEITOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO DESEMPENHO TERMOENERGÉTICO DAS EDIFICAÇÕES	66
3	MÉTODO	72
3.1	OBJETO DE ESTUDO	72
3.2	CLIMAS ANALISADOS	74
3.3	ETAPAS DE DESENVOLVIMENTO	77
3.3.1	Arquivos Climáticos Futuros.....	77
3.3.1.1	Ferramenta CCWorldWeatherGen	78
3.3.1.2	Validação da ferramenta CCWorldWeatherGen	80
3.3.2	Simulações Termoenergéticas	82
3.3.2.1	Modelo.....	82
3.3.2.2	Definições de parâmetros e configurações computacionais.....	83
3.3.2.3	Definições de ocupação e uso, cargas internas e sistemas de ventilação	85
3.3.2.3.1	<i>Sistema de ventilação exclusivamente natural</i>	87

3.3.2.3.2	<i>Sistema de ventilação híbrida</i>	88
3.3.3	Análise de Sensibilidade	91
3.3.3.1	Determinação e Interpretação dos Efeitos Elementares de Morris	92
3.3.3.2	Variáveis independentes (parâmetros de ‘entrada’)	95
3.3.3.3	Variáveis dependentes (parâmetros de ‘saída’)	96
4	RESULTADOS	100
4.1	VALIDAÇÃO DA FERRAMENTA CCWORLDWEATHERGEN	100
4.1.1	Temperatura de Bulbo Seco	100
4.1.2	Umidade Relativa do Ar	102
4.1.3	Radiação Solar Global	104
4.1.4	Velocidade do Vento	105
4.2	PROGRESSÕES CLIMÁTICAS	107
4.2.1	Belém	107
4.2.2	Brasília	112
4.2.3	Curitiba	116
4.2.4	São Paulo	121
4.3	SENSIBILIDADE GLOBAL DE PARÂMETROS TERMOFÍSICOS E MUDANÇAS CLIMÁTICAS	126
4.3.1	Resultados para os Climas de cada Cidade	127
4.3.1.1	Belém	128
4.3.1.2	Brasília	134
4.3.1.3	Curitiba	142
4.3.1.4	São Paulo	150
4.3.2	Análises dos Índices de Sensibilidade	158
5	CONCLUSÕES	162
5.1	LIMITAÇÕES DO TRABALHO	164
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS	166
	REFERÊNCIAS	167
	APÊNDICE A – DESCRIÇÃO TÉCNICA DO CCWORLDWEATHERGEN	185

A.1	TEMPERATURA DO SOLO	185
A.2	TEMPERATURA DE BULBO SECO	186
A.3	TEMPERATURA DE PONTO DE ORVALHO	187
A.4	UMIDADE RELATIVA	188
A.5	PRESSÃO ATMOSFÉRICA	189
A.6	RADIAÇÃO EXTRATERRESTRE HORIZONTAL.....	189
A.7	RADIAÇÃO EXTRATERRESTRE DIRETA NORMAL	192
A.8	RADIAÇÃO INFRAVERMELHA HORIZONTAL	193
A.9	RADIAÇÃO GLOBAL HORIZONTAL	194
A.10	RADIAÇÃO DIRETA NORMAL	195
A.11	RADIAÇÃO DIFUSA HORIZONTAL.....	195
A.12	ILUMINÂNCIA GLOBAL HORIZONTAL	197
A.13	ILUMINÂNCIA DIRETA NORMAL	199
A.14	ILUMINÂNCIA DIFUSA HORIZONTAL.....	200
A.15	ILUMINÂNCIA ZENITAL	200
A.16	DIREÇÃO DO VENTO	201
A.17	VELOCIDADE DO VENTO	201
A.18	COBERTURA TOTAL DO CÉU	202
A.19	COBERTURA OPACA DO CÉU.....	202
A.20	VISIBILIDADE	203
A.21	ALTURA LIMITE	203
A.22	OBSERVAÇÃO DO TEMPO.....	203
A.23	CÓDIGO DO TEMPO	204
A.24	PRECIPITAÇÃO	204
A.25	PROFUNDIDADE ÓPTICA DOS AEROSSÓIS.....	205
A.26	PROFUNDIDADE DA NEVE.....	205
A.27	QUANTIDADE DE DIAS DESDE O ÚLTIMO DIA QUE NEVOU .	205
APÊNDICE B – EXPLICAÇÃO DOS PARÂMETROS TERMOFÍSICOS...		206
APÊNDICE C – DADOS DOS ARQUIVOS CLIMÁTICOS.....		208
C.1	BELÉM.....	208
C.2	BRASÍLIA.....	216
C.3	CURITIBA	224
C.4	SÃO PAULO.....	232
APÊNDICE D – DADOS DAS SIMULAÇÕES		240

D.1	AMOSTRA SIMULADA	240	
D.2	INDICADORES DE DESEMPENHO PARA O CLIMA DE BELÉM.....	244	
D.3	INDICADORES DE DESEMPENHO PARA O CLIMA DE BRASÍLIA.....	245	
D.4	INDICADORES DE DESEMPENHO PARA O CLIMA DE CURITIBA	246	
D.5	INDICADORES DE DESEMPENHO PARA O CLIMA DE SÃO PAULO.....	248	
ANEXO A – ALGORITMOS DA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE MORRIS			250
A.1	CRIAÇÃO DA AMOSTRA.....	250	
A.2	CÁLCULO DOS ÍNDICES DE SENSIBILIDADE DE MORRIS	251	

1 INTRODUÇÃO

Debates mundiais abordam cada vez mais os efeitos das mudanças climáticas, caracterizadas, principalmente, pela elevação da temperatura global. O tema consiste em potencial ameaça aos ecossistemas e seres humanos (IPCC, 2014). O ano de 2020 foi o mais quente da história, pareado com 2016, que teve as temperaturas intensificadas pelo *El Niño* (NASA, 2021a; NOAA, 2021). Segundo a NASA (2021a), a temperatura em 2020 foi 1,02 °C maior do que a média do século XX, representada pelo período de 1951 a 1980, igualando ao recorde registrado em 2016. Os dados da NASA (2021a) e da NOAA (2021) mostram que os seis anos mais quentes do recorde global ocorreram desde 2015 e os dez anos mais quentes da história ocorreram desde 2005. Adicionalmente, as últimas três décadas foram as mais quentes desde 1850. Se as emissões continuarem, associadas às tendências atuais, a temperatura média do ar no período de 2081 a 2100 poderá ser até 4,8 °C mais alta do que em 1986–2005, segundo o relatório de avaliação atual (AR5) do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) (IPCC, 2014).

O setor da construção civil é responsável por um alto impacto ambiental a partir da necessidade do uso de recursos naturais, somado ao crescimento populacional acelerado (CIB; UNEP-IETC, 2002; MONTES, 2016). Segundo Triana, Lamberts e Sassi (2016), o consumo de energia, bem como as emissões de poluentes que provocam o efeito estufa, caracterizam um dos principais focos dos impactos ambientais causado pelas construções, influenciando em mudanças climáticas por meio do aquecimento global. Pesquisas decorrentes da discussão do tema apontam que as construções são responsáveis por cerca de 40% das emissões de dióxido de carbono e do consumo final da energia mundial, alertando para a necessidade de desenvolver estratégias para aumentar a eficiência energética em edificações frente a cenários futuros (EICKER, 2014; IEA; UNEP, 2018).

De acordo com Brasil (2020), o setor de edificações residenciais consome cerca de 26% da eletricidade produzida no país e, embora o Brasil possua uma matriz elétrica consideravelmente limpa, 26,5% da eletricidade nacional ainda é produzida por termelétricas, que estão associadas às emissões de gases de efeito estufa. A demanda energética em habitações brasileiras cresceu exponencialmente nas últimas décadas e a perspectiva é de expansão crescente da quantidade de moradias (BRASIL, 2016). Atualmente, as edificações residenciais somam aproximadamente 63 milhões de domicílios e estima-se que sejam construídos mais 13 milhões nos próximos dez anos. Assim sendo, até 2050 o consumo de

energia no setor deve mais que dobrar, conforme previsão da Empresa de Pesquisa Energética (EPE) brasileira (BRASIL, 2016).

As políticas governamentais brasileiras evidenciam que a conservação da energia tem se tornado um tema muito relevante. Os cenários atual e futuro mostram que as habitações constituem uma parcela importante no setor da construção, dada a sua necessidade urgente de expansão (MONTES, 2016). Neste contexto, a implementação de medidas de eficiência energética permite reduzir impactos ambientais, assim como os investimentos em infraestrutura energética e a consequente dependência de fontes de energia (TAYLOR; FRANCOEUR; TRUDEAU, 2011). Estes fatores explicam o aumento das pesquisas sobre eficiência energética em edificações. Além disso, o crescente número de estudos sobre edificações e áreas urbanas evidenciam a preocupação com os efeitos e ameaças potenciais das mudanças climáticas sobre as habitações (DE WILDE; COLEY, 2012).

Considerando-se a vida útil da edificação, várias condições podem influenciar no seu comportamento termoenergético, como as condições climáticas, variáveis humanas, disposições arquitetônicas, dentre outras. Porém, Williams et al. (2012) alegam que as alterações no clima configuram um fator que pode apresentar maior influência durante a vida útil longa do ambiente construído. Estudos apontam que a vida útil das edificações varia entre 35 e 70 anos (MCKINSEY & COMPANY, 2009a). No Brasil, a NBR 15575 (ABNT, 2013) preconiza uma vida útil para edificações residenciais entre 50 e 75 anos. Uma vez que a resposta termoenergética do ambiente construído está estreitamente relacionada ao clima em que se insere (CASAGRANDE, 2013), Casagrande e Alvarez (2013), Nakicenovic e Swart (2000) e Olonscheck, Holsten e Kropp (2011) também apontam que mudanças no clima influenciam no desempenho ambiental das edificações, bem como no seu consumo energético.

Embora os impactos das alterações no clima já caracterizem um grande desafio para a humanidade, indicando a necessidade de se encontrar estratégias de adaptação às condições climáticas futuras (FARAH et al., 2019; DE WILDE; COLEY, 2012), a concepção de edificações não leva em consideração projeções de mudanças no clima, assumindo ainda informações climáticas do século passado para análises de desempenho termoenergético (INVIDIATA; GHISI, 2016). Ademais, pesquisas mostram que os arquivos climáticos utilizados para avaliar o comportamento termoenergético de edificações por simulações possuem informações desatualizadas (CHOW et al., 2002; WRIGHT, 2002). Portanto, com vistas a resultados mais fiéis quanto ao desempenho termoenergético e intervenções para eficiência energética em edificações ao longo de toda a sua vida útil, é extremamente relevante

e pertinente o desenvolvimento de pesquisas que analisem a influência de mudanças climáticas, bem como a resposta termoenergética de edificações frente às condições ambientais futuras.

Assim sendo, pesquisas mundiais para avaliação de medidas de eficiência energética em edificações associando mudanças climáticas estão surgindo (GUPTA; GREGG, 2012; KERSHAW; EAMES; COLEY, 2011; VAN HOOFF et al., 2014). No Brasil, estudos recentes (ALVES; DUARTE; GONÇALVES, 2016; CASAGRANDE; ALVAREZ, 2013; GUARDA et al., 2020; INVIDIATA; GHISI, 2016; NUNES; GIGLIO, 2020; TRIANA; LAMBERTS; SASSI, 2016; TRIANA; LAMBERTS; SASSI, 2018) vêm inserindo o tema frente às situações de edificações do país. No entanto, mais estudos, que abordem o comportamento de edificações residenciais com diferentes características construtivas sob diferentes condições climáticas, bem como a influência das variáveis projetuais, são importantes.

Diante disso, evidencia-se e justifica-se a relevância e pertinência deste estudo, que abrange uma análise da resposta termoenergética de edificações residenciais brasileiras, em diferentes localidades do país, considerando mudanças climáticas ao longo da vida útil das habitações.

1.1 OBJETIVOS

Buscando compreender os efeitos das mudanças climáticas no panorama brasileiro, visando associar alterações no clima com o desempenho termoenergético de edificações residenciais, e auxiliando no desenvolvimento de estratégias de eficiência energética que contemplem toda a vida útil das habitações, esta dissertação delimita os seguintes objetivos geral e específicos.

1.1.1 Objetivo Geral

Analisar os efeitos das mudanças climáticas no comportamento termoenergético de edificações residenciais brasileiras sob os climas de Belém, Brasília, Curitiba e São Paulo, empregando simulações computacionais para identificar os índices de sensibilidade global de parâmetros termofísicos em diferentes períodos climáticos.

1.1.2 Objetivos Específicos

- a) Investigar os efeitos das mudanças climáticas em variáveis que compõem os arquivos dos anos climáticos de referência (TRY) de Belém, Brasília, Curitiba e São Paulo
- b) Validar o uso da ferramenta *Climate Change World Weather File Generator (CCWorldWeatherGen)* para progressão de arquivos climáticos futuros;
- c) Determinar a importância de parâmetros termofísicos, a partir de índices de sensibilidade global, no comportamento termoenergético de edificações residenciais diante das mudanças climáticas;
- d) Estudar os efeitos das alterações climáticas na resposta termoenergética de edificações em diferentes regiões do Brasil: Belém, Brasília, Curitiba e São Paulo.

1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

De modo a organizar a exposição, esta dissertação está estruturada em cinco capítulos que conduzem a sequência de temas e discussões, objetivos de pesquisa, procedimentos metodológicos, resultados e conclusões.

No Capítulo 1, é introduzido o tema abordado na dissertação, justificando a realização do estudo e apresentando os objetivos de pesquisa.

A revisão bibliográfica necessária para fundamentar o tema é exibida no Capítulo 2. Este segundo capítulo está dividido em três partes que tratam das mudanças climáticas, das análises de desempenho termoenergético de edificações, e dos estudos que investigaram os efeitos de alterações climáticas e sua influência na resposta térmica e energética de edificações.

Embasado pelos argumentos que compõem e validam a importância do assunto, sucede-se para o Capítulo 3, que apresenta a descrição dos procedimentos metodológicos aplicados para alcançar os objetivos propostos. Esse terceiro capítulo inicia com a apresentação do objeto de estudo, depois, avança para a descrição dos climas, conforme as cidades brasileiras consideradas, e, por último, segue para as explicações das etapas de desenvolvimento, que contemplam a obtenção de arquivos climáticos futuros, as configurações de simulações termoenergéticas, bem como os procedimentos relacionados à análise de sensibilidade global.

O Capítulo 4 traz as análises dos resultados obtidos. Os resultados são apresentados em três partes, que incluem a validação da ferramenta *CCWorldWeatherGen*, as progressões climáticas para as quatro cidades consideradas no trabalho, e a sensibilidade global de parâmetros termofísicos, diante das mudanças climáticas.

No Capítulo 5, mostram-se as conclusões do trabalho, bem como suas limitações, e sugestões para trabalhos futuros.

Ao fim, são apresentadas as referências e os apêndices e anexos, com conteúdos considerados importantes para complementar a explicação do método utilizado, assim como os resultados obtidos neste trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentadas as principais ideias que delimitam o estudo, com uma revisão acerca de temas de mudanças climáticas, bem como sua influência no comportamento termoenergético de edificações.

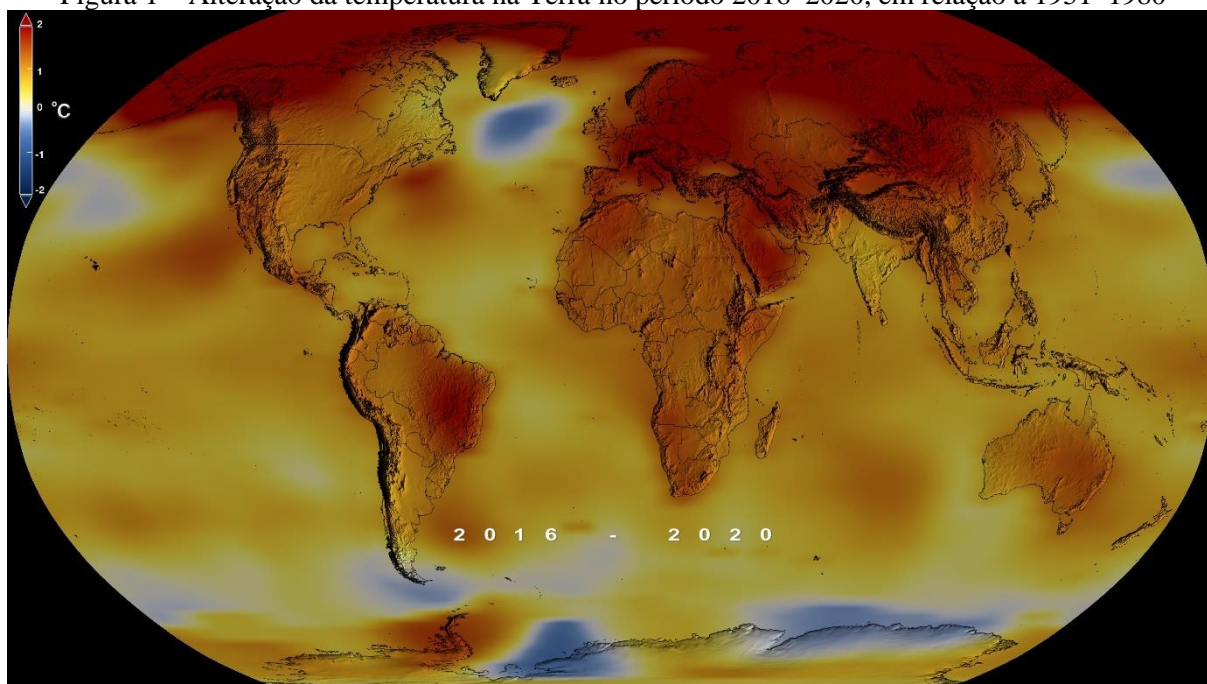
O conteúdo apresenta, inicialmente, dados de alterações no clima ao longo dos últimos anos e expectativas para períodos futuros. Depois, são apresentados assuntos relacionados à influência das mudanças climáticas no desempenho térmico e energético de edificações, abordando-se informações de simulações computacionais e análises de eficiência termoenergética. Ao fim, são apresentados estudos correlatos que investigaram as mudanças climáticas e seus efeitos em edificações.

2.1 MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Os efeitos das mudanças climáticas têm sido considerados como os principais desafios a serem enfrentados pela sociedade no século XXI (CASAGRANDE, 2013; FARAH, 2019; DE WILDE; COLEY, 2012). Segundo McFall-Johnsen (2019), muitos dos efeitos devastadores das mudanças climáticas já estão acontecendo, e as consequências estão diretamente relacionadas ao meio ambiente, à saúde humana e à economia. Durante os anos de 2019 e 2020, vários recordes de ondas de calor e inundações foram quebrados, assim como novas máximas de emissões de carbono e novos mínimos de gelo do mar também foram registrados. O ano de 2019, que registrou uma das maiores máximas de temperatura global da história e bateu recordes de emissões, de acordo com NASA (2021a) e NOAA (2021), trouxe consigo, ainda, furacões mais fortes e florestas mais inflamáveis (MCFALL-JOHNSEN, 2019). Por sua vez, 2020, apesar de registrar queda nas emissões de carbono, devido à pandemia de Covid-19 (FRIEDLINGSTEIN et al., 2020), igualou o recorde de aumento de temperatura alcançado no ano de 2016, que foi afetado pelo *El Niño* (NASA, 2021a).

Na Figura 1, ilustra-se a alteração da temperatura média global da Terra entre 2016 e 2020, em comparação com uma média de referência de 1951 a 1980, de acordo com uma análise do Estúdio de Visualização Científica e Instituto Goddard de Estudos Espaciais da NASA (NASA, 2021b). Amarelos, laranjas e vermelhos mostram regiões mais quentes. No Brasil, por exemplo, observa-se que existe uma notável diferença entre alterações na região norte, centro-oeste e sul do país.

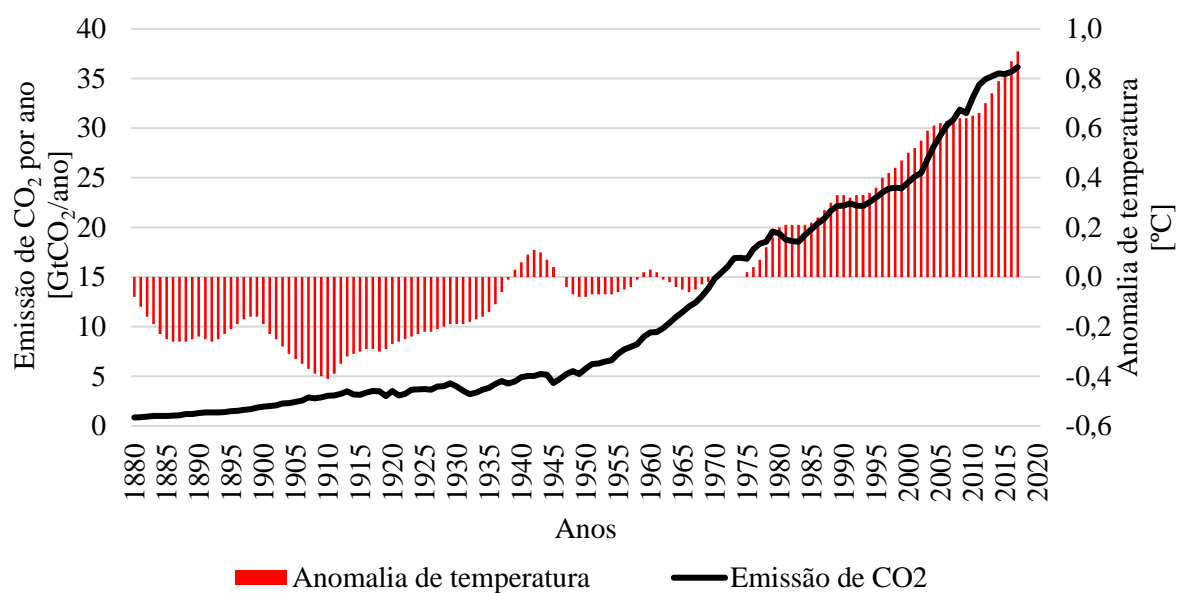
Figura 1 – Alteração da temperatura na Terra no período 2016–2020, em relação a 1951–1980



Fonte: NASA (2021b)

Conforme aponta o quinto relatório de avaliação do IPCC, uma das principais causas das mudanças climáticas consiste no aumento das emissões de gases de efeito estufa, especialmente o dióxido de carbono (CO_2) (IPCC, 2014). Embora medidas políticas venham sendo implementadas, as emissões de gases de efeito estufa continuam com taxa de crescimento elevada, e as previsões mais recentes do IPCC (IPCC, 2018) apontam informações pessimistas para os próximos anos. Além do mais, evidencia-se cada vez mais a influência do comportamento humano nas mudanças climáticas, devido à relação que tem sido observada entre a emissão de gases de efeito estufa e o aumento da temperatura média superficial do planeta. Na Figura 2, apresentam-se as informações das últimas décadas para as emissões de CO_2 mundial e a anomalia de temperatura¹ superficial do planeta (em referência ao período 1951 a 1980).

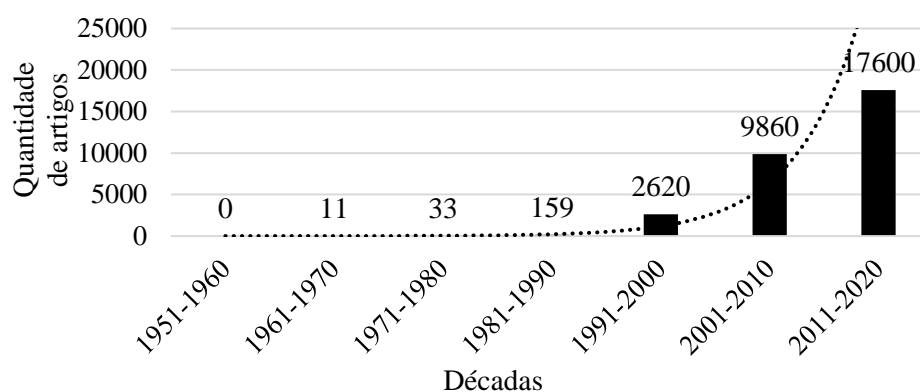
¹ O termo anomalia de temperatura significa um desvio extremo em relação à um valor de referência ou média de um determinado período (série climatológica). Esta informação é uma ferramenta de diagnóstico climático em escala global e fornece uma visão geral das temperaturas globais (ANGELOCCI; SENTELHAS, 2007; NOAA, 2020).

Figura 2 – Emissões de CO₂ e aquecimento global: 1880 a 2017

Fonte: o autor; elaborado com dados de NASA (2021a) e Ritchie e Roser (2019)

Por meio da Figura 2, pode-se observar que a variação na temperatura está diretamente associada às emissões de CO₂, visto que os valores para a variação positiva da anomalia da temperatura acompanham o crescimento da poluição atmosférica. Adicionalmente, segundo Krug et al. (2019), a evidência de que as alterações climáticas são devidas às influências antrópicas tem crescido exponencialmente, sendo extensamente discutidas na comunidade científica. De acordo com a base de dados do *Google Scholar*, existem mais de 30.000 trabalhos, desenvolvidos com crescimento exponencial entre 1951 e 2020, que associam “influência humana” e “mudanças climáticas”, conforme se demonstra na Figura 3.

Figura 3 – Quantidade de trabalhos publicados sobre o tema; foram utilizadas as palavras-chave “human influence” e “climate change”

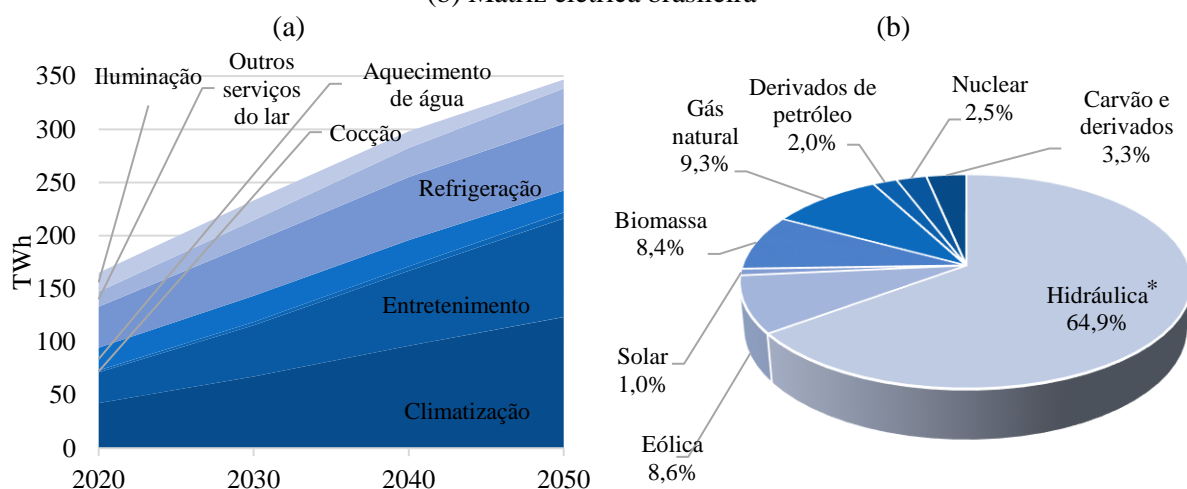


Fonte: o autor; elaborado a partir de dados do *Google Scholar*, em contagem realizada em 21 de janeiro de 2021

Assim como os autores do último relatório de avaliação do IPCC (IPCC, 2014), que apontam com alto grau de confiança que as mudanças no clima causam grande impacto em áreas urbanas, outros pesquisadores (NEMATCHOUA; OROSA; REITER, 2019; ROSENTHAL; GRUENSPECHT; MORAN, 1995; SOLAUN; CERDÁ, 2019) também concluem isso. Dentre os efeitos das variações climáticas na vida das pessoas e no ecossistema, tem-se o estresse e outros problemas de saúde associados às temperaturas mais elevadas, períodos de estiagem prolongados, incêndios, precipitações extremas, inundações, deslizamento de terras, poluição, elevação do nível do mar, entre outros. (IPCC, 2014; IPCC, 2018; ROSENTHAL; GRUENSPECHT; MORAN, 1995; SCHOLE, 2016).

Além disso, o desempenho das habitações está diretamente associado ao meio em que elas estão inseridas e, assim sendo, a vida útil longa da maioria das edificações faz com que mudanças no clima possam influenciar no seu comportamento termoenergético no decorrer dos anos, segundo várias pesquisas (CHAN, 2011; INVIDIATA; GHISI, 2016; LEVY; CANNEL; FRIEND, 2004; RADHI, 2009; NUNES; GIGLIO, 2020; ROSENTHAL; GRUENSPECHT; MORAN, 1995; TRIANA; LAMBERTS; SASSI, 2018; WILLIAMS et al., 2012). De maneira análoga, o desempenho de edificações pode influenciar nas mudanças climáticas, visto que habitações ineficientes demandam maior consumo de recursos para condicionamento ambiental, por exemplo. Nesse sentido, na Figura 4, apresentam-se a expectativa de consumo de energia elétrica por classe de equipamentos consumidores até o ano de 2050 e a matriz elétrica brasileira, conforme estudos da EPE (BRASIL, 2016; BRASIL, 2020).

Figura 4 – (a) Estimativa de consumo anual de energia elétrica por serviço no setor residencial e (b) Matriz elétrica brasileira



* inclui importação

Fonte: o autor; elaborado com dados de (a) Brasil (2016) e (b) Brasil (2020)

Por meio da Figura 4.a, observa-se que o consumo com climatização tende a continuar sendo o uso final de eletricidade mais representativo no futuro. Por sua vez, a partir da Figura 4.b, nota-se que, embora a maior parte da matriz elétrica nacional seja proveniente de fontes renováveis, as usinas termelétricas, que demandam recursos não renováveis como gás natural, derivados de petróleo e carvão e derivados, produzem uma parte considerável da eletricidade consumida no país, sobretudo nos horários de pico, e, dessa maneira, também contribuem para o agravamento do efeito estufa e do aquecimento global. Portanto, o comportamento termoenergético das edificações e as mudanças climáticas estão relacionados e merecem ser avaliados (MONTES, 2016; TRIANA; LAMBERTS; SASSI, 2018).

Nos itens a seguir, apresentam-se discussões da ciência climatológica, abordando-se o aquecimento global, os cenários climáticos futuros, bem como o panorama brasileiro e a relevância de medidas políticas nacionais.

2.1.1 Aquecimento Global

As emissões de poluentes e as mudanças no clima, com conseqüente aquecimento global, consistem em uma discussão antiga, conforme pode-se observar, por exemplo, nas obras de Kellong e Schwarc (1981), Parry (1990) e Rosenthal, Gruenspecht e Moran (1995). A Primeira Conferência Mundial do Clima foi realizada no Centro Internacional de Conferências, em Genebra, em 1979. O evento foi organizado pela Organização Meteorológica Mundial (WMO), em colaboração com a Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura (UNESCO), a Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO), a Organização Mundial da Saúde (WHO), o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (UNEP), o Conselho Internacional de Ciência (ICSU) e outros parceiros científicos, como uma conferência mundial de especialistas em clima e humanidade (WHITE, 1979; ZILLMAN, 2009).

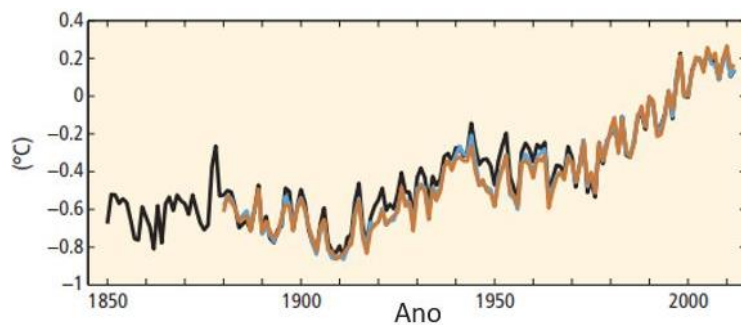
De acordo com Montes (2016), um dos desdobramentos da Primeira Conferência Mundial do Clima, já em 1988, foi a criação do IPCC, fruto da união da WMO e do UNEP para produzir informações que possibilitassem o entendimento das mudanças climáticas decorrentes da ação do homem. O IPCC é responsável pelo desenvolvimento de uma série de documentos que possibilitam a compreensão das alterações climáticas, seus efeitos e possíveis estratégias de mitigação (IPCC, 2007).

Dentre as informações fundamentais analisadas pelos relatórios do IPCC que possibilitam a compreensão do aquecimento global, estão os padrões de poluição ambiental,

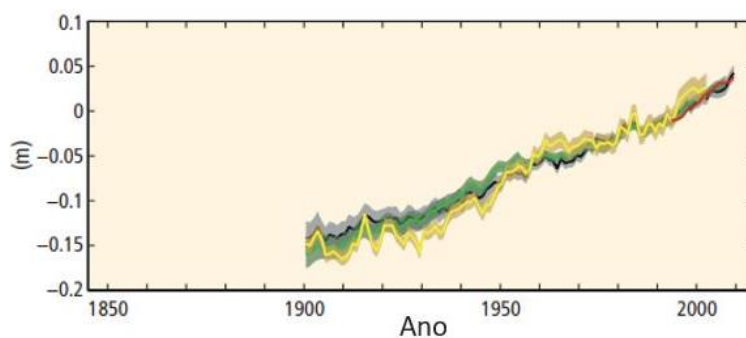
especialmente os gases de efeito estufa. Estes gases absorvem parte da radiação infravermelha emitida pela superfície terrestre, dificultando sua liberação (passagem) para o espaço e fazendo com que calor permaneça no planeta. Os principais gases, que estão aumentando de concentração, são o dióxido de carbono (CO₂), o metano (CH₄) e o óxido nitroso (N₂O). Estes gases possuem poder de influência no efeito estufa diferentes, devido às suas diferentes propriedades radiativas e ao tempo de vida na atmosfera (IPCC, 2007), e embora o metano seja mais nocivo (YVON-DUROCHER et al. 2014), o dióxido de carbono é o mais relevante, ao passo que cerca de 80% das emissões são causadas por ele, segundo a Administração Nacional Oceânica e Atmosférica dos Estados Unidos (BUTLER; MONTZKA, 2019) e a Organização Meteorológica Mundial (WMO, 2019). Nesse sentido, o CO₂ é, também, o mais significativo para a indústria da construção civil, uma vez que cerca de 40% das emissões do gás é proveniente das construções (IEA; UNEP, 2018).

Segundo a NASA (2021c), em 2020, o CO₂ atmosférico registrou uma concentração atmosférica de 415 ppm (partes por milhão), devido às atividades humanas, como desmatamento e queima de combustíveis fósseis, além de processos naturais, como respiração e erupções vulcânicas. Com isso, ainda de acordo com a agência espacial norte-americana, a concentração medida atingiu seu nível mais alto em pelo menos 800.000 anos. As emissões de CO₂ consistem no principal parâmetro utilizado como referência pelo IPCC para relacionar o aquecimento global com as ações humanas, como elucidado na Figura 2. Na Figura 5, apresentam-se os dados do quinto relatório de avaliação do IPCC (IPCC, 2014) para as mudanças observadas no sistema climático, a partir dos aumentos da temperatura, do nível do mar, da concentração de gases de efeito estufa na atmosfera e das emissões totais de CO₂.

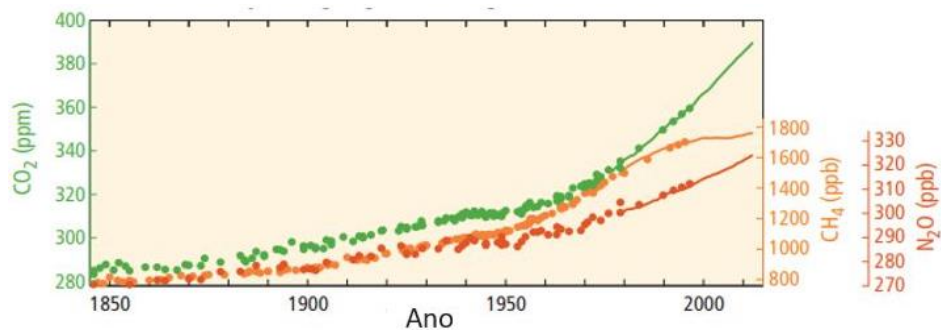
Figura 5 – Alterações globais ao longo dos anos



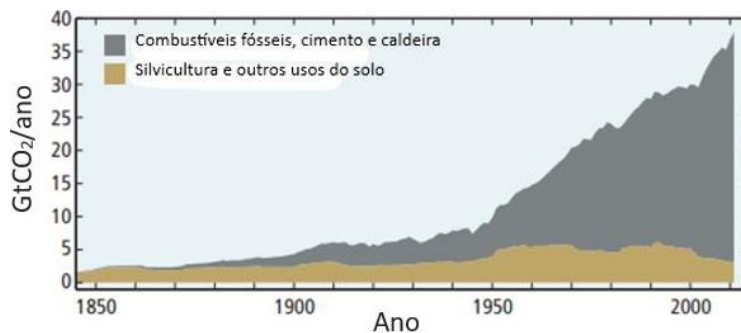
(a) Anomalia global da temperatura média da superfície terrestre e oceânica combinada



(b) Média global da variação do nível do mar



(c) Média global das concentrações de gases de efeito estufa

(d) Emissões globais de CO₂

Fonte: IPCC (2014)

O gráfico da Figura 5.a ilustra como cada uma das últimas três décadas têm sido sucessivamente mais quentes desde 1850 – pós revolução industrial. Os múltiplos conjuntos de dados médios globais de temperatura terrestre e oceânica, produzidos independentemente (diferentes cores) e calculados por uma tendência linear, mostram um aquecimento de 0,85 (0,65 a 1,06) °C durante o período de 1880 a 2012 (IPCC, 2014). Com relação aos oceanos, o aquecimento é maior perto da superfície. Segundo os dados do AR5 (IPCC, 2014), com diferentes séries de dados, estima-se que os 75 metros superiores tenham sido aquecidos em torno de 0,11 (0,09 a 0,13) °C por década ao longo de 1971 a 2010. Consequentemente, este fato fez com que o nível do mar venha aumentado a cada ano, como pode-se observar na Figura 5.b.

Por meio das Figuras 5.c e 5.d, os dados de emissões de gases de efeito estufa do AR5 (IPCC, 2014) evidenciam a relação entre o aumento da temperatura global e do nível do mar com as emissões decorrentes das ações humanas. Observa-se que os quatro gráficos possuem inclinações (coeficiente angular) semelhantes, o que justifica as preocupações com emissões de gases de efeito estufa fortemente abordadas pelo IPCC e por uma extensa bibliografia científica.

A Conferência das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas, também chamada Conferência de Copenhague ou COP15, realizada em 2009, estabeleceu que deveriam ser realizados esforços mundiais para reduções de gases de efeito estufa com intuito de não se superar um aumento da temperatura em 2 °C acima dos níveis do período pré-industrial. Esta seria uma medida para se manter um nível de segurança global em relação às mudanças no clima. Já na conferência de 2015 (COP21), além do limite dos 2 °C, estabeleceu-se que se deve evitar um aumento de 1,5 °C, número este já alarmante para o planeta (IPCC, 2018; MONTES, 2016). Na conferência do clima mais recente, realizada em 2019, a COP25 (UNFCCC, 2019) demonstrou avanço mínimo nas ações climáticas, distante de atender à urgência climática reivindicada pelo IPCC e demais organizações internacionais. No evento, concordou-se em pedir aos países que aumentem suas metas para reduzir as emissões de gases de efeito estufa em 2020, medida tida como fundamental para conter o aquecimento a menos de 2 °C, porém não se apontou contundência nas medidas necessárias.

Em um dos seus documentos recentes, em uma série especial atemporal aos relatórios de avaliação (AR), o IPCC (IPCC, 2018) apresenta o quão perto se está de 1,5 °C de aumento na temperatura, expondo previsões e riscos associados a este número. O IPCC (2018) estima que as atividades humanas tenham causado aproximadamente 1,0 (0,8 a 1,2) °C de aquecimento global em relação aos níveis pré-industriais, e prevê, com alto nível de confiança, que a anomalia de temperatura atinja 1,5 °C entre 2030 e 2052, considerando os atuais padrões de

aumento nas emissões. A partir disso, os impactos na saúde, serviços, infraestrutura, economia, entre outros, podem afetar um longo período, ou mesmo ser irreversíveis, conduzindo à perda de ecossistemas, por exemplo (IPCC, 2018).

2.1.2 Cenários Climáticos Futuros

Primeiramente, deve-se entender que as análises e previsões para os cenários climáticos futuros são relativas a diferentes períodos. Segundo o IPCC (IPCC, 2014), isto é necessário para colocar tais projeções no contexto histórico. Como se pôde observar nos dados das Figuras 1 e 2, por exemplo, a NASA calcula a anomalia de temperatura em relação à temperatura média no período 1951-1980, tido como um período base apropriado, porque a temperatura global era relativamente estável e ainda dentro da faixa à qual os seres terrestres estão adaptados (HANSEN; SATO; RUEDY, 2012). Por outro lado, geralmente, as projeções dos relatórios de avaliação do IPCC são para o final do século 21 (2081-2100), em relação a 1986-2005, porém, não se restringindo a este período (IPCC, 2014). Ademais, no quinto relatório, o aumento na temperatura global observado foi calculado a partir da média de 1986-2005 menos a média de 1850-1900, considerando o conjunto de dados *Hadley Centre Research Unit Temperature – fourth version* (HadCRUT4) (MORICE et al., 2012), que era o único conjunto de dados combinado de temperatura global terrestre e oceânica disponível (HAWKINS et al., 2017). O período 1986-2005, caracterizado como período moderno, foi definido com base nas simulações, que exigiam uma *baseline* de referência recente para as projeções climáticas futuras (HAWKINS; SUTTON, 2016; HAWKINS et al., 2017).

O IPCC define possíveis cenários futuros de desenvolvimento, avaliando ainda alternativas de mitigação ou adaptação. Os cenários de mudanças climáticas, produzidos desde 1990, são modelados utilizando possíveis panoramas de emissões de gases de efeito estufa. O primeiro relatório de avaliação (AR1) foi publicado em 1990, o segundo (AR2) em 1996, o terceiro (AR3) em 2001, o quarto (AR4) em 2007, o quinto (AR5) em 2014, enquanto o sexto (AR6) está previsto para 2021. Os relatórios AR3 e AR4 do IPCC utilizavam ainda cenários de um Relatório Especial em Cenários de Emissão (SRES) desenvolvido em 1996, enquanto o relatório mais recente (AR5) utiliza um novo conjunto de cenários desenvolvido pela comunidade científica (IPCC, 2014).

Os diferentes cenários dos SRES, nas hipóteses de emissões, levam em consideração alternativas de evolução demográfica, econômica e tecnológica. Estes cenários foram divididos em quatro linhas de evolução, criando quatro “famílias”: A1, A2, B1 e B2, em que de cada uma

saem grupos de cenários com diferentes características. Assim, da família A1, saem três grupos de cenários (A1F1, A1B e A1T) com diferentes características de desenvolvimento energético; e das famílias A2, B1 e B2 sai um único grupo de cenário de cada uma. Em síntese, cada família e grupo de cenários consideram hipóteses em relação à população global, produto mundial bruto e energia final (IPCC, 2007).

No quinto relatório (AR5) do IPCC, o conjunto de cenários é denominado Patamares de Concentração Representativos (RCP), baseado em emissões e concentrações de gases de efeito estufa e poluentes atmosféricos e uso do solo (IPCC, 2014). Os cenários do atual AR foram desenvolvidos pela comunidade científica, ficando o IPCC encarregado de avaliá-los e analisá-los. O relatório foi desenvolvido a partir de quatro RCP's elaborados em função do seu caminho de força radioativa². No Quadro 1, apresentam-se os quatro cenários previstos, associados às anomalias de temperatura esperadas.

Quadro 1 – Resumo dos RCP's apresentados no IPCC AR5

Cenário	Forçamento radiativo até 2100 [W/m ²]	Anomalia* de temperatura provável de 2081 a 2100 [°C]	Descrição
RCP2.6	2,6	1,0 (0,3 a 1,7)	Cenário de mitigação rigoroso. Pico na força radioativa, com declínio antes de 2050; único que manteria o aquecimento global abaixo** de 2 °C.
RCP4.5	4,5	1,8 (1,1 a 2,6)	Cenário de mitigação intermediário. Estabilização da força radioativa em 4,5 W/m ² após 2100; prevê-se que o aquecimento global exceda** 1,5 °C.
RCP6.0	6,0	2,2 (1,4 a 3,1)	Cenário de mitigação intermediário. Estabilização da força radioativa em 6,0 W/m ² após 2100; prevê-se que o aquecimento global exceda** 1,5 °C.
RCP8.5	8,5	3,7 (2,6 a 4,8)	Cenário com emissões elevadas. Crescente da força radioativa, alcançando 8,5 W/m ² em 2100; prevê-se que o aquecimento global exceda** 1,5 °C.

* Em relação a 1986-2005

** Em relação a 1850-1900

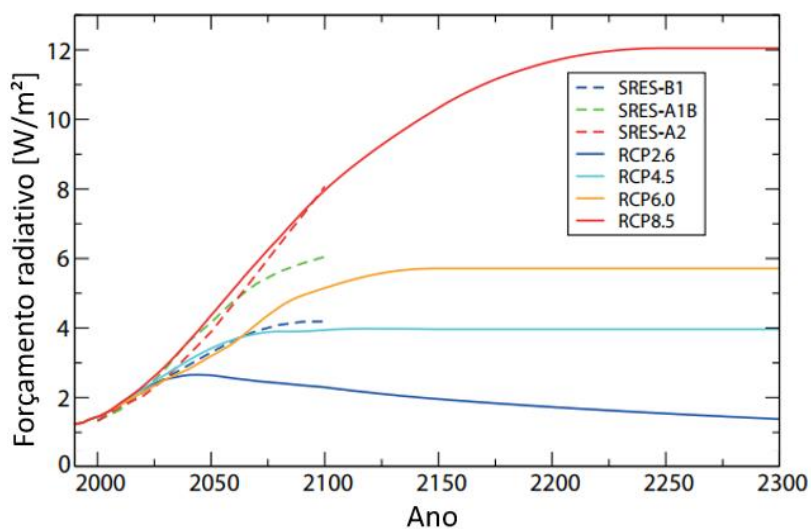
Fonte: o autor; elaborado com dados de IPCC (2014)

² Segundo o IPCC (IPCC, 2014), força radiativa é uma medida das emissões humanas de gases de efeito estufa, em Watts por metro quadrado (W/m²). A energia solar recebida pelo planeta é equilibrada pela radiação terrestre devolvida, e uma mudança no equilíbrio entre a radiação de entrada e saída para a atmosfera pode afetar o clima – essa alteração na energia disponível para o sistema global Terra/atmosfera é denominada forçamento radiativo.

Em relação aos cenários SRES, os cenários RCP's apresentam como vantagem a abrangência de uma gama maior de possibilidades baseadas em revisões bibliográficas para concentrações atmosféricas de gases de efeito estufa, e não associadas à processos socioeconômicos (CGEE, 2014; JUBB; CANADELL; DIX, 2016). Segundo Jubb, Canadell e Dix (2016), isto é importante porque cada etapa de modelagem, desde um cenário socioeconômico até os impactos da mudança climática, adiciona incerteza. Logo, ao começar com as concentrações, há menos etapas e, portanto, menos incerteza cumulativa. Assim sendo, entende-se que a incerteza é compartilhada de forma mais uniforme entre os vários componentes.

Embora não exista uma correspondência direta entre as duas metodologias (SRES e RCP) para cenários futuros, pode-se fazer uma comparação da variação de aumento da temperatura no futuro, segundo ilustra-se na Figura 6.

Figura 6 – Evolução do forçamento radioativo total, em relação ao período pré-industrial (1765), para os cenários SRES e RCP



Fonte: o autor; adaptado de IPCC (2014)

O cenário SRES-A2, equivalente ao cenário RCP8.5, caracterizado por um mundo de nações independentes e autossuficientes (NEMATCHOUA; OROSA; REITER, 2019), é considerado o que mais representa a tendência atual no mundo, compatível com os padrões de emissões elevadas (TRIANA; LAMBERTS; SASSI, 2018), e vem sendo utilizado em pesquisas do comportamento de edificações em anos futuros.

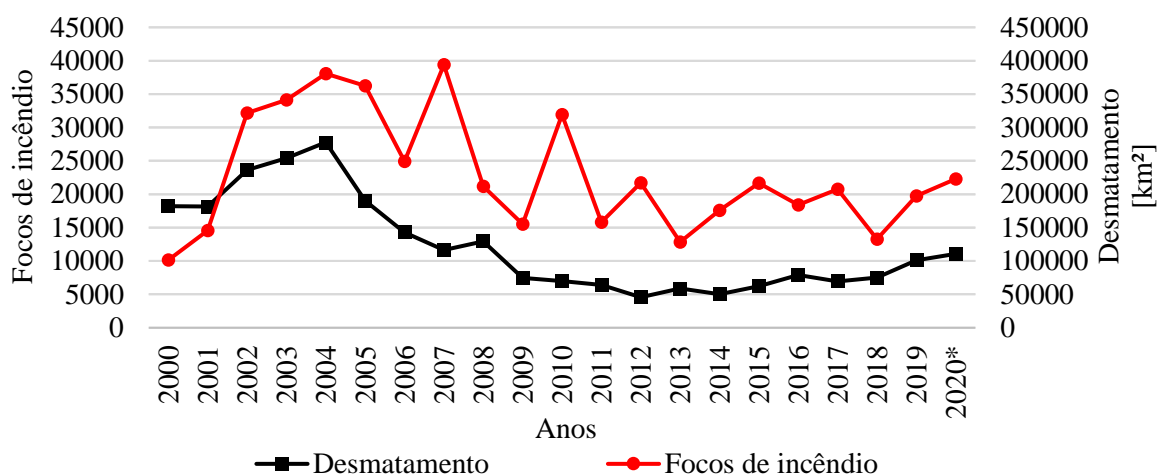
2.1.3 Panorama no Brasil

Em 2006, o Ministério do Meio Ambiente, por meio de Marengo (2006), publicou um dos primeiros estudos sobre as mudanças climáticas no Brasil, com aprofundamento nas regiões Amazônia, Pantanal, Nordeste e bacia do Paraná-Prata. Verificou-se elevação da temperatura em todas as regiões, sendo que as maiores taxas de aquecimento foram observadas na floresta amazônica e as menores no litoral da região Sudeste (MARENGO, 2006). Destaca-se que para projeções futuras, foram utilizados modelos climáticos do terceiro relatório (AR3) do IPCC (IPCC, 2001).

No ano de 2009 foi criado o Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (PBMC), um órgão científico nacional que reúne, sintetiza e avalia informações sobre as mudanças climáticas no Brasil por meio de publicação de Relatórios de Avaliação Nacional (PBMC, 2020). O primeiro Relatório de Avaliação Nacional sobre Mudanças Climáticas (RAN1) (PBMC, 2013) foi publicado em 2013. Os resultados do estudo condizem com as projeções do IPCC, demonstrando que a tendência é o aumento da temperatura em todo o Brasil (PBMC, 2013; MARENGO, 2014; MONTES, 2016). Mais recentemente, em 2016, o PBMC publicou um relatório especial, denominado “Mudanças Climáticas e Cidades” (PBMC, 2016), onde se apresenta impactos esperados em cidades brasileiras, assim como vulnerabilidades urbanas relacionadas à saúde, ecossistemas, zonas costeiras, edificações, transportes, energia, água, saneamento e resíduos sólidos. O relatório aponta que a resiliência das edificações são um ponto chave para alternativas de adaptação e mitigação – especialmente redução de gases de efeito estufa – frente ao contexto climático nacional.

O Brasil, como a maioria das nações, concordou em diminuir as emissões de gases de efeito estufa como medida de mitigação dos efeitos das mudanças climáticas, conforme o Acordo de Paris (UN, 2015), que entrou em vigor em 2016. Nesse sentido, segundo o Relatório Anual da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (UNFCCC) de 2019 (UNFCCC, 2019), de 2014 a 2017, o Brasil, junto com a Colômbia, Equador e Malásia, contribuiu com a prevenção da emissão de 6,3 giga toneladas de dióxido de carbono (equivalente à emissão dos Estados Unidos em 2016), demonstrando a relevância de políticas públicas para medidas de conservação ambiental. No entanto, os anos de 2019 e 2020 trouxeram números que sinalizam alerta para a preocupação ambiental brasileira, indicando retrocesso, conforme dados do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) ilustrados na Figura 7.

Figura 7 – Histórico de desmatamento e focos de incêndio registrados no Brasil desde 2000



* os dados de desmatamento em 2020 são uma estimativa; a taxa consolidada será apresentada em 2021.

Fonte: o autor; elaborado com dados de INPE (2021a) e INPE (2021b)

De acordo com os estudos realizados pelo INPE, por meio do Programa de Cálculo do Desflorestamento da Amazônia (PRODES), projeto que realiza o monitoramento do desmatamento da Floresta Amazônica brasileira por satélite, em 2019 a taxa de desmatamento da Amazônia Legal subiu para 10.129 km², representando um aumento de 34% em relação a 2018 e alcançando o pior índice nos últimos 11 anos (INPE, 2021a). A estimativa para 2020 aponta que este índice será superado, subindo para 11.088 km². A taxa de desmatamento consolidada de 2020 será apresentada no primeiro semestre de 2021, quando o processamento dos dados de satélite for completado (INPE, 2020). Os aumentos citados estão diretamente associados aos focos de incêndios registrados no Brasil em 2019 e 2020. Os cientistas do INPE, por meio do Programa Queimadas, registraram 197.632 incêndios no país, durante 2019, e 222.798 incêndios, durante 2020. Em relação à 2018, o aumento em 2019 foi de 49%, e, em relação à 2019, o aumento em 2020 foi de 13% (INPE, 2021b). Nesse sentido, pode-se citar, ainda, recordes de calor no Brasil, como o caso de Cuiabá, que, em 30 de setembro de 2020, registrou sua maior temperatura em 109 anos de medições, alcançando 44 °C, segundo o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2020).

Diante deste cenário, é notória a relevância de políticas públicas com vistas às medidas ambientais necessárias. Hewawasam e Matsui (2019) discutem essa questão, a partir de estudo do histórico de desenvolvimento de políticas públicas sobre mudanças climáticas no Sri Lanka. Os autores afirmam que foram necessários 16 anos para o país estabelecer um mecanismo institucional relativamente forte no tema, e que isso foi possível graças às medidas alinhadas com a UNFCCC e demais organizações, que foram fundamentais para o país ser ligado às fontes

financeiras e de informações mais amplas, bem como a sintonia com o meio acadêmico qualificado.

Além disso, segundo Solaun e Cerdá (2019), as matrizes energéticas são um ponto crítico para as alterações no clima, sendo que o uso de energias renováveis no mundo terá que aumentar de 17%, em 2017, para 65%, em 2050, para se evitar a elevação de 2 °C na temperatura global (IRENA, 2018). O Brasil possui uma matriz energética relativamente limpa, porém, as alterações no clima farão com que sejam necessárias novas providências em outras fontes de energia, ao passo que a geração hidrelétrica nacional sofrerá transformações, devido às precipitações pluviométricas reduzidas no futuro (IPCC, 2014; LUCENA et al., 2018; QUEIROZ et al., 2019). Por outro lado, há grande expectativa de aumento na geração eólica, principalmente, no Brasil, uma vez que as pesquisas apontam que esse tipo de fonte energética deve aumentar até 20% até o final do século (GONÇALVES; RODRIGUES; CHAGAS, 2020; IPCC, 2014; LUCENA et al. 2010; PEREIRA et al., 2013; SOLAUN; CERDÁ, 2019).

Vital (2018) afirma que a engenharia climática do Brasil já possui marcos regulatórios (Lei 12.651/2012, instituiu o Novo Código Florestal; Lei 12.187/2009, instituiu a Política Nacional sobre Mudança do Clima; e Lei 12.305/2010, instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos) suficientes para controlar as emissões de poluentes, carecendo, porém, seu cumprimento efetivo a fim de se evitar mudanças no clima. Além do mais, destaca-se que o Brasil, devido à sua biodiversidade de algas marinhas, área e potencial florestal (Amazônia), bem como outros fatores naturais, possui potencial para garantir fluxo financeiro para investimentos em projetos que removam o CO₂ da Terra, se tornando um dos maiores credores de carbono do mundo (KRUG et al., 2019; VITAL, 2018). Em arremate, Krug et al. (2019) estabelece que não existe uma obsessão pelo CO₂, mas existe sim sua relevância para as mudanças no clima e no balanço energético do planeta e, desta forma, ações para reduções de gases de efeito estufa oferecem oportunidades comerciais e ambientais para o Brasil.

2.2 INFLUÊNCIA DO DESEMPENHO TERMOENERGÉTICO DAS EDIFICAÇÕES NAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

De acordo com Barbirato, Souza e Torres (2007), desde a Pré-história o ser humano altera o ambiente construído e natural para criar condições de habitabilidade. Estima-se que até meados do século XX, a concepção de uma habitação considerava, obrigatoriamente, as características do clima local, uma vez que meios artificiais de condicionamento ambiental não existiam. Posteriormente, com a evolução tecnológica decorrente da Revolução Industrial, a

utilização de equipamentos capazes de satisfazer as necessidades habitacionais humanas se tornaram possíveis. Nesse aspecto, porém, as definições projetuais e o desenvolvimento de tecnologias construtivas ainda devem levar em consideração as condições ambientais dos ocupantes da edificação.

As altas temperaturas das cidades influenciam no conforto térmico do usuário e, conseqüentemente, no consumo de energia elétrica para condicionamento das edificações. Logo, o conhecimento das variáveis que condicionam o desempenho termoenergético de uma edificação é valioso para a concepção do projeto. Os espaços devem atenuar a sensação de desconforto imposta pelas condições climáticas externas e proporcionar ambientes favoráveis (BARBIRATO; SOUZA; TORRES, 2007). Silva, Almeida e Ghisi (2017) citam como variáveis projetuais o clima, a geometria, as propriedades termofísicas dos materiais e componentes de construção, e a orientação solar, dentre outras.

A envoltória tem papel fundamental na transferência de calor. Uma vedação termicamente eficiente pode ser definida como aquela que propicia conforto térmico ambiental com o menor consumo de energia para condicionamento interno (ASHRAE, 2004; BARRIOS et al., 2012). Ademais, a envoltória é o principal contribuinte para a demanda de energia e para as condições de conforto para o usuário (BATISTA et al., 2011; EICKER, 2014; LOPES et al., 2018; ZHU et al., 2009). A utilização inadequada de materiais para vedação implica diretamente em ganho ou perda de calor desnecessário, acarretando, assim, no uso de sistemas ativos de condicionamento que, conseqüentemente, geram consumos dispensáveis de eletricidade. Segundo Lamberts, Dutra e Pereira (2014), as características da envoltória de uma edificação, bem como a necessidade de condicionamento artificial, estão diretamente associadas ao consumo e eletricidade.

A norma NBR 15220 (ABNT, 2005) foi a precursora na preocupação com o bem-estar ambiental nas edificações brasileiras. A referida norma foi um marco importante para a construção civil brasileira, uma vez que auxiliou no desenvolvimento de concepções projetuais adequadas para diferentes condições climáticas. Já a norma NBR 15575 (ABNT, 2013), conhecida como “norma de desempenho”, estabelece diretrizes que visam atender os requisitos dos usuários em sistemas construtivos que compõem edificações habitacionais. A referida norma estabelece requisitos de desempenho gerais (implantação, saúde, higiene e qualidade ar), estrutural, térmico, acústico, lumínico, conforto tátil e antropodinâmico, funcionalidade e acessibilidade, estanqueidade, durabilidade, segurança contra incêndio, segurança no uso e operação, e manutenibilidade da edificação. Por fim, embora não seja especificamente uma norma, sendo ainda de adesão voluntária, o regulamento brasileiro de etiquetagem energética

(BRASIL, 2012a; BRASIL, 2012b) também configura um documento que busca assegurar desempenho satisfatório às construções, a partir de pré-requisitos e parâmetros para a classificação de edificações com vistas à eficiência energética.

O sistema construtivo está diretamente associado ao desempenho térmico e energético das habitações, uma vez que as propriedades termofísicas destes são determinantes para o desempenho do ambiente construído. Conforme Asdrubali et al. (2017), o comportamento térmico do envelope é definido por características tais como densidade, capacidade térmica e condutividade térmica dos materiais. Estes, configuram parâmetros como transmitância e inércia térmica dos elementos construtivos. Nesse âmbito, pesquisas como Almeida (2014), Mechri, Capozzoli e Corrado (2010), Silva e Ghisi (2013), Silva, Almeida e Ghisi (2016) e Zara (2019), investigaram a influência de variáveis projetuais e propriedades termofísicas das edificações. Observou-se nos estudos que, geralmente, parâmetros como a absorvância solar, transmitância térmica, emissividade, área e sombreamento de aberturas e orientação solar são investigados, sendo identificado que a influência de cada parâmetro varia, de acordo com o critério de desempenho (consumo para aquecimento, consumo para refrigeração, entre outros), as características construtivas e o clima analisado (ALMEIDA, 2014; MECHRI; CAPOZZOLI; CORRADO, 2010; SILVA; GHISI, 2013; ZARA, 2019).

O problema energético e ambiental, bem como normativas e diretrizes decorrentes são fatores que conduzem o crescente interesse em empregar estratégias e materiais energeticamente mais eficientes nas construções. No Brasil, sistemas mais tradicionais, como a alvenaria de tijolos cerâmicos e alvenaria estrutural de blocos de concreto, são os que possuem maior uso (MARINOSKI, 2011; MOLINA; CALIL JÚNIOR, 2010, NICHELE, 2014). Contudo, pesquisas apontam que estes sistemas construtivos apresentam baixo desempenho térmico para diferentes climas brasileiros e, muitas vezes, sequer atendem a norma de desempenho, NBR 15575 (ABNT, 2013) (MARAFON et al., 2014; SORGATO et al., 2014; BODACH; HAMHABER, 2010).

A utilização de estratégias, bem como novas tecnologias construtivas, possibilita condições para melhorar o desempenho termoenergético das habitações, a partir de características como baixa transmitância térmica, por exemplo. Nesse contexto, um dos materiais que se destaca é a madeira (ASDRUBALI et al., 2017). A aplicação de sistemas construtivos em madeira caracteriza uma prática ecológica promissora para edificações sustentáveis de baixo impacto ambiental (UPTON et al., 2008; MONTEIRO et al., 2012; BARRIOS et al., 2012; NUNES et al., 2020). Além do mais, o material exhibe vantagens termoenergéticas, melhorando as condições de conforto interno com praticidade

(MOLDOVAN; DRAGOS, 2015). Em aspectos ambientais e sustentáveis, a madeira se mostra como material fortemente recomendado como alternativa ao aço e concreto, ao passo que possibilitam diminuição de emissões de CO₂ no ciclo de vida das habitações (UPTON et al., 2008). O material envolve sistemas construtivos recentes e inovadores, como o *Glued Laminated Timber* (GLULAM) e o *Cross-laminated Timber* (CLT ou X-LAM), com características de madeira em massa (BERNHEIMER, 2015; HURMEKOSKI; JONSSON; NORD, 2015). Asdrubali et al. (2017) alegam que o CLT representa a evolução mais vantajosa da madeira, sendo uma forte alternativa à sistemas construtivos convencionais para habitações com melhor desempenho termoenergético. Adicionalmente, construções de madeira em massa vêm atraindo interesses mundiais, com utilização crescente devido às vantagens como redução de tempo de obra, redução de desperdícios e redução de emissões de gases de efeito estufa (apresentam baixo potencial de aquecimento global) (ASDRUBALI et al., 2017; LEHMANN, 2013; LOPES et al., 2018; RAMAGE et al., 2017; SETTER et al., 2019).

Em arremate, percebe-se que identificar a influência das características construtivas no desempenho termoenergético do ambiente construído e estudar alternativas de desempenho é importante para se estabelecer soluções de arquitetura e engenharia que sejam eficazes no decorrer da vida útil das edificações.

2.2.1 Eficiência Energética em Edificações

Problemas ambientais e energéticos deram início às preocupações mundiais acerca do consumo de energia nas edificações. Segundo Brasil (2011, p. 1), o termo ‘eficiência energética’ pode ser caracterizado como “ações de diversas naturezas que culminam na redução de energia necessária para atender as demandas da sociedade por serviços de energia sob a forma de luz, calor/frio, acionamento, transportes e uso em processos”.

A eficiência energética caracteriza-se como um dos pontos críticos para o desenvolvimento sustentável. O tema consiste, principalmente, em propor a redução do consumo de energia elétrica a partir do aproveitamento e aumento da eficiência de equipamentos e edificações (TONIN, 2016). Nesse sentido, com intuito de assegurar construções energeticamente mais eficientes no país, o Programa Brasileiro de Etiquetagem, por meio do Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (RTQ-R) (BRASIL, 2012a) e do Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas (RTQ-C) (BRASIL, 2012b), apresenta parâmetros para análise energética de construções nacionais,

classificando as edificações de níveis mais eficientes (nível A) a menos eficientes (nível E). Segundo Olinger et al. (2019), desde 2012 o RTQ-R e o RTQ-C passam por avaliações de melhoria e, mais recentemente, uma proposta que está em análise é a alteração dos nomes para Instrução Normativa Inmetro para Classe de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (INI-R) (CB3E, 2018) e Instrução Normativa Inmetro para Classe de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas (INI-C) (CB3E, 2017). As propostas visam aperfeiçoamento nos métodos de avaliação, buscando aproximar ainda mais os resultados da avaliação do consumo real das edificações.

Para Presznhuk (2005), a eficiência energética de uma edificação está associada às variáveis humanas, climáticas e arquitetônicas. Segundo o autor, considerando tais variáveis é possível oferecer ao usuário um ambiente com condições de conforto satisfatórias, empregando sistemas naturais, artificiais ou integração entre estes dois. Assaf e Nour (2015) afirmam que a partir da utilização de estratégias de eficiência energética pode-se alcançar economia de energia de até 38% em edificações, apesar deste número ser relativo, uma vez que outros estudos alcançam percentuais até maiores.

Conforme Williams (2012), o clima é uma variável que pode apresentar maior influência sobre o comportamento termoenergético das edificações. Nesse seguimento, o relatório especial do PBMC (PBMC, 2016), categoriza que as preocupações mais tangíveis envolvendo o clima e a infraestrutura das cidades estão relacionadas às edificações, no que diz respeito ao aquecimento global e o conforto térmico. Estudos antigos (BELZER; SCOTT; SANDS, 1996; ROSENTHAL, GRUENSPECHT; MORAN, 1995; SCOTT; WRENCH; HADLEY, 1994) já avaliavam a influência das mudanças climáticas no desempenho termoenergético das edificações, sendo que mais recentemente as pesquisas sobre o tema têm crescido cada vez mais.

Em um âmbito de debates mundiais acerca de problemas e soluções climáticas, segundo estudo da Agência Internacional de Energia (IEA), com eficiência energética, as edificações possuem potencial para economizar 28% da previsão de aumento do consumo final de energia para o período de 2012 a 2040, considerando um cenário de mundo eficiente (IEA, 2018). Segundo Rosenzweig et al. (2011), o ambiente construído, bem como todo o sistema urbano, contribui para as emissões de gases de efeito estufa e podem potencializar impactos no clima. Nesse sentido, McKinsey & Company (2009a) alegam que, tamanho o potencial de redução de emissões de gases de efeito estufa pelas edificações no mundo, seria suficiente para conter o aquecimento global abaixo dos 2 °C (IPCC, 2007). Especificamente no Brasil, as edificações

possuem, a partir de medidas de eficiência energética, potencial para reduzir 24% das emissões até 2030 (MCKINSEY & COMPANY, 2009b).

As alterações climáticas nas cidades, que devem apresentar maiores temperaturas ao longo do dia e da noite, influenciam na qualidade de vida dos usuários (PBMC, 2016). Isto posto, revisões nos projetos das habitações, contemplando avaliações de desempenho térmico, são requeridas. Dascalaki et al. (2011) recomendam usar edificações com diferentes características construtivas para se avaliar o desempenho energético de grupos de habitações, moradias individuais ou analisar cenários com estratégias de eficiência energética.

Medidas de eficiência energética são elementares para a potencial redução do consumo de energia em edificações, e diante do exposto, entende-se que a consideração da influência das mudanças climáticas no comportamento termoenergético das edificações brasileiras são de extrema importância para o provimento de habitações energeticamente eficientes durante toda sua vida útil.

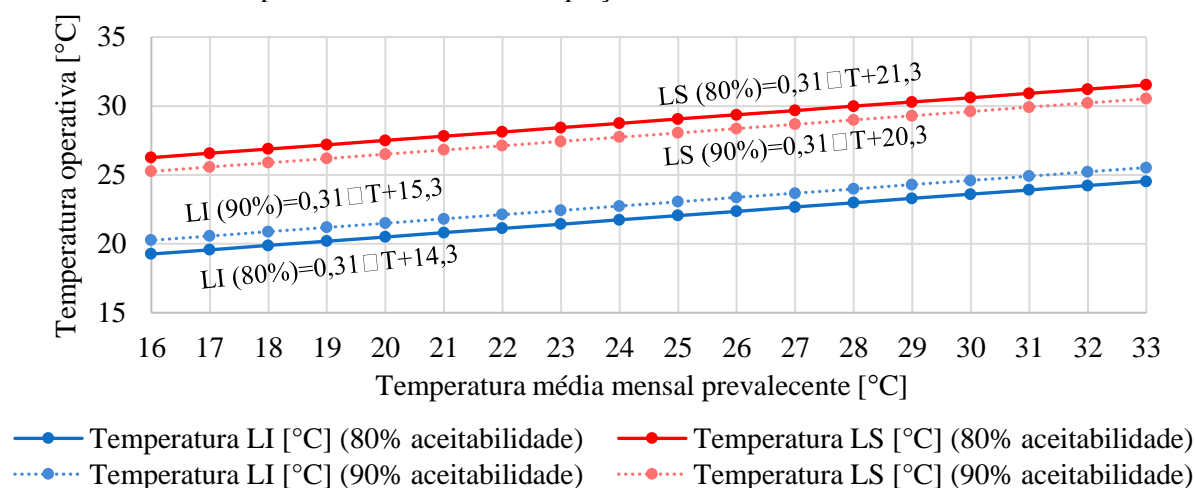
2.2.2 Conforto Térmico do Usuário

Segundo Frota e Schiffer (2003), o homem altera as condições climáticas durante o processo de construção das cidades, e, segundo o PBMC (2016), um dos principais fatores que envolve as mudanças no clima e as habitações é a questão do conforto térmico do usuário. O fato é que, independentemente das condições externas, as edificações devem proporcionar conforto aos usuários, oferecendo melhores condições de vida e de saúde. Um dos principais requisitos para que os ambientes apresentem o melhor nível de habitabilidade é o conforto térmico (BARBIRATO; SOUZA; TORRES, 2007). Pode-se definir que a sensação de conforto térmico ocorre quando as trocas de calor entre o corpo humano e o ambiente ocorrem sem maior esforço, proporcionando satisfação ao usuário (MANZANO-AGUGLIARO et al., 2015; CORBELLA; CORNER, 2011; FROTA; SCHIFFER, 2003).

No Brasil, embora esteja em andamento uma proposta de parâmetros de conforto térmico, inserido no projeto de revisão da NBR 16401-2 (ABNT/CB-055, 2017), ainda não existem normas em vigor que tratam especificamente do conforto térmico dos usuários de edificações. Dessa maneira, a *Standard 55* (ASHRAE, 2017a) apresenta-se como principal referência, sendo largamente utilizada em pesquisas acerca do tema. Além disso, segundo Montes (2016), a referida norma da Sociedade Americana de Engenheiros de Aquecimento, Refrigeração e Ar Condicionado, é uma das mais atualizadas hoje em dia, estabelecendo métodos de avaliação das condições de conforto térmico em ambientes naturalmente ventilados

e em ambientes artificialmente condicionados. O método para ambientes naturalmente ventilados é baseado no modelo adaptativo de De Dear e Brager (1998), onde as temperaturas operativas aceitáveis relacionam-se com às médias das temperaturas do ar externo. A norma também preconiza que espaços com condicionamento híbrido, ou seja, ora natural, ora artificial, sejam avaliados conforme o método para ambientes com ventilação natural. De acordo com a *Standard 55* (ASHRAE, 2017a), os ambientes devem ser analisados por meio de faixas de intervalos de conforto para 80% ou 90% de aceitabilidade pelos usuários. Os limites de temperatura superior e inferior são determinados a partir da temperatura média mensal prevalecente do ar externo, conforme se apresenta na Figura 8.

Figura 8 – Limites de conforto térmico adaptativo em função da temperatura média mensal prevalecente, conforme equações do modelo *Standard 55*



Nota: LI significa limite inferior e LS significa limite superior.

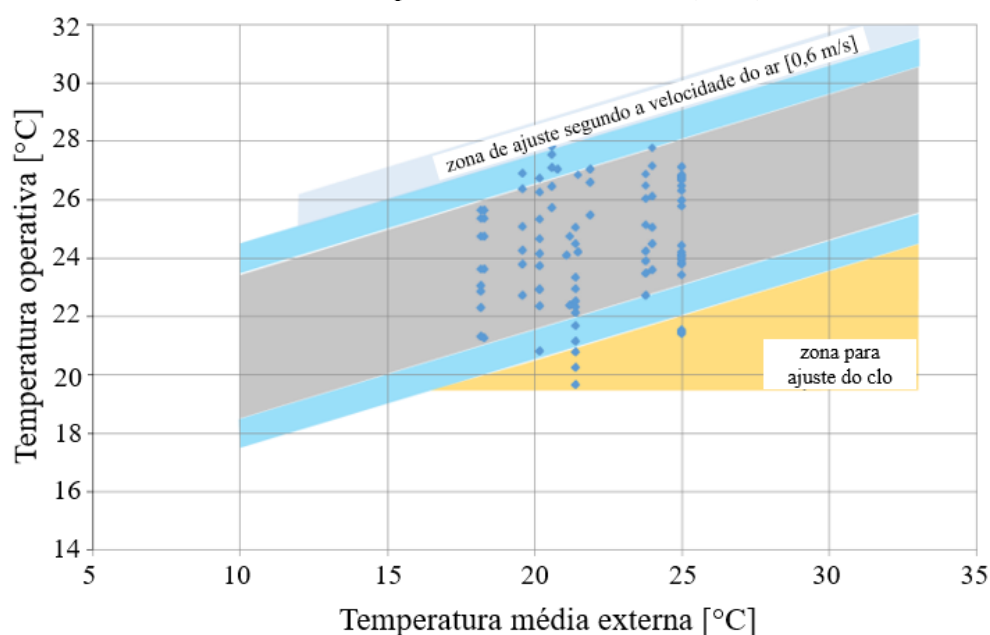
Fonte: o autor; elaborado com dados de ASHRAE (2017a)

Para o intervalo ilustrado na Figura 8, a norma americana admite que os ocupantes tenham o metabolismo entre 1,0 e 1,3 met e adaptação da vestimenta de 0,5 a 1,0 clo. Além disso, destaca-se que, para a validade do método, a temperatura exterior média predominante deve ser superior à 10 °C e inferior à 33,5 °C. A ASHRAE (2017a) define ainda que, caso a temperatura operativa seja maior do que 25 °C, é permitido aumentar o limite superior em: 1,2 °C, assegurando velocidade média do ar de 0,6 m/s; 1,8 °C, assegurando velocidade média do ar de 0,9 m/s; ou 2,2 °C, assegurando velocidade média do ar de 1,2 m/s.

Na pesquisa de De Vecchi et al. (2014), avaliou-se a aplicabilidade do método de conforto adaptativo da *Standard 55* em edificações comerciais situadas nas zonas bioclimáticas 3 e 5 da NBR 15220 (ABNT, 2005). Com base em experimentos de campo com 2.292 votos observados em De Vecchi et al. (2011), De Vecchi et al. (2014) propuseram uma adaptação no

limite inferior de temperatura para a zona de conforto, ampliando a aceitabilidade para até 19,5 °C, uma vez que fora identificado que em situação de desconforto por frio o usuário costuma vestir sua roupa (clo), tendo 19,5 °C como uma temperatura operativa aceitável. Essa mesma ideia de adaptação pode ser encontrada na proposta de parâmetros brasileiros de conforto térmico, inserido no projeto de revisão da NBR 16401-2 (ABNT/CB-055, 2017). Na Figura 9 apresenta-se a ampliação da faixa de conforto para a condição brasileira, proposta por De Vecchi et al. (2014).

Figura 9 – Proposta de alteração da faixa de conforto térmico, a partir de dados de aceitabilidade térmica do experimento de De Vecchi (2011)



Fonte: o autor; adaptado de De Vecchi et al. (2014)

Embora utilizada em várias pesquisas que investigam o conforto térmico residencial, cabe relatar que a *Standard 55* da ASHRAE foi desenvolvida com propósito de aplicação em edificações comerciais. Por conseguinte, alguns estudos investigam temperaturas razoáveis para a sensação de conforto térmico em edificações residenciais.

Peeters et al. (2009) estudaram faixas aceitáveis de temperatura e conforto térmico para serem empregadas em simulações residenciais no clima belga. Com base em revisão bibliográfica e, sobretudo, utilizando como referência a análise de 39 casas belgas, os autores definiram diferentes limites de temperatura para as zonas ocupadas, divididas em dois tipos: dormitórios e banheiro e outros ambientes. Segundo a investigação, para dormitórios, o limite inferior é 16 °C e o limite superior é 26°C; e para banheiros e outros ambientes, o limite inferior é 18°C, enquanto o limite superior pode variar de 30 °C a 31 °C.

Becker e Paciuk (2009) analisaram o conforto térmico em ambientes residenciais condicionados (*setpoint* na temperatura de 21,5 °C para inverno e 23 °C para verão) e não condicionados em Israel, observando 205 habitações no verão e 189 no inverno. Os pesquisadores identificaram que há 90% de satisfação dos usuários para os limites de 19,5 °C e 26 °C sob condições de condicionamento passivo no inverno e verão, respectivamente.

Enquanto isso, Taleghani et al. (2013) fizeram uso do método de conforto adaptativo da norma europeia EN15251 de 2007 como um indicador de desempenho, avaliando, por meio de simulações computacionais com o *Design Builder*, o uso de energia e o conforto térmico dos usuários de edificações residenciais na Holanda. Os autores visaram identificar o efeito da geometria da edificação em parâmetros como consumo energético com aquecimento, fator de luz dia, consumo energético com iluminação, perdas e ganhos de calor e horas de desconforto.

Já o estudo de Griego, Krarti e Hernández–Guerrero (2012), realizou uma análise para aprimoramento da eficiência energética de edificações residenciais, a partir da melhoria do conforto térmico interno, considerando o voto médio predito (*Predicted Mean Vote – PMV*) desenvolvido por Fanger (1972). Os autores objetivaram, por meio de simulações computacionais, apresentar soluções passivas que proporcionassem conforto térmico durante a vida útil de uma casa em Salamanca, no México. Os resultados apontaram que uma combinação de maior eficiência nos equipamentos e no sistema de aquecimento de água, e maior isolamento térmico na envoltória, são importantes para soluções baratas que resultam em economia financeira de cerca de 52%.

Nota-se, nas pesquisas relatadas, que os métodos de avaliação de conforto térmico ambiental são utilizados como parâmetros de indicadores de desempenho termoenergético. Nesse seguimento, diversos estudos, como de Bre et al. (2016), Invidiata e Ghisi (2016), Panão (2014), Silva (2016), Silva, Almeida e Ghisi (2017), Triana, Lamberts e Sassi (2018) e vários outros, utilizam um outro indicador de desempenho térmico que se pode associar ao conforto térmico: o graus-hora (MONTES, 2016). Adicionalmente, o RTQ-R (BRASIL, 2012a) também pode ser exemplificado como um tipo de análise que considera o graus-hora para avaliação (na condição de verão) do desempenho da edificação. O indicador graus-hora é dado por meio do somatório da diferença da temperatura horária em relação a uma determinada temperatura limite. Para Montes (2016), o graus-hora configura um método adequado para se investigar o desempenho térmico de habitações naturalmente ventiladas, ao passo que se pode relacionar a temperatura operativa e o conforto térmico do usuário, apresentando, além das horas de desconforto, quantos graus ultrapassam o limite em cada hora (severidade do desconforto).

Cabe, finalmente, relatar a tese de Silva (2016), que, dentre outras abordagens de pesquisa, emprega um indicador de desempenho termoenergético para avaliar o desempenho termoenergético de edificações e propor alternativas de desempenho, relacionando o conforto térmico com o consumo de energia para condicionamento ambiental. O autor, a partir dos limites propostos pela *Standard 55*, utilizou os graus-hora de aquecimento e de resfriamento para avaliar o desconforto térmico por frio e calor, respectivamente, na edificação ao longo do ano. Igualmente, o pesquisador computou o consumo de energia para suprir o desconforto térmico ambiental. Em posse desses dados, Silva (2016) relacionou os graus-horas de desconforto com o consumo de energia, em um modelo indicador equivalente de desempenho que foi utilizado para se estudar alternativas projetuais de desempenho com vistas à eficiência energética no ambiente construído.

2.2.3 Arquivos Climáticos Futuros

Para simulações computacionais de desempenho térmico e energético, grande parte dos arquivos climáticos utilizados, especialmente no Brasil, são de 1961 a 1990. Dessa forma, a análise do desempenho de edificações fica comprometida e atrai interesse de soluções que considerem condições climáticas mais condizentes com o presente e futuro (INVIDIATA; GHISI, 2016; ROBERT; KUMMERT, 2012). Robert e Kummert (2012) criticam contundentemente o fato de se empregar dados climáticos do passado para se projetar edificações energeticamente eficientes, em um presente e futuro que sofrem mudanças climáticas importantes. Os pesquisadores salientam, sobretudo, que edificações eficientes devem ser sempre projetadas por meio de simulações com dados meteorológicos de vários anos, que levem em consideração alterações no clima (ROBERT; KUMMERT, 2012).

Em uma análise abrangente, Guan (2009) afirma que existem alguns métodos para obter dados climáticos futuros, mas nem todos são viáveis. Geralmente, as abordagens envolvem estudos estatísticos e modelos climáticos globais. No Quadro 2, apresentam-se quatro abordagens investigadas por Guan (2009).

Quadro 2 – Abordagens para obtenção de dados climáticos futuros

Abordagem	Descrição	Considerações
Método estatístico de extrapolação (método graus-dia)	Consiste em extrapolar dados meteorológicos históricos para prever condições meteorológicas futuras. Como exemplo de aplicação, cita-se a previsão das tendências de consumo energético usando graus-dia, ou seja, estima-se o indicador para prever a compensação de energia para equilibrar a variação na temperatura exterior, supondo um equilíbrio para manter uma determinada temperatura interior.	A vantagem do graus-dia é que é simples e rápido. Contudo, as estimativas podem ser muito grosseiras, visto que só é apropriado se o uso da edificação e a eficiência do equipamento de HVAC forem constantes. E, ainda, o método só considera o efeito da temperatura de bulbo seco, limitando demasiadamente sua aplicação.
Método de compensação imposto (<i>morphing</i>)	Impõe a informação climática futura prevista a partir dos modelos climáticos complexos, “atualizando” os dados de um ano de referência. Tem sido muito aplicado para gerar arquivos climáticos futuros para simulações computacionais.	Dentre as vantagens, as alterações climáticas são baseadas na comunidade científica e no IPCC; dados dos anos de referência estão disponíveis; as condições meteorológicas atuais e futuras estão em uma base consistente. Dentre as limitações, seria necessária uma abordagem mais sistemática (precisão); assume-se que a temperatura horária aumenta constantemente; possíveis mudanças na insolação são ignoradas.
Modelo climático estocástico	Foram propostos por van Paassen e Luo (2002) e Adelard et al. (2000). Sugere-se que este modelo poderia gerar uma base de vários dados meteorológicos artificiais.	Devido à natureza estocástica (aleatoriedade), seria necessários dados meteorológicos ao longo de muitos anos, para se apresentar representatividade do período desejado; possui dificuldades de modelagem das variáveis climáticas.
Modelos climáticos globais	Método complexo e aprofundado, desenvolvido por meteorologistas. Leva em consideração os mecanismos de transferência de energia entre uma atmosfera tridimensional turbulenta e radioativa e superfícies espacialmente heterogêneas de terra, oceano e criosfera. Dada a natureza complexa e caótica do sistema climático global, várias aproximações e simplificações têm sido adotadas, como o modelo de circulação geral (GCM), que parece ser o mais confiável.	Requer a geração de dados meteorológicos de vários anos para encontrar um padrão meteorológico representativo para um período desejado, o que é uma tarefa difícil e cara. Além disso, as alterações nas condições meteorológicas em diferentes anos podem ser muito grandes, e, se não for definido um ano adequado para representar o período desejado, erros graves e resultados enganosos podem ser produzidos.

Fonte: o autor; elaborado a partir de Guan (2009)

De acordo com Farah et al. (2019) e Guan (2009), a abordagem do método de compensação é a mais prática e mais capaz de produzir resultados confiáveis. Nessa abordagem,

a técnica mais aceita e mais aplicada que utiliza a compensação imposta é denominada *morphing* (CASAGRANDE; ALVAREZ, 2013; FARAH et al., 2019). O método *morphing* desenvolvido por Belcher, Hacker e Powell (2005), muito aceito atualmente, se baseia em ajustar séries temporais de variáveis meteorológicas por meio de deslocamento e alongamento (MONTES, 2016; FARAH et al., 2019). Belcher, Hacker e Powell (2005) esclarecem que o método combina dados climáticos “atuais” com resultados dos modelos climáticos de circulação geral, fornecendo condições climáticas médias para cenários futuros de determinada região. Os arquivos climáticos de referência podem ser no formato *Test Reference Year* (TRY) ou *Typical Meteorological Year* (TMY); recomendando-se, ademais, o uso do período 1961-1990 como definição do “clima presente” (BELCHER; HACKER; POWELL, 2005). Para Farah et al. (2019), o método *morphing* possui como vantagem uma implementação simplificada, porém, não ajusta as temperaturas do ar máxima e mínima independentemente, impedindo ajustes diferentes para cada uma delas. Além disso, segundo os autores, a integração de eventos meteorológicos que não sejam típicos, como temperaturas extremas e ondas de calor, possuem sua integração dificultada.

Jentsch, Bahaj e James (2012) criaram a ferramenta *Climate Change World Weather File Generator* (*CCWorldWeatherGen*) – disponibilizada gratuitamente pelo Grupo de Pesquisa em Energia Sustentável (SERG) da Universidade de Southampton (UNIVERSITY OF SOUTHAMPTON, 2020) – para adaptar os arquivos *EnergyPlus Weather* (EPW) aplicando o método *morphing* desenvolvido por Belcher, Hacker e Powell (2005). Nela, os resultados dos cenários climáticos desenvolvidos no Modelo de Circulação Geral (GCM) *Hadley Centre Coupled Model version 3* (HadCM3) para o cenário SRES-A2 do IPCC, em relação ao período 1961-1990, são tidos como base (JENTSCH et al. 2013). A ferramenta *CCWorldWeatherGen*, que funciona como uma extensão para o *Microsoft Excel*, foi projetada de modo a permitir a geração de arquivos climáticos futuros para três períodos, ou *time slices*, representativos: 2020 (representa o período de 2011 a 2040), 2050 (representa o período de 2041 a 2070) e 2080 (representa o período de 2071 a 2100) para qualquer parte do mundo (JENTSCH et al., 2013). O método foi comprovado por Jentsch et al. (2013) como uma forma prática e eficaz para avaliar mudanças climáticas no ambiente construído e vem sendo utilizado em diversas pesquisas (GUARDA et al., 2020; INVIDIATA; GHISI, 2016; MONTES, 2016; TRIANA; LAMBERTS; SASSI, 2018; WANG; LIU; BROWN, 2017). Observa-se que o *CCWorldWeatherGen* considera arquivos climáticos de 1961 a 1990 para gerar arquivos climáticos futuros, e o uso de outros dados, sobretudo, mais recentes, podem superestimar os impactos das mudanças climáticas (JENTSCH et al., 2013; JENTSCH; BAHAJ; JAMES, 2012).

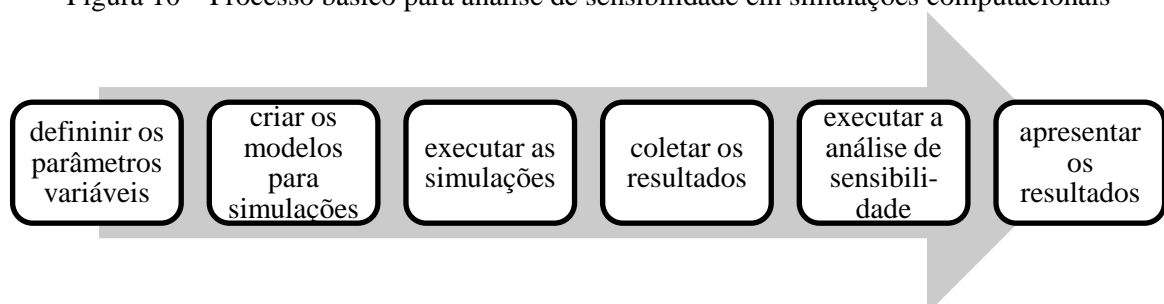
Segundo Montes (2016) e Troup e Fannon (2016), outra ferramenta desenvolvida para a obtenção de arquivos climáticos futuros é a *Weather Shift*, elaborada pela *Arup* e *Argos Analytics*. Esta ferramenta, porém, não disponibiliza dados para todos os locais do mundo e necessita uma licença privada para os arquivos climáticos. O software *Weather Shift* considera diferentes percentuais (10%, 25%, 50%, 75%, 90% e 95%), conforme funções de distribuição cumulativa, de aquecimento para os cenários RCP4.5 e RCP 8.5 do IPCC. No site do software, algumas informações de temperatura são disponibilizadas para 2035 (representa o período de 2026 a 2045), 2065 (representa o período de 2056 a 2075) e 2090 (representa o período de 2080 a 2099), todavia os arquivos climáticos para simulações são restritos à aquisição do produto.

2.2.4 Análise de Sensibilidade de Parâmetros Termofísicos

O uso da simulação computacional é importante e necessário para avaliação, entendimento e aperfeiçoamento da eficiência energética em edificações. Segundo Silva (2016), o desempenho térmico e energético depende de muitos critérios que implicam na consideração de diversas variáveis e incertezas. Nesse âmbito, em sua tese, o autor contribuiu em pesquisa onde desenvolveu um método de avaliação do comportamento termoenergético de edificação aplicando análises de incertezas e, principalmente, sensibilidade por meio de vários métodos estatísticos.

Em diversos estudos que trazem definições acerca do tema, pode-se observar que uma análise de sensibilidade em simulações computacionais consiste em investigar sistematicamente uma saída de uma simulação a partir da incerteza de valores das variáveis do modelo, com vistas a determinar variáveis importantes (quais são suas contribuições para a variável de saída) no modelo (KLEIJNEN, 1997; SALTELLI et al., 2008; SILVA, 2016; SIMLAB, 2008; TIAN, 2013). As etapas básicas para análise de sensibilidade em simulações computacionais são ilustradas na Figura 10.

Figura 10 – Processo básico para análise de sensibilidade em simulações computacionais



Fonte: o autor; adaptado de Tian (2013)

As pesquisas de Silva (2016) e Tian (2013), que trazem ricas contribuições acerca de análise de sensibilidade, mostram que os métodos de análise de sensibilidade aplicados em simulações computacionais de edificações podem ser divididos em abordagens de análise local e análise global.

A análise de sensibilidade local, ou análise de sensibilidade diferencial, é focada nos efeitos pontuais de uma variável apenas, mantendo-se as outras fixas. Esse tipo de investigação caracteriza a abordagem *one-at-a-time* (OAT), na qual um objeto do modelo é variado por vez. Devido à sua simplicidade, essa abordagem é mais facilmente aplicada e interpretada, requerendo menos execuções de simulação. Entretanto, como principais desvantagens, explora-se apenas um espaço reduzido da variável de entrada e desconsidera-se interações entre as variáveis (SALTELLI, 1999; TIAN, 2013).

Por sua vez, a análise de sensibilidade global é focada nos efeitos totais das variáveis em todo o espaço amostral do modelo, por meio de combinações simultâneas entre si, fazendo com que o método seja mais confiável. A análise de sensibilidade global inclui métodos baseados em: regressão (SRC, *Standardized Regression Coefficients*; SRRC, *Standardized Rank Regression Coefficient*), triagem (Morris), variância (FAST, *Fourier Amplitude Sensitivity Test*; Sobol) e meta-modelagem (MARS, *Multivariate Adaptive Regression Splines*, ACOSSO, *Adaptive Component Selection and Smoothing Operator*; SVM, *Support Vector Machine*). Como desvantagem para esse tipo de análise, tem-se que a utilização de métodos globais exige maiores esforços computacionais e investigativos (MARA; TARANTOLA, 2008; TIAN, 2013; SILVA, 2016).

Tian (2013) observou que a análise de sensibilidade, local ou global, configura uma ferramenta valiosa para a análise do desempenho de edificações, seja para modelos de simulações ou para estudos observacionais. Deste modo, segundo o referido autor, a análise de sensibilidade vem sendo utilizada para explorar a resposta térmica e energética de edificações em aplicações como projeto, *retrofit*, calibração de modelos, e impacto das mudanças climáticas. Branger et al. (2015), por sua vez, categorizam que esse tipo de investigação deveria ser mais presente nos modelos de economia de energia do setor da construção civil, especialmente pelo fato de que a eficiência energética em edificações se apresenta como a opção mais vantajosa economicamente para mitigar alterações no clima.

Para Silva (2016), observa-se a necessidade da aplicação de métodos globais para o caso de modelos complexos e com muitas variáveis, como é o caso das simulações dinâmicas de edificações. Em continuidade, o autor aponta que o método de Morris e as abordagens de Monte Carlo baseadas em correlação e regressão são mais empregados em pesquisas. De acordo com

Branger et al. (2015), o método de análise de sensibilidade Morris, ou método dos Efeitos Elementares, foi introduzido por Morris (1991) e desenvolvido por Campolongo, Cariboni e Saltelli (2007). Neste método, para cada entrada, efeitos elementares são computados a partir de diferentes pontos no espaço de entrada, e a média e o desvio padrão dos efeitos elementares retornam a medida da importância da variável de entrada e das suas interações com as outras variáveis. Dessa forma, Morris otimiza o esforço computacional das técnicas OAT com o foco global de métodos avançados baseados na variância (BRANGER et al. 2013; SALTELLI et al., 2008).

Conforme Tian (2013), o método de Morris configura a técnica de triagem mais utilizada para análises de desempenho de edificações. No método, os dados de entrada são apresentados como um número discreto de valores (divididos em p níveis) para cada uma das k variáveis investigadas e um número r de trajetórias de aleatorização. Segundo Silva (2016), geralmente, Morris requer uma amostragem – dada por $n=r(k+1)$ – pequena, a depender do número r de trajetórias escolhidas e da quantidade k de variáveis observadas. Alguns experimentos demonstraram que a escolha de $r = 10$ para $p = 4$ produziram resultados valiosos (CAMPOLONGO; SALTELLI, 1997; CAMPOLONGO; TARANTOLA; SALTELLI, 1999; SALTELLI; TARANTOLA; CAMPOLONGO, 2000); outros estudos apontaram que 10 a 20 trajetórias são suficientes, e que r deve ser múltiplo de p (para citar, $r = 8$ ou 12 para $p = 4$) para melhores resultados, com amostras perfeitamente uniformes (KHARE; MUÑOZ-CARPENA, 2017; CHITALE et al.; 2017). As medidas de sensibilidade propostas por Morris, são dadas pelos parâmetros ‘média estimada (μ)’ dos efeitos elementares e seu ‘desvio padrão (σ)’ (MORRIS, 1991). Por sua vez, Campolongo, Cariboni e Saltelli (2007) observaram que quando a distribuição dos efeitos elementares tinha valores positivos e negativos (não monotônico), o efeito total seria calculado de forma incorreta (em estatística, Erro Tipo II) e, assim, aperfeiçoaram o método, por meio de uma terceira medida, desenvolvendo a ‘média, em valor absoluto, estimada (μ^*)’. Segundo Silva (2016), avaliando essas três medidas referidas (μ , μ^* e σ), pode-se determinar muitas informações relacionadas à influência de uma variável na resposta do modelo.

Nos parágrafos seguintes apresentam-se pesquisas que investigaram o desempenho termoenergético de edificações por meio de análise de sensibilidade, com destaque, para estudos que empregaram o método de Morris para avaliação da influência de variáveis projetuais na resposta térmica e energética do ambiente construído.

Heiselberg et al. (2009) aplicaram o método de Morris em uma análise de sensibilidade aprofundada, com intuito de identificar as principais variáveis que influenciam no consumo de

energia em escritórios na Dinamarca. Os autores utilizaram o programa BE06 e consideraram, variáveis do modelo, distribuições de probabilidade, geração de vetores de entrada, vetores de saída e a influência das variáveis. Os resultados apontaram que as variáveis mais importantes são o controle da iluminação e a ventilação durante no inverno.

Corrado e Mechri (2009) também fizeram uso do método de Morris em sua pesquisa. Os autores objetivaram descobrir a influência de variáveis climáticas, físicas, térmicas e operacionais, na classificação energética de uma habitação unifamiliar italiana. Com o estudo, descobriu-se que os fatores mais influentes para a classificação, em ordem de importância, são os ganhos de calor com equipamento, a taxa metabólica, o número de ocupantes, a taxa de renovações do ar e a temperatura interna. Também na Itália, Mauro et al. (2015) buscaram desenvolver um método investigativo, considerando análise de custo e benefício, para o *retrofit* de edificações. Em estudo de caso com análise de sensibilidade por meio de Coeficientes de Regressão Padronizados Ordenados (SRRC), eles identificaram que o isolamento térmico das paredes e da cobertura foram as variáveis projetuais mais influentes no conforto térmico e no cálculo de consumo de energia.

Em sua tese, Silva (2016) afirma que existe carência de estudos acerca de análise de sensibilidade global aplicados no Brasil. O autor desenvolveu uma pesquisa muito interessante, sobretudo, a partir do princípio de que definições projetuais associadas ao tipo de envelope, à geometria, ao tipo de sistema, entre outras, definem grande parte do desempenho de edificações. Destaca-se, adicionalmente, a valiosa contribuição científica do autor, que criou *scripts* (algoritmos) em linguagem computacional R para sistematizar processos, facilitar o uso, evitar erros humanos e diminuir o tempo de planejamento, implementação e execução de análises de sensibilidade. Ressalta-se que R é uma linguagem de programação e um ambiente para análises estatísticas e gráficas (R-PROJECT, 2020). Para a determinação de alternativas de desempenho em edificações, Silva (2016) considerou a análise de sensibilidade de variáveis projetuais com Morris. O método se mostrou adequado para a análise da influência de variáveis projetuais na resposta térmica e energética do ambiente construído (SILVA, 2016). O autor considerou diversas variáveis projetuais, no entanto, não investigou a sensibilidade dessas variáveis frente às condições climáticas futuras, considerando os efeitos do aquecimento global. Nesse sentido, o autor sugere estudos futuros considerando esta condição, de maneira a investigar-se, a partir do método de Morris, as variáveis mais influentes em uma determinada localidade, considerando anos climáticos diferentes, por exemplo.

Silva e Ghisi (2013) investigaram a sensibilidade global de 15 variáveis projetuais de uma casa em Florianópolis, segundo os parâmetros do RTQ-R (BRASIL, 2012a). Para tanto,

os pesquisadores utilizaram os métodos Coeficientes de Regressão Padronizados e Coeficientes de Correlação Parcial. Observou-se que a importância das variáveis depende da ‘saída’ analisada. Para o indicador de graus-hora para resfriamento (GHR), a absorptância solar e a transmitância térmica da cobertura e o contato da cobertura com o exterior foram mais importantes; para o indicador de consumo relativo para aquecimento (CA), a emissividade da cobertura e a transmitância térmica das paredes externas e da cobertura foram mais importantes; e para o indicador de consumo relativo para refrigeração (CR), a emissividade, capacidade térmica e absorptância solar da cobertura foram mais importantes. Observa-se, portanto, a dificuldade de se estabelecer estratégias de eficiência energética que satisfaçam todos os parâmetros de ‘saída’.

Analogamente a Silva e Ghisi (2013), Almeida (2014), em sua dissertação, estudou a influência de propriedades termofísicas e geométricas nos indicadores de desempenho do RTQ-R, considerando cinco tipologias habitacionais em Florianópolis. Para a investigação de sensibilidade dos parâmetros, Almeida (2014) utilizou análise de variância (ANOVA). Os resultados indicaram que, para o GHR, a absorptância solar das paredes e da cobertura foram mais importantes; para o CA, a transmitância térmica das paredes externas e o contato da cobertura com o exterior foram mais importantes; e para o CR, a absorptância solar e a transmitância térmica das paredes externas e o contato do piso da habitação com o solo foram mais importantes. Além disso, não se observaram diferenças significativas na ordem de importância dos fatores entre as tipologias representativas.

Silva, Almeida e Ghisi (2016) fizeram uso da análise de sensibilidade por meio de Morris para identificar variáveis influentes e desenvolver modelos de tomada de decisão de sistemas construtivos residenciais em Belém, Campo Grande, Curitiba e Florianópolis. Para tanto, utilizaram a *Standard 55* para avaliação de conforto térmico, empregando os graus-hora (aquecimento e refrigeração) e o consumo de energia para condicionamento como indicadores de desempenho. De modo geral, os pesquisadores identificaram que a absorptância solar da cobertura e das paredes e a transmitância térmica da cobertura foram as variáveis mais influentes para a ventilação natural. Para o consumo com refrigeração, a absorptância solar e a capacidade térmica da cobertura e das paredes foram mais importantes, com exceção em Curitiba, onde os parâmetros das paredes externas foram mais influentes. E, por último, para o consumo com aquecimento, foram observadas maiores divergências na influência das variáveis, sendo que as propriedades das paredes externas e transmitância térmica da cobertura se destacaram.

Zara (2019) investigou a influência dos parâmetros termofísicos de edificações residenciais em sistemas construtivos leves, empregando o método de classificação energética do RTQ-R nos climas de Belém, Curitiba e São Paulo. Para a análise de sensibilidade, a autora fez uso do método de análise de variância (ANOVA). Os resultados da pesquisa mostraram que, para o GHR, a absorvância solar e transmitância térmica das paredes externas foram mais importantes em Curitiba e São Paulo e a absorvância solar das paredes externas e a interação entre transmitância térmica e absorvância solar das paredes externas foram mais importantes em Belém; para o CA, a transmitância térmica das paredes externas e o contato do piso com o solo foram mais importantes, tanto em Curitiba como em São Paulo; e para o CR, o contato com o solo e a absorvância solar e transmitância térmica das paredes externas foram mais influentes nas três cidades. Zara (2019) explica que estratégias pontuais nos parâmetros mais influentes não asseguram um bom desempenho termoenergético do ambiente construído, sendo necessário, para tanto, uma combinação adequada das propriedades da envoltória.

Por meio da revisão bibliográfica, pôde-se perceber que as variáveis mais influentes no comportamento termoenergético de edificações se alternam, segundo as suas características e o clima, principalmente. Observou-se, também, que o método de Morris tem sido aplicado em várias pesquisas que empregaram análises de sensibilidade para se investigar parâmetros relacionado ao desempenho térmico e energético de edificações. Finalmente, percebe-se que o tema pesquisado é atual e possui grande relevância para o ambiente construído, uma vez que está diretamente alinhado com o interesse de políticas públicas, por exemplo, que devem buscar mitigar os efeitos das mudanças climáticas.

2.3 ESTUDOS QUE CONSIDERAM OS EFEITOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO DESEMPENHO TERMOENERGÉTICO DAS EDIFICAÇÕES

Na última etapa da revisão bibliográfica, buscou-se apresentar pesquisas focadas nos efeitos das mudanças climáticas no desempenho térmico e energético do ambiente construído. A seguir, descrevem-se alguns trabalhos investigados e julgados pertinentes à esta parte da dissertação.

De Wilde e Tian (2009) investigaram o desempenho termoenergético de escritórios diante das mudanças climáticas, conforme os cenários do IPCC para o Reino Unido (UKCIP02). Os pesquisadores objetivaram identificar os principais fatores de incerteza no comportamento do ambiente construído nos horizontes de 2020, 2050 e 2080, aplicando o método de Monte Carlo no experimento para conciliar incertezas epistêmicas e aleatórias. Os

cenários climáticos futuros foram obtidos por meio do *Climate Change Weather File Generator* (*CCWeatherGen*), programa desenvolvido por Jentsch, Bahaj e James (2008) especificamente para o Reino Unido, e para determinar o índice de sensibilidade, os autores empregaram Coeficientes de Regressão Padronizados (SRC), com auxílio do software *Simlab*. Os resultados mostraram que os fatores de incertezas dominantes foram a taxa de infiltração de ar e ganhos de calor com iluminação e equipamentos.

Em continuidade de pesquisa, De Wilde e Tian (2010) também estudaram o desempenho termoenergético de escritórios diante das mudanças climáticas no Reino Unido. Os pesquisadores buscaram determinar a influência, por meio de análises de sensibilidade, de variáveis projetuais no comportamento do ambiente construído, em termos de emissões anuais de gases de efeito estufa, desconforto térmico e produtividade dos usuários. Eles também consideraram os períodos 2020, 2050 e 2080, a partir do programa *CCWeatherGen*. Os resultados apontaram que ganhos de calor devido à iluminação e equipamentos são as variáveis mais influentes nas emissões de carbono nos cenários considerados; além disso, com relação ao conforto térmico e produtividade do usuário, a diferença de desempenho em diferentes zonas térmicas da edificação aumentará ainda mais diante das mudanças climáticas, sendo que a correta utilização da luz do dia será cada vez mais importante na resposta térmica de edificações de escritórios.

Tian e De Wilde (2011), por sua vez, buscaram determinar as variáveis mais influentes no consumo de energia e nas emissões de gases de efeito estufa em edificações no Reino Unido, de modo análogo aos estudos de De Wilde e Tian (2009) e De Wilde e Tian (2010). Desta vez, os pesquisadores consideraram um estudo de caso a partir do edifício da universidade em que eles atuam. Para o cenário futuro, os resultados mostraram aumento de 122% na energia anual para refrigeração e decréscimo de 40% na energia anual para aquecimento, em relação ao período base (1961-1990). As principais variáveis influentes, em comum nos indicadores de consumo energético e gases de efeito estufa, envolveram as características térmicas (transmitância térmica e ganho solar) das janelas.

Glaas et al. (2015) buscaram compreender a possibilidade de moradores mitigarem riscos climáticos em residências escandinavas (Dinamarca, Noruega e Suécia). A avaliação de riscos foi baseada em revisões bibliográficas acerca de alterações no clima e edificações, bem como orientações de adaptação foram baseadas em informações das autoridades governamentais, empresas e organizações. Os pesquisadores mostraram que as tendências climáticas intensificarão riscos como inundações, infiltrações, cargas pesadas de neve, mofo e elevadas temperaturas internas, em edificações residenciais. Nesse âmbito, observou-se que as

diretrizes de adaptação existentes, embora cubram riscos atuais, por exemplo, inundações, vazamento de água e grandes cargas de neve, não se relacionam corretamente com os impactos futuros esperados e deveriam considerar melhor riscos associados à ondas de calor, geada, velocidade do vento mais elevada e a danos na construção.

Farah et al. (2019) investigaram um método para integrar as alterações climáticas nos dados históricos, de forma a dispor dados climáticos adequados para simulações. A pesquisa foi desenvolvida considerando o arquivo climático do ano meteorológico de referência 2016 para a cidade de Adelaide, Austrália. O método consistiu, basicamente, em ajustes na temperatura horária de bulbo seco, a partir de eventos históricos. Esta variável foi dividida em três componentes de séries temporais utilizadas para integrar três características das alterações climáticas (aumento da média máxima e mínima de temperatura, número de dias com temperaturas extremas, e ondas de calor). A pesquisa também considerou um ajuste de médias mensais de irradiação solar global. Os dados meteorológicos originais e desenvolvidos foram usados no software *TRNSYS* para comparar o consumo energético de um ambiente de referência. Sob as condições climáticas alteradas, o consumo com aquecimento diminuiu de 21 a 22% e o consumo com refrigeração aumentou de 29 a 31%. Os autores concluem que dados meteorológicos com mudanças climáticas são necessários, pois apenas os dados históricos não são suficientes para avaliar o desempenho energético de uma edificação.

Dentre os artigos que consideraram edificações brasileiras sob efeitos das mudanças climáticas, Casagrande e Alvarez (2013) foi o primeiro trabalho, na ordem temporal, encontrado na bibliografia. As referidas autoras, avaliaram o desempenho de um modelo típico local de edificação comercial diante de cenários de mudanças climáticas na cidade de Vitória. Para tanto, utilizaram a ferramenta *CCWorldWeatherGen* para obtenção de arquivos climáticos representativos para 2020, 2050 e 2080; as simulações foram feitas no *DesignBuilder*. O método consistiu em avaliações baseadas nos requisitos do RTQ-C (BRASIL, 2012b), investigando a influência de variáveis como orientação solar, sombreamento e porcentagem de abertura de janelas; no total, oito modelos foram simulados em quatro períodos climáticos, resultando em 32 simulações. De modo geral, as análises apontaram um aumento médio no consumo anual de energia elétrica de 10,7% para 2020, 17,3% para 2050, e 26,5% para 2080, em relação ao consumo atual (arquivo TRY), sendo que os maiores consumos foram observados em edificações com maior porcentagem de abertura de janelas, sem sombreamento e orientadas a leste e oeste.

Tateoka e Duarte (2015) estudaram um projeto de *retrofit* de uma habitação multifamiliar construída em São Paulo na década de 70, com vistas à adaptação às mudanças

climáticas. Para tanto, as autoras desenvolveram simulações computacionais com o programa *EDSL Tas*, considerando o clima atual e futuro, conforme o cenário RCP8.5 AR5. Os arquivos climáticos futuros foram elaborados a partir de dados medidos na estação meteorológica do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo (IAG-USP); entretanto, as autoras só variaram a temperatura de bulbo seco e umidade relativa, que segundo Alves (2014) são as mais importantes para as mudanças climáticas, enquanto os demais dados foram mantidos como base o arquivo climático representativo do presente. O indicador de desempenho foi o índice de conforto térmico adaptativo *Standard 55*. As análises apontaram um considerável aumento de desconforto por calor no futuro, e, nesse sentido, as estratégias de sombreamento propostas possibilitaram redução de até 45% nos graus-hora de desconforto. Além disso, observou-se que a robustez (maior massa térmica e maiores possibilidades de ventilação) da edificação antiga foi importante para uma razoável resiliência da habitação frente às mudanças no clima previstas.

Alves, Duarte e Gonçalves (2016) analisaram o conforto e desempenho térmico de três residências de idosos construídas há mais de 40 anos na região metropolitana de São Paulo. As habitações possuem diferentes padrões de cargas internas, aberturas, área útil, contexto urbano etc., segundo as tipologias (uma no segundo pavimento de um edifício de 10 andares localizado em uma região central, uma térrea isolada em uma área exclusivamente residencial e vegetada e uma de três pavimentos em uma área residencial). Foram adotados dois conjuntos de cenários climáticos: o primeiro composto por dados simulados, e o segundo, por dados medidos. Os dados simulados seguem o cenário RCP8.5 AR5 representando quatro períodos: presente (1975-2005), futuro próximo (2015-2044), futuro intermediário (2015-2074) e futuro distante (2076-2096). Já os dados medidos, foram obtidos por meio da estação meteorológica IAG-USP, sendo que os períodos representativos foram: passado (1972, ano representativo da década de construção das edificações), presente (2013) e presente sob maior onda de calor (2014). Os modelos foram calibrados e simulados pelo software *EDLS Tas*, sendo analisados os resultados da sala de estar das três residências por meio dos índices de conforto adaptativo da *Standard 55* para 90% de aceitabilidade. Os resultados comprovaram uma progressiva redução nas condições de conforto ao longo dos anos, com uma ligeira redução no desconforto por frio e um aumento superior no desconforto por calor. Para os autores, a combinação das mudanças climáticas e o fenômeno da onda de calor podem promover um efeito potencial no desconforto de calor, tornando as condições térmicas inóspitas para o conforto humano e implicando no aumento do consumo de energia para climatização.

Invidiata e Ghisi (2016) estudaram o impacto de mudanças climáticas no conforto térmico dos usuários e no consumo energético com aquecimento e resfriamento de uma edificação habitacional de interesse social disposta em três cidades do Brasil: Belém, Curitiba e Florianópolis. Os autores usaram a ferramenta *CCWorldWeatherGen* para gerar arquivos climáticos representativos dos períodos 2020, 2050 e 2080 e fizeram as simulações do modelo por meio do *EnergyPlus*, tendo o critério de desempenho a partir do conforto térmico adaptativo da *Standard 55* combinado com a proposta de limitação da temperatura inferior para conforto em 19,5 °C, sugerida por De Vecchi et al. (2014). Os resultados apontaram que a temperatura do ar aumentará até 5,1 °C no período 2080, o que fará com que o desconforto por calor seja cada vez maior, e o consumo com refrigeração também. Por outro lado, o desconforto por frio e o consumo com aquecimento, tende a diminuir. Nesse sentido, os autores destacam que a principal preocupação térmica em Curitiba não será mais com conforto ambiental sob baixas temperaturas, mas sim altas. A partir dos resultados e análises de desempenho, Inviata e Ghisi (2016) propuseram estratégias passivas de melhoria termoenergética – envolvendo absorvância solar, sombreamento de aberturas e isolamento térmico – e demonstraram que, com as soluções de projeto propostas, é possível reduzir até 50% do consumo energético com condicionamento ambiental, diante de cenários climáticos futuros.

Triana, Lamberts e Sassi (2018) investigaram impactos no desempenho termoenergético a longo prazo de projetos de habitações populares para São Paulo e Salvador. Para tanto, fizeram uso da ferramenta *CCWorldWeatherGen* para gerar arquivos climáticos futuros representativos dos períodos 2020 e 2050, e empregaram o *EnergyPlus* nas simulações termoenergéticas. Os resultados foram comparados usando-se indicadores de graus-hora e de consumo energético para aquecimento e refrigeração. Os autores comprovaram aumento nos indicadores relacionados à necessidade de refrigeração e decréscimo nos indicadores relacionados ao aquecimento. Assim sendo, Triana, Lamberts e Sassi (2018) mostraram que, em São Paulo, estratégias de desempenho envolvendo o envelope (paredes com baixa transmitância e média/alta capacidade térmica, cobertura com isolamento térmico e janelas adequadas) resultaram em melhor resposta termoenergética nos cenários avaliados. Em Salvador, por sua vez, os autores alegaram que a relevância dessas estratégias foi similar, destacando, adicionalmente, o uso de baixa absorvância solar nas paredes e na cobertura.

Guarda et al. (2020) demonstraram como mudanças climáticas podem afetar a concepção de Casas de Energia Zero em Cuiabá. Para tanto, os autores utilizaram como caso base uma habitação popular projetada sob os conceitos de energia zero, tendo painéis fotovoltaicos como fonte de energia, considerando o cenário atual (arquivo climático SWERA de Cuiabá) e os

padrões operativos apresentados pelo RTQ-R. A partir disso, os autores simularam o desempenho da edificação em cenários representativos futuros (2020, 2050 e 2080) gerados por meio da ferramenta *CCWorldWeatherGen*. Os resultados indicaram que o aumento de demanda energética será de 14,1% em 2020, 26,3% em 2050, e 40,2% em 2080, evidenciando que os painéis fotovoltaicos projetados diante da condição atual não serão capazes de atender a demanda futura da edificação. Portanto, os autores concluíram que casas de energia zero devem necessariamente ser projetadas considerando condições de clima futuro. Todavia, cabe ressaltar aqui, que, embora Guarda et al. (2020) tenham utilizados dados SWERA (mais recentes do que dados TRY) em sua pesquisa, os desenvolvedores da ferramenta *CCWorldWeatherGen* (JENTSCH et al., 2013) alertam para o uso de dados que não sejam até 1990, o que pode gerar resultados superestimados.

Nunes e Giglio (2020) estudaram o desempenho térmico de habitações populares construídas em diferentes sistemas construtivos (paredes em bloco cerâmico, concreto maciço e *wood frame*) sob a influência dos efeitos de mudanças climáticas, considerando o clima de São Paulo. Os autores desenvolveram simulações com o *EnergyPlus* para quatro períodos climáticos: TRY, 2020, 2050 e 2080. Para obterem os cenários futuros, Nunes e Giglio empregaram a ferramenta *CCWorldWeatherGen*; a ferramenta de progressão climática foi validada, a partir de comparação dos dados gerados com dados medidos. Como critério de desempenho, os pesquisadores aplicaram o método do conforto térmico adaptativo da *Standard 55* para obterem os graus-hora para aquecimento (GHA) e resfriamento (GHR). Os resultados apontaram que o aquecimento global fará com que os indicadores GHA diminuam até 1.165,24 °Ch e GHR aumentem até 144,26 °Ch, conforme o sistema construtivo. Além disso, a pesquisa apontou que fechamentos verticais com maior massa térmica serão importantes para satisfazer as exigências de conforto térmico do usuário.

Observa-se que é consenso o efeito do aquecimento global em edificações, fazendo com que o ambiente construído passe a apresentar situações de calor mais extremas ao longo dos anos. No Brasil, observa-se que alguns estudos já se preocupam em propor soluções de projeto que possibilitem melhorar a satisfação térmica do usuário, com menor uso de climatização mecânica. Nesse contexto, dada a grande incerteza que envolve as previsões climáticas e a evolução tecnológica de equipamentos, focar em soluções construtivas passivas se mostra a tendência de pesquisa mais plausível e eficiente. Finalmente, embora alguns estudos no exterior já busquem avaliações mais aprofundadas para adaptação de algumas edificações, baseadas em análises de sensibilidade global de variáveis projetuais, por exemplo, no Brasil ainda há carência de investigações com esse nível de aplicação.

3 MÉTODO

Esta pesquisa consistiu em investigar os efeitos das mudanças climáticas no comportamento termoenergético de edificações residenciais brasileiras. Para tanto, o estudo, por meio de análises de sensibilidade global com os Efeitos Elementares de Morris, observou a influência de parâmetros termofísicos no comportamento termoenergético de edificações residenciais, frente à períodos climáticos futuros.

Neste capítulo são apresentadas as características do objeto de estudo, os climas analisados, as etapas de desenvolvimento da pesquisa, bem como procedimentos seguidos para a determinação da sensibilidade de parâmetros termofísicos da edificação.

Na Figura 11, ilustra-se um resumo gráfico, onde se apresenta o processo de desenvolvimento da pesquisa.



Fonte: o autor

3.1 OBJETO DE ESTUDO

O estudo foi baseado em um modelo unifamiliar de edificação residencial de interesse social. Foram consideradas variações em parâmetros termofísicos, simulando decisões projetuais de sistemas construtivos diferentes para a habitação (paredes com bloco cerâmico convencional; paredes de concreto; paredes em sistemas construtivos leves³ etc.), e/ou

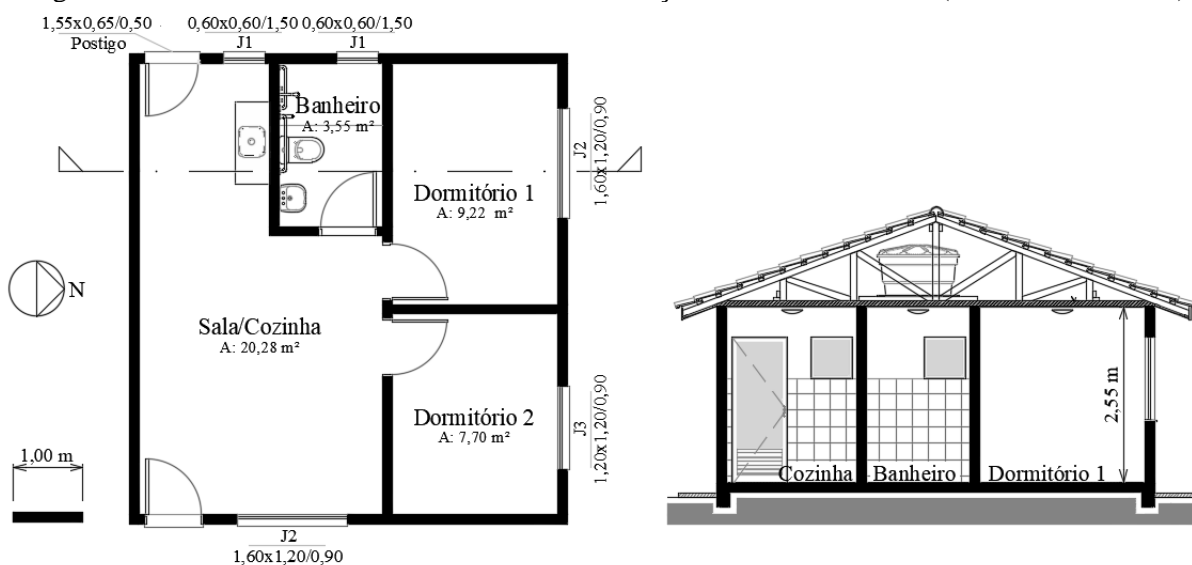
³ Massa superficial inferior à 60 kg/m², conforme a NBR 15575 (ABNT, 2013); por exemplo, *wood frame*, *steel frame* etc.

requisitos de normas e regulamentações técnicas. A partir das variações em parâmetros termofísicos, foi possível estudar a resposta térmica e energética de edificações residenciais com diferentes características, bem como quantificar a sensibilidade das variáveis no desempenho, diante de períodos climáticos futuros.

O modelo base do objeto de estudo foi uma habitação que está situada no *campus* da Universidade Estadual de Londrina. A edificação de referência, construída em 2013, possui aproximadamente 40 m², sendo dividida em uma sala integrada com cozinha, dois dormitórios e um banheiro. As paredes são construídas em *wood frame*, conforme a diretriz número 005 do Sistema Nacional de Avaliação Técnica (SINAT) (BRASIL, 2011b) e o Documento de Avaliação Técnica (DATEc) número 020, emitido em 2013 (IFBQ, 2013). O piso consiste em um radier em concreto armado de 15 cm de espessura, coberto com cerâmica. A cobertura é formada, de fora para dentro, por telhas cerâmicas, estrutura em madeira, ático não ventilado, lâ de rocha de 10 cm de espessura e forro de PVC. As janelas são formadas por caixilhos de alumínio com duas folhas deslizantes e vidro simples incolor de 3 mm de espessura, sem elementos de sombreamento.

Na Figura 12, apresenta-se o modelo geométrico (planta baixa e corte transversal) da edificação residencial adotada. Todas as medidas apresentadas estão em metros.

Figura 12 – Planta baixa e corte transversal da edificação residencial adotada (medidas em metros)



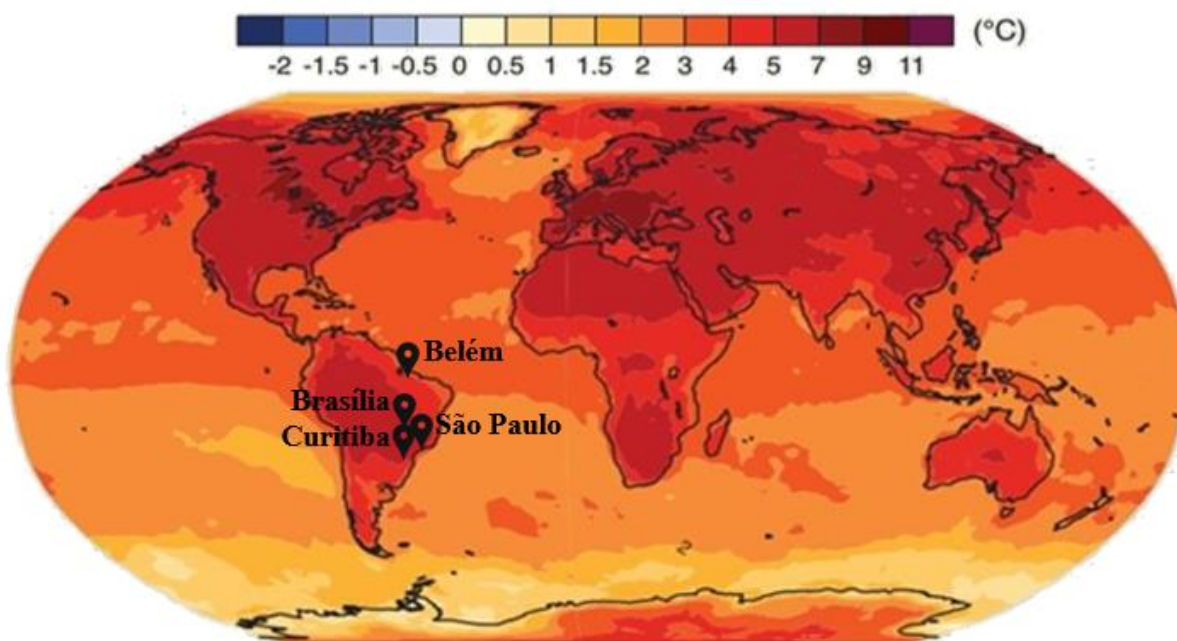
Fonte: o autor; adaptado de Tecverde (2013)⁴

⁴ Acervo pessoal: projeto arquitetônico cedido pela empresa Tecverde. Outras informações sobre o projeto são apresentadas em Ferreira (2013).

3.2 CLIMAS ANALISADOS

A previsão é de que haja aumento de temperatura com graus de intensidade diferentes na extensão do território brasileiro, assim como se percebe historicamente (conforme Figura 1). Desse modo, a fim de se obter resultados para climas com comportamentos distintos, a pesquisa foi desenvolvida para quatro cidades estratégicas para melhor representação do cenário brasileiro de mudanças no clima: Belém, Brasília, Curitiba e São Paulo. Na Figura 13, apresentam-se as localidades consideradas nesta dissertação, em um mapa de previsão de aumento da temperatura máxima diária do ar até 2100 (2081–2100), em relação a 1986–2005.

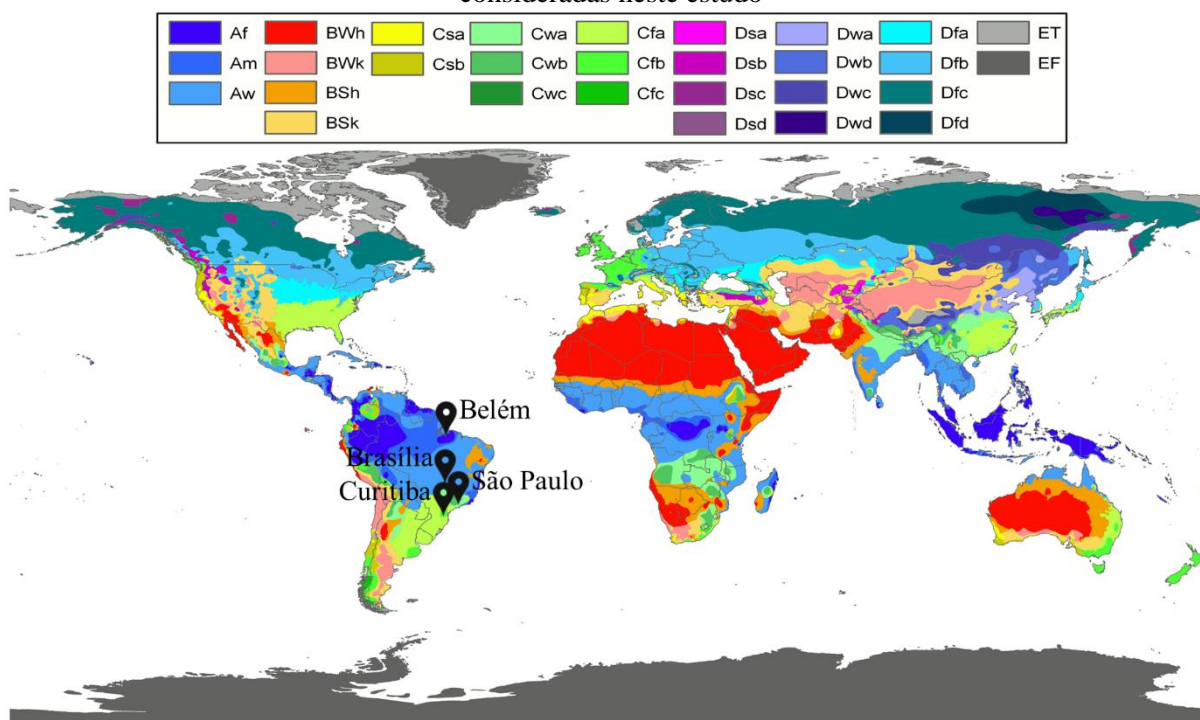
Figura 13 – Previsão de aumento da temperatura máxima diária do ar até 2100 (2081–2100), em relação a 1986–2005, e apontamento das cidades consideradas neste estudo



Fonte: o autor; adaptado de IPCC (2014)

Na Figura 14, situam-se as cidades, conforme as respectivas classificações climáticas mundiais de Köppen-Geiger (PEEL; FINLAYSON; MCMAHON, 2007). Belém está inserida no tipo climático Af (clima equatorial), Brasília está inserida no tipo climático Aw (clima tropical), Curitiba localiza-se no tipo climático Cfb (clima temperado oceânico) e, por último, São Paulo pertence ao tipo climático Cwa (clima subtropical) (ALVARES et al., 2013; PEEL; FINLAYSON; MCMAHON, 2007).

Figura 14 – Mapa mundial da classificação climática Köppen-Geiger, e apontamento das cidades consideradas neste estudo



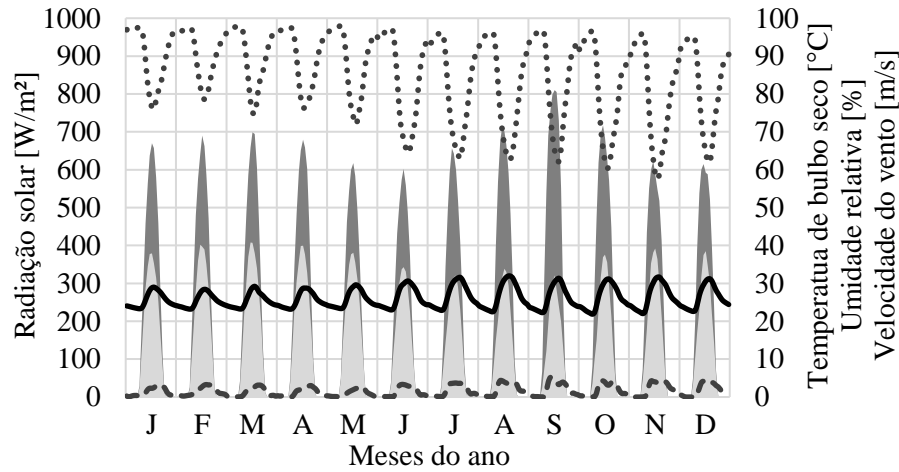
Fonte: o autor; adaptado de Peel, Finlayson e McMahon (2007)

Em complemento, as características climáticas das localidades podem ser detalhadas da seguinte maneira: Belém ($1^{\circ} 27' 21''$ S, $48^{\circ} 30' 16''$ O, 10 m), que está inserida na zona bioclimática 8 da NBR 15220 (ABNT, 2005) e no grupo climático 17 da INI-R (CB3E, 2018), apresenta um clima quente e úmido, com altas temperaturas e precipitações ao longo de todo o ano; Brasília ($15^{\circ} 52' 12''$ S, $47^{\circ} 55' 12''$ O, 1060 m), inserida na zona bioclimática 4 da NBR 15220 (ABNT, 2005) e no grupo climático 10 da INI-R (CB3E, 2018), apresenta um clima quente e seco ao longo da maior parte do ano; Curitiba ($25^{\circ} 25' 40''$ S, $49^{\circ} 16' 13''$ W, 934 m), inserida na zona bioclimática 1 da NBR 15220 (ABNT, 2005) e no grupo climático 2 da INI-R (CB3E, 2018), é caracterizada por apresentar baixas temperaturas durante o ano todo; e São Paulo ($23^{\circ} 32' 56''$ S, $46^{\circ} 38' 20''$ O, 745 m), inserida na zona bioclimática 3 da NBR 15220 (ABNT, 2005) e no grupo climático 1 - A da INI-R (CB3E, 2018), possui um clima ameno, com verões quentes e úmidos, e invernos pouco secos e frios.

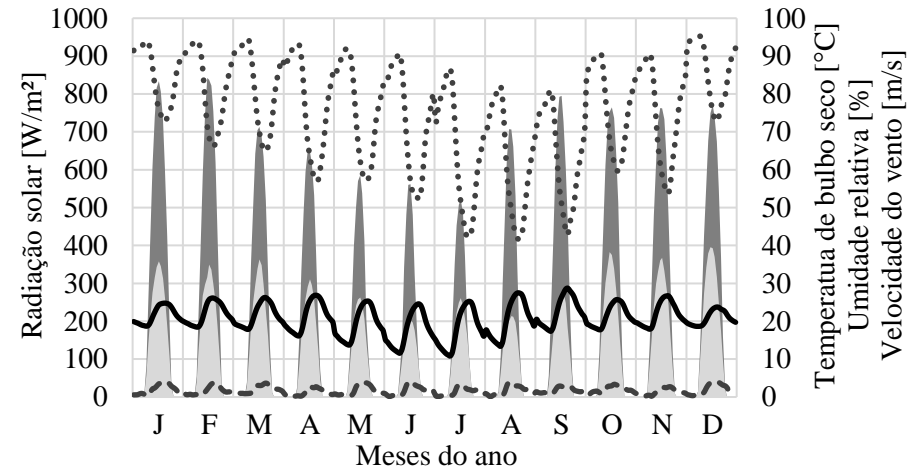
Na Figura 15, ilustram-se e os valores, em médias mensais para as horas do dia, da temperatura de bulbo seco, umidade relativa, radiação solar global, e velocidade do vento, para as quatro cidades, conforme arquivo climático TRY, comumente aplicado em simulações atuais. Os arquivos climáticos a serem utilizados neste estudo foram desenvolvidos por Goulart, Lamberts e Firmino (1998) e revisados por Carlo e Lamberts (2005), e são disponibilizados pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos, no sítio do *EnergyPlus* (DOE, 2020).

Figura 15 – Variáveis climáticas de Belém, Brasília, Curitiba e São Paulo, em médias mensais horárias, conforme os arquivos climáticos TRY

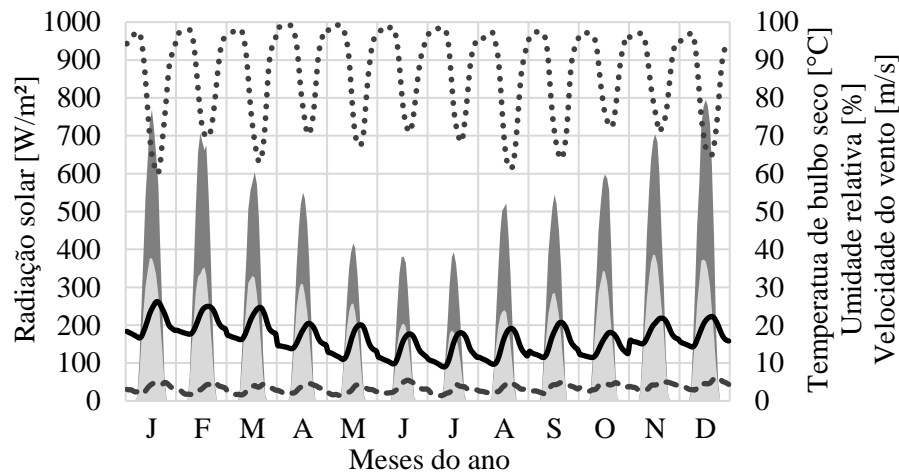
■ Radiação solar global ■ Radiação solar difusa — Temperatura de bulbo seco Umidade relativa do ar - - - Velocidade do vento



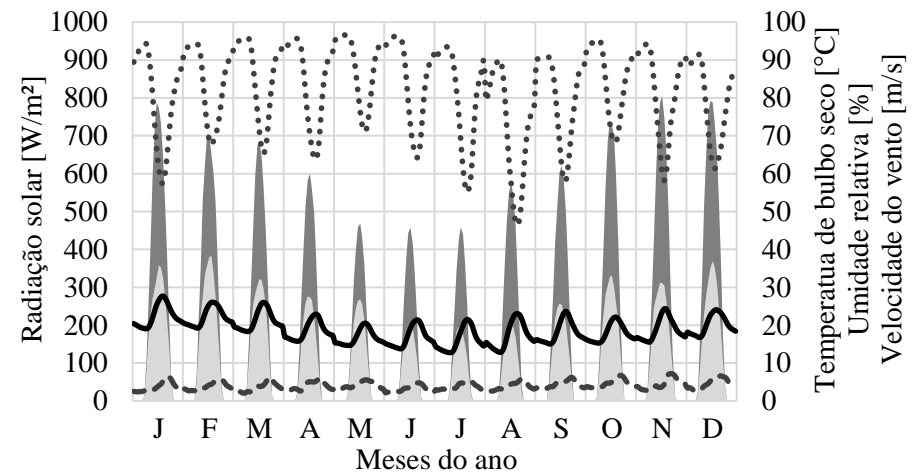
(a) Belém



(b) Brasília



(c) Curitiba



(d) São Paulo

Fonte: o autor; elaborado com dados de Carlo e Lamberts (2005) e Goulart, Lamberts e Firmino (1998)

3.3 ETAPAS DE DESENVOLVIMENTO

Para atender aos objetivos deste trabalho, foi necessário desenvolver previsões das condições meteorológicas futuras, definir os parâmetros de desempenho termoenergético e as configurações para a análise de sensibilidade global, e estabelecer definições para as simulações computacionais.

Dessa maneira, nesta seção, apresentam-se os procedimentos metodológicos seguidos para a obtenção de arquivos climáticos futuros, as configurações de uso e ocupação da habitação, bem como demais definições de simulações termoenergéticas, e os parâmetros de ‘entrada’ e ‘saída’ para a análise de sensibilidade global (parâmetros termofísicos e indicadores de desempenho analisados) frente às mudanças climáticas.

3.3.1 Arquivos Climáticos Futuros

Os arquivos climáticos futuros foram obtidos por meio da aplicação do método *morphing*, desenvolvido por Belcher, Hacker e Powell (2005) e aplicado por Jentsch, Bahaj e James (2012) no desenvolvimento da ferramenta *CCWorldWeatherGen*, que foi utilizada nesta pesquisa. Seu uso é justificado pois, entre as técnicas estudadas na revisão, a aplicação de *morphing* com auxílio do *CCWorldWeatherGen* se apresentou como o método mais viável e vantajoso, no sentido de se produzir informações mais completas, consolidadas e cientificamente aceitas, embora não considere o último relatório (AR5) de avaliação do IPCC. Por meio dos seus algoritmos, obtém-se progressões em todas as variáveis do arquivo climático base, ao contrário de outras técnicas observadas em alguns trabalhos. Adicionalmente, a ferramenta dispõe de rotinas de equações desenvolvidas por meio de fontes especializadas em cada variável.

O *CCWorldWeatherGen* (versão 1.9) (UNIVERSITY OF SOUTHAMPTON, 2020) foi empregado para a obtenção de dados climáticos futuros das cidades investigadas, em três intervalos de tempo representativos: 2020, representa o período 2011–2040; 2050, representa o período 2041–2070; e 2080, representa o período 2071–2100. Assim sendo, considerando-se que a data de desenvolvimento desta dissertação já corresponde ao período representativo de 2020 (2011–2040), a fim de avaliar a ferramenta, os dados climáticos da cidade de São Paulo, gerados na progressão do *CCWorldWeatherGen* para o *time slice* 2020, foram comparados com

dados reais medidos entre 2011 e 2019 pelo Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo (IAG-USP, 2019).

A seguir, apresentam-se mais detalhadamente a metodologia que o *CCWorldWeatherGen* utiliza para a progressão dos dados meteorológicos e o procedimento seguido no estudo para a validação dos arquivos climáticos futuros obtidos por meio da ferramenta.

3.3.1.1 Ferramenta *CCWorldWeatherGen*

Os arquivos climáticos EPW para os períodos 2020, 2050 e 2080, foram gerados com base nas informações TRY de cada localidade: Belém (1964), Brasília (1962), Curitiba (1969) e São Paulo (1954). Apesar de o ano de referência de São Paulo estar fora da faixa 1961–1990, a data dos dados é relativamente próxima e, mais importante, não é posterior ao intervalo especificado, o que poderia superestimar as progressões significativamente.

O modelo climático aplicado no *CCWorldWeatherGen* é o HadCM3, um dos mais aceitos pelo IPCC e aplicado no terceiro (AR3) e quarto (AR4) relatórios de avaliação. O modelo HadCM3 possui ponto de malha com células de aproximadamente 300 x 300 km a cada 2,5° na latitude e 3,75° na longitude.

Na aplicação de *morphing*, que possui a vantagem de respeitar a previsão original de anos típicos (ano médio ao longo de 30 anos de dados), definem-se os seguintes algoritmos, a partir de três operações genéricas (um deslocamento; um alongamento linear – fator de escala; e um deslocamento e alongamento combinados), conforme explicado em Belcher, Hacker e Powell (2005) e Casagrande e Alvarez (2013):

- i) um deslocamento é aplicado na variável climática “atual”, por meio da Equação (1);

$$x = x_0 + \Delta x_m \quad \text{Equação (1)}$$

Em que:

x é a variável climática futura;

x_0 é a variável climática “atual”;

Δx_m é a anomalia mensal absoluta, conforme o modelo de projeção.

- ii) Um alongamento é aplicado na variável climática “atual”, por meio de um escalonamento com a variação média mensal projetada, conforme a Equação (2);

$$x = x_0 \alpha_m \quad \text{Equação (2)}$$

Em que:

x é a variável climática futura;

x_0 é a variável climática “atual”;

α_m é a mudança fracionária do valor mensal médio, conforme o modelo de projeção;

- iii) Uma combinação de deslocamento e alongamento é aplicada na variável climática “atual”, por meio da Equação (3). Assim, a variável “atual” é deslocada pela anomalia média mensal projetada, e estendida pela variação mensal da variável observada.

$$x = x_0 + \Delta x_m + \alpha_m [x_0 - (x_0)_m] \quad \text{Equação (3)}$$

Em que:

x é a variável climática futura;

x_0 é a variável climática “atual”;

Δx_m é a anomalia mensal absoluta, conforme o modelo de projeção;

α_m é a mudança fracionária do valor mensal médio, conforme o modelo de projeção;

$(x_0)_m$ é a média mensal relativa à variável x_0 .

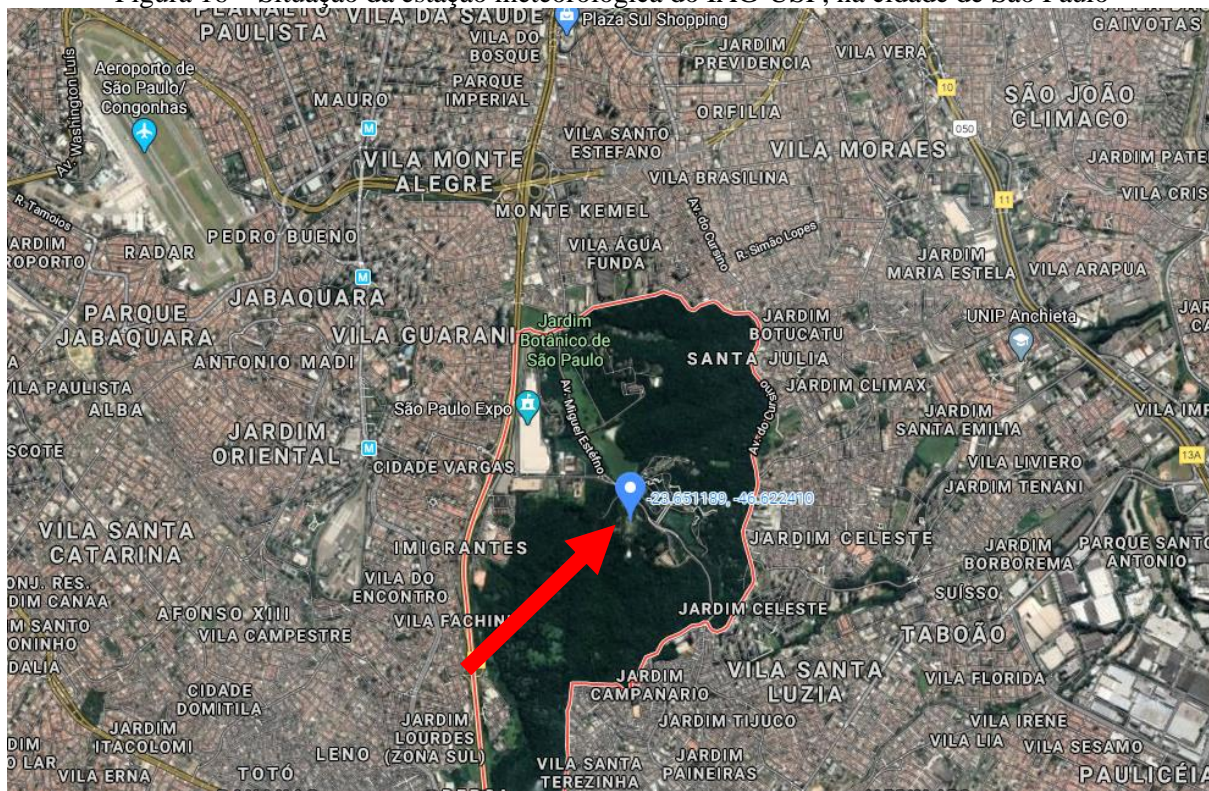
Esse é o algoritmo base do método *morphing*, que é aplicado na ferramenta *CCWorldWeatherGen*. A partir do exposto, a ferramenta faz os cálculos para as variáveis dos arquivos climáticos, tais como temperatura de bulbo seco, umidade relativa do ar, radiação solar, temperatura do solo, e demais variáveis. É interessante relatar que a progressão da temperatura do solo do arquivo climático, que possui grande influência na simulação das trocas de calor do ambiente com o piso, é feita por meio do método de Kusuda e Achenbach (1965). Mais detalhes das rotinas de cálculo, bem como equações e definições de progressão, são apresentados no Apêndice A deste trabalho, e no manual de referência técnica do programa (JENTSCH, 2012).

3.3.1.2 Validação da ferramenta *CCWorldWeatherGen*

A validação dos dados gerados pelo programa foi realizada por meio de análise comparativa das informações do arquivo climático de São Paulo gerado para o período representativo 2020 (2011–2040) com dados reais medidos em São Paulo, entre 01 de janeiro de 2011 e 31 de dezembro de 2019, pelo IAG-USP.

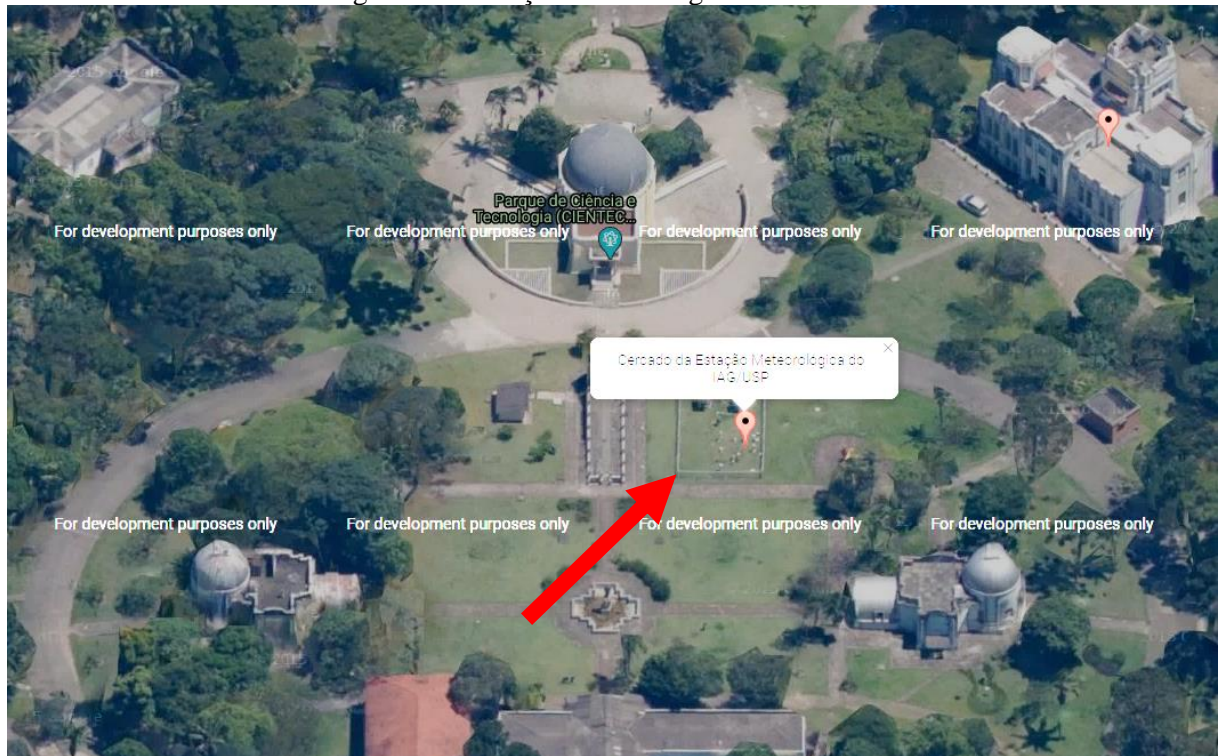
A estação meteorológica do IAG-USP está localizada na latitude $23^{\circ}39'$ S e longitude $6^{\circ}37'$ W, com altitude 799,20 m, em uma área do Parque de Ciência e Tecnologia (CIENTEC) da Universidade de São Paulo. Dessa maneira, uma vez que a estação se encontra em uma área verde, destaca-se que o efeito da urbanização da cidade é relativamente reduzido (mascarado) na referida localidade. Visto que as cidades atuam como amplificadores dos efeitos das mudanças climáticas, supõe-se que em áreas urbanas (onde, geralmente, a vegetação é reduzida) o aquecimento seja mais intensificado, conforme Alves (2014). Na Figura 16, apresenta-se a situação da estação do IAG-USP, dentro da metrópole, enquanto na Figura 17, tem-se uma visualização ampliada da estação propriamente dita.

Figura 16 – Situação da estação meteorológica do IAG-USP, na cidade de São Paulo



Fonte: o autor; elaborado a partir de *Google Maps* (2020a)

Figura 17 – Estação meteorológica do IAG-USP



Fonte: o autor; elaborado a partir de *Google Maps* (2020b)

A precisão dos dados dos arquivos climáticos, em relação aos medidos, foi avaliada por meio do Erro Absoluto Médio Percentual (MAPE), que é uma medida estatística que expressa precisão como uma porcentagem do erro das previsões, por meio da Equação (4). Valores menores de MAPE indicam um parâmetro melhor. Para exemplificar, se o MAPE calculado é 10, em média, a previsão está incorreta em 10% dos dados.

$$\text{MAPE} = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n \frac{|r_i - p_i|}{r_i} \times 100 \quad \text{Equação (4)}$$

Em que:

- n é o número total de observações;
- i é cada uma das horas das observações;
- r é o valor real medido de cada observação;
- p é o valor da previsão de cada observação.

A validação considerou quatro variáveis climáticas de importante influência nas simulações termoenergéticas de edificações: temperatura de bulbo seco, umidade relativa do ar,

radiação solar global e velocidade do vento. Nesse contexto, as duas primeiras variáveis citadas, temperatura de bulbo seco e umidade relativa do ar, são as mais significativas para as mudanças climáticas, conforme exposto por Alves (2014).

Uma vez que o IAG-USP disponibiliza os dados de radiação solar em MJ/m²/dia, os valores precisaram ser convertidos para W/m² a fim de se comparar com a radiação solar extraída do arquivo climático, dada em W/m². Para tanto, sabendo-se que 1 W equivale a 1 J/s, ou seja, 0,0864 MJ/dia, tem-se que a transformação de MJ/m²/dia para W/m² foi feita dividindo-se o valor disponibilizado pelo fator de conversão 0,0864. Analogamente, o IAG-USP disponibiliza dados de velocidade do vento em km/h, que, para serem convertidos para m/s – unidade dos arquivos climáticos –, foram divididos pelo fator de conversão 3,6.

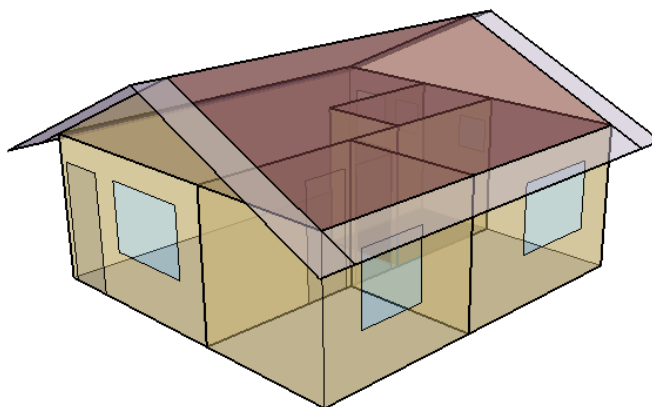
3.3.2 Simulações Termoenergéticas

As simulações para obtenção do comportamento termoenergético do ambiente construído, durante o ano todo, foram realizadas por meio do *EnergyPlus* (versão 9.3.0), programa gratuito e de código aberto, desenvolvido pelo Departamento de Tecnologias de Construção (BTO) do Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE) e gerenciado pelo Laboratório Americano de Energias Renováveis (NREL) (DOE, 2020). O *EnergyPlus* é caracterizado como a ferramenta de simulação termoenergética mais utilizada pela indústria da construção civil mundial (KIRIMTAT et al., 2016). A seguir descrevem-se os procedimentos e as definições considerados.

3.3.2.1 Modelo

A modelagem do objeto de estudo (Figura 12) foi desenvolvida com auxílio do *plug-in Open Studio* (versão 2.9.1) inserido no *SketchUp* (versão 2017), técnica que proporciona uma interface visual para o *EnergyPlus*, conforme se apresenta na Figura 18. Cada ambiente da habitação objeto de estudo foi modelado como uma zona térmica, respeitando-se suas características geométricas e componentes construtivos.

Figura 18 – Modelo da habitação para as simulações computacionais



Fonte: o autor

3.3.2.2 Definições de parâmetros e configurações computacionais

Neste item são apresentadas as definições de algoritmos, de modelagem, e de operação das simulações no *EnergyPlus*.

Definiu-se: algoritmo de convecção externa “*DOE-2*”; algoritmo de convecção interna “*TARP*”; algoritmo de balanço térmico das superfícies “*ConductionTransferFunctions*”; algoritmo de balanço térmico do ar “*ThirdOrderBackwardDifference*”; número mínimo de *warmup days* igual a 6; número máximo de *warmup days* igual a 25; valor de tolerância de convergência de carga igual a 0,04 W; valor de tolerância de convergência de temperatura igual a 0,40 $\Delta^{\circ}\text{C}$; e número de *timesteps* por hora igual a 10.

Para a distribuição solar, adotou-se a opção “*FullInteriorandExteriorwithReflections*”, na qual os cálculos de incidência solar consideram os sombreamentos externos (beirais, auto sombreamento, e qualquer obstáculo aos raios solares), e os raios solares incidentes nas aberturas são computados para o piso e todas as demais superfícies, como paredes e/ou outras aberturas, de acordo com a refletância solar de cada elemento (SILVA, 2016).

Para as propriedades atmosféricas locais (em função da altura acima do solo), os coeficientes do perfil de velocidade do vento, foram definidos considerando o terreno com localização em cidade. Dessa maneira, o expoente de perfil de velocidade do vento no entorno da edificação foi 0,33 e a espessura da camada limite do perfil de velocidade do vento no entorno da edificação foi 460 metros (DOE, 2015). Com relação aos coeficientes de pressão do vento, estes foram calculados pelo *EnergyPlus*, por meio da equação de Swami e Chandra (1988) para edificações de pequeno porte.

A transferência de calor entre o piso da edificação e o solo, que é um parâmetro importante em simulações computacionais (ANDOLSUN et al. 2012; NUNES et al. 2019; SILVA; ALMEIDA; GHISI, 2017), foi considerada por meio do parâmetro “*Site:GroundDomain:Slab*”, a partir da correlação de Kusuda e Achenbach (KUSUDA; ACHENBACH, 1965), com a referência da temperatura da superfície do solo dos arquivos climáticos. Para os cálculos de balanço térmico nas trocas de calor dos ambientes com o solo, foram considerados: solo tipo argiloso e entorno da edificação com calçamento. O solo foi modelado com massa específica de 1.700 kg/m³, calor específico de 840 J/kgK e condutividade térmica de 0,52 W/mK, de acordo com os parâmetros apresentados na NBR 15220 (ABNT, 2005).

No Quadro 3, apresenta-se um resumo com definições de parâmetros e configurações computacionais consideradas.

Quadro 3 – Resumo das definições de parâmetros e configurações computacionais

Definições	Parâmetros e configurações considerados
Software	<i>EnergyPlus</i> (versão 9.3.0)
Período de simulação	01 de janeiro a 31 de dezembro
Algoritmo de convecção externa	<i>DOE-2</i>
Algoritmo de convecção interna	<i>TARP</i>
Algoritmo de balanço térmico das superfícies	<i>ConductionTransferFunctions</i>
Algoritmo de balanço térmico do ar	<i>ThirdOrderBackwardDifference</i>
Número mínimo de <i>warmup days</i>	6
Número máximo de <i>warmup days</i>	25
Tolerância de convergência de carga	0,04 Watts
Tolerância de convergência de temperatura	0,40 Δ°C
<i>Timesteps</i> por hora	10
Distribuição dos raios solares	<i>FullInteriorandExteriorwithReflections</i>
Expoente de perfil de velocidade do vento no entorno da edificação	0,33
Espessura da camada limite do perfil de velocidade do vento no entorno da edificação	460 metros
Tipo de edificação	<i>Low-rise</i>
Transferência de calor com o solo	Objeto <i>Site:GroundDomain:Slab</i> , a partir da correlação de Kusuda e Achenbach
Dados do solo	Solo argiloso [massa específica: 1.700 kg/m ³ ; calor específico: 840 J/kgK; condutividade térmica: 0,52 W/mK; teor de umidade natural: 30%; teor de umidade saturado: 50%]; entorno da edificação com calçamento

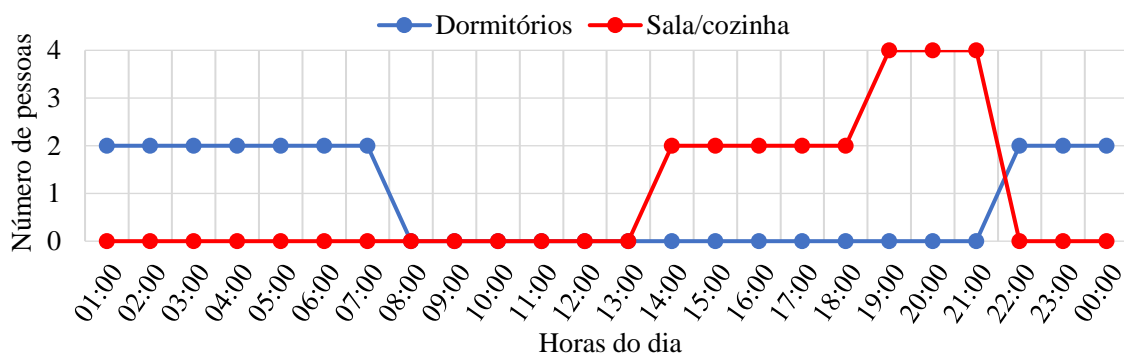
Fonte: o autor; elaborado a partir de ABNT (2005) e DOE (2015)

3.3.2.3 Definições de ocupação e uso, cargas internas e sistemas de ventilação

As definições de ocupação e uso, cargas internas e sistemas de ventilação da habitação seguiram o método de simulação da INI-R⁵ (CB3E, 2018), proposta de atualização do RTQ-R (BRASIL, 2012), e as referências técnicas da ASHRAE (ASHRAE, 2017a; ASHRAE, 2017b) e do DOE (DOE, 2015). A partir das configurações de ocupação e uso da habitação, definições de cargas internas de pessoas, iluminação, equipamentos, bem como arranjos do sistema de ventilação natural e condicionamento de ar, pode-se programar as simulações com informações adequadas e padronizadas, segundo as orientações técnicas normativas, e, dessa forma, é possível comparar edificações com diferentes características construtivas, enfatizando a resposta termoenergética da envoltória do ambiente construído.

Nas simulações, foram consideradas, segundo a INI-R (CB3E, 2018), duas pessoas por dormitório, somando, assim, um total de quatro ocupantes na sala/cozinha; o padrão de ocupação dos ambientes de permanência prolongada é ilustrado na Figura 19. A taxa de metabolismo dos ocupantes, admitindo 1,8 m² de área de pele, foi 81 W/pessoa nos dormitórios (dormindo ou descansando) e 126 W/pessoa na sala/cozinha (de pé ou relaxado) (ASHRAE, 2017a; ASHRAE, 2017b), a fração radiante dos usuários (parte da taxa de metabolismo – calor sensível – dos ocupantes que se transforma em calor no ambiente) foi 0,6 (ASHRAE, 2017b) e a fração de calor sensível foi calculada pelo *EnergyPlus*.

Figura 19 – Rotina de ocupação da habitação para as simulações computacionais



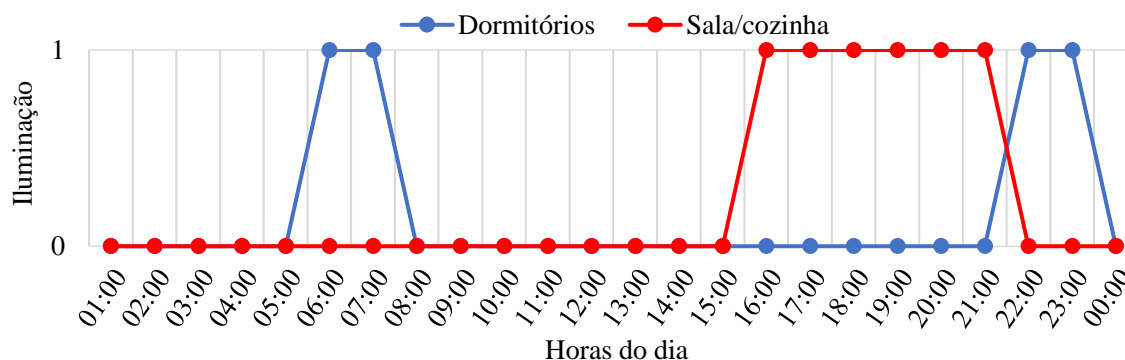
Fonte: o autor; elaborado a partir de CB3E (2018)

O sistema de iluminação artificial foi modelado conforme a INI-R (CB3E, 2018), com densidade de potência instalada de 5 W/m² nos dormitórios e na sala/cozinha, operando conforme acionamento apresentado na Figura 20; foi considerada iluminação do tipo sobreposta

⁵ Texto preliminar. A INI-R passará por consulta pública, antes de ser divulgada em versão final.

no teto, que acarreta fração radiante (radiação de onda longa) de 0,72 e fração visível (radiação de onda curta) de 0,18, como estabelecido pelo DOE (DOE, 2015).

Figura 20 – Rotina de acionamento da iluminação da habitação para as simulações computacionais (0 significa desligada e 1 significa ligada)



Fonte: o autor; elaborado a partir de CB3E (2018)

Também foi inserida uma carga interna de equipamentos na sala, com densidade de potência de 120 W, operando das 14:00 horas às 22:00 horas, conforme define a INI-R (CB3E, 2018); a fração radiante (parte da potência nominal do equipamento que se transforma em calor no ambiente), foi 0,50, segundo apontado pela ASHRAE (ASHRAE, 2017b).

No Quadro 4, apresenta-se um resumo dos parâmetros de fontes de calor para as simulações computacionais.

Quadro 4 – Parâmetros de fontes de calor para as simulações computacionais

Fontes de calor		Ambientes de permanência prolongada	
		Dormitórios	Sala
Pessoas	Ocupação	2 pessoas/dormitório	4 pessoas
	Taxa metabólica	81 W/pessoa	126 W/pessoa
	Fração radiante	0,6	0,6
Iluminação	Densidade de potência instalada	5,0 W/m ²	5,0 W/m ²
	Fração radiante	0,72	0,72
	Fração visível	0,18	0,18
Equipamentos	Densidade de cargas internas	–	120 W
	Fração radiante	–	0,5

Fonte: o autor; elaborado a partir de ASHRAE (2017a), ASHRAE (2017b), CB3E (2018) e DOE (2015)

Com relação aos sistemas de ventilação, foram considerados dois modelos: o primeiro com ventilação exclusivamente natural, e o segundo com ventilação híbrida, ou seja, ora natural, ora artificial, conforme se descreve nos itens 3.3.2.3.1 e 3.3.2.3.2, a seguir. Os sistemas

de ventilação diferentes serviram para analisar a resposta da edificação em termos de conforto térmico, quando a habitação é naturalmente ventilada, e de consumo de energia, quando a habitação possui ventilação híbrida. Os indicadores de conforto térmico e de consumo de energia são descritos no Item 3.3.3.3.

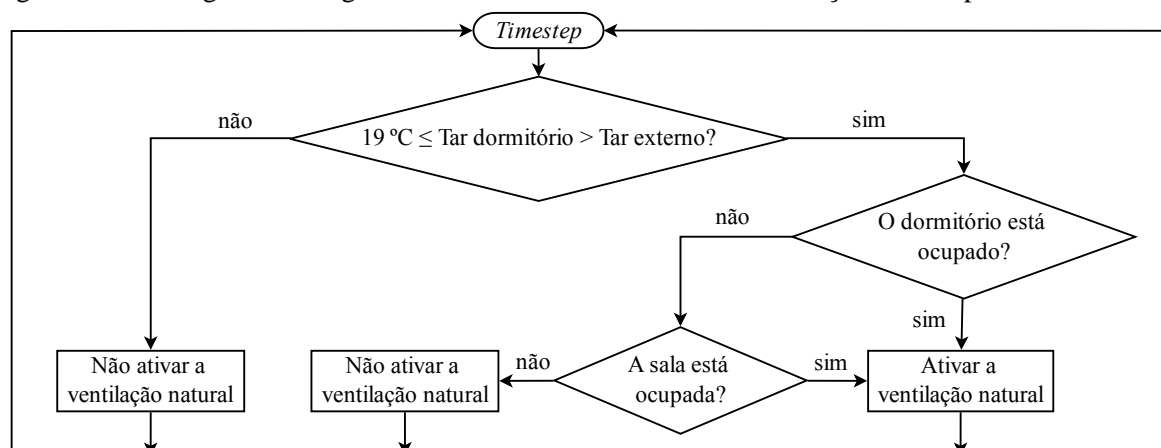
3.3.2.3.1 Sistema de ventilação exclusivamente natural

Nessa condição, foram admitidos os critérios de operação da ventilação natural estabelecidos pela INI-R (CB3E, 2018), desconsiderando, porém, a possibilidade de acionamento de um sistema de ar-condicionado.

O sistema de ventilação natural é operado conforme a temperatura do ar e ocupação dos ambientes, que controlam a abertura das janelas. Na rotina definida, de acordo com a ocupação dos ambientes de permanência prolongada, a ventilação natural é habilitada quando a temperatura do ar interno é igual ou superior à 19 °C (*setpoint*) e superior à temperatura do ar externo; as janelas da edificação estão fechadas quando não há ocupação (das 08:00 h às 14:00 h); das 14:00 h às 22:00 h, quando a sala está ocupada, os dormitórios também podem adotar o uso da ventilação natural; o banheiro está sempre com a janela aberta; as portas de todos os ambientes estão sempre fechadas (ventilação por frestas). O sistema de ventilação natural foi configurado por meio do parâmetro *AirflowNetwork* do *EnergyPlus*, que calcula o fluxo de ar entre as zonas térmicas e o exterior, a partir das frestas e janelas. Considerou-se o sistema de controle *MultiZoneWithoutDistribution*, coeficiente de pressão do vento calculado pelo programa, número máximo de iterações igual a 500, *ZeroNodePressures* como tipo de inicialização para o cálculo da ventilação, tolerância de convergência relativa igual a 0,0001, tolerância de convergência absoluta igual a 0,000001 kg/s, e limite de aceleração de convergência igual a -0,5.

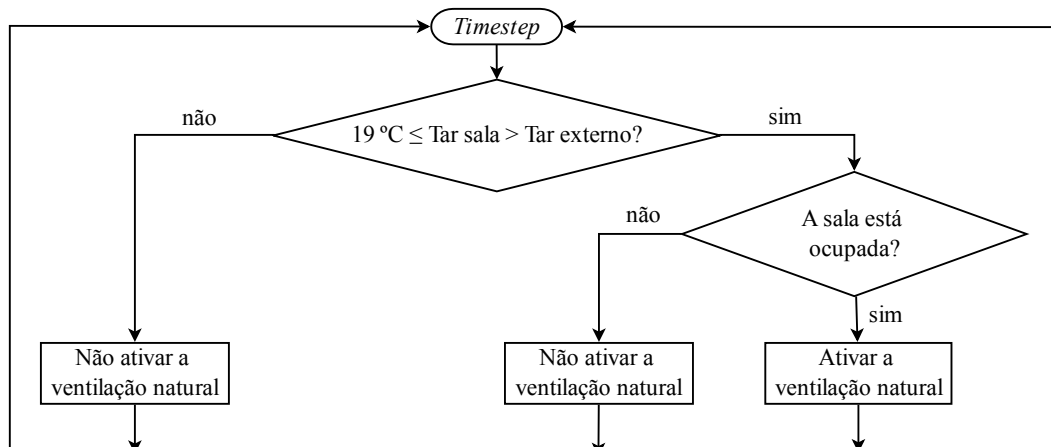
Nas Figuras 21 e 22, ilustram-se os fluxogramas dos algoritmos de controle da ventilação natural que foram considerados para cada um dos dormitórios e para a sala/cozinha, respectivamente.

Figura 21 – Fluxograma do algoritmo de controle do sistema de ventilação natural para os dormitórios



Fonte: o autor

Figura 22 – Fluxograma do algoritmo de controle do sistema de ventilação natural para a sala/cozinha



Fonte: o autor

3.3.2.3.2 Sistema de ventilação híbrida

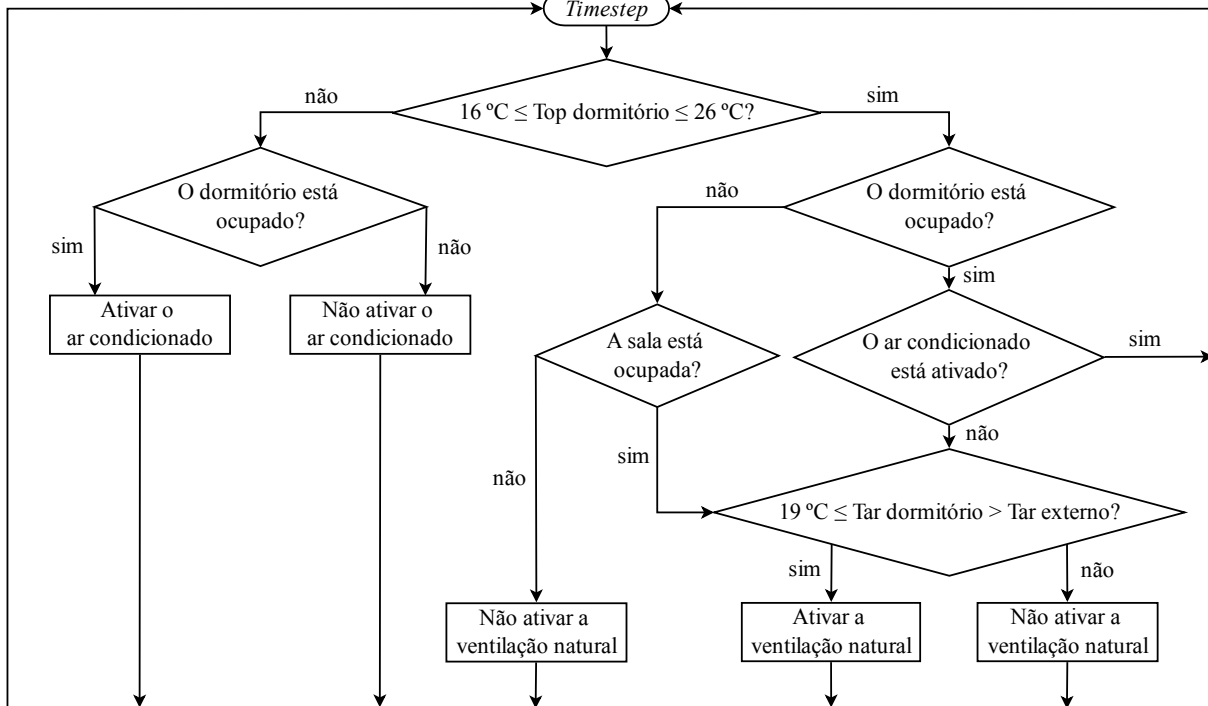
As configurações do sistema de ventilação híbrida foram feitas com o parâmetro *Energy Management System* (EMS) do programa *EnergyPlus*, recurso que possibilita controles avançados nas simulações. O período operativo da edificação, estando naturalmente ventilada ou artificialmente climatizada, bem como as rotinas de uso do sistema de ventilação, seguiram os critérios estabelecidos pela INI-R (CB3E, 2018).

Segundo a INI-R (CB3E, 2018), o sistema de condicionamento de ar é operado conforme a temperatura dos ambientes e as condições limites de aceitabilidade de uso da ventilação natural, sendo que o comportamento da temperatura controla a abertura das janelas, devendo habilitá-las quando a temperatura do ar interno for igual ou superior à 19 °C (*setpoint*) e superior à temperatura do ar externo; as janelas da edificação estão fechadas quando não há

ocupação (das 08:00 h às 14:00 h); das 14:00 h às 22:00 h os dormitórios podem somente adotar o uso da ventilação natural; o banheiro está sempre com a janela aberta; as portas de todos os ambientes estão sempre fechadas (ventilação por frestas); o condicionamento artificial só funciona quando os ambientes estão ocupados (conforme Figura 19); e quando o sistema de condicionamento de ar é acionado, permanece ligado até o último horário de funcionamento do ambiente (até às 22:00 h para a sala, e até às 08:00 h para os dormitórios). A partir da temperatura interna de 26 °C, o sistema de resfriamento é acionado, e a partir da temperatura interna de 16 °C, o sistema de aquecimento é acionado; a temperatura do termostato de resfriamento é de 23 °C e a temperatura do termostato de aquecimento é de 18 °C. O sistema de ventilação natural foi configurado pelo parâmetro *AirflowNetwork* do *EnergyPlus*, seguindo as definições de cálculo apresentadas no Item 3.3.2.3.1; e para a modelagem do sistema de ar condicionado foi utilizado o parâmetro *Packaged Terminal Heat Pump* (PTHP) do *EnergyPlus* instalado nos ambientes de permanência prolongada, considerando taxa de fluxo de ar de 0,0075 m³/s/pessoa, ventilador com 70% eficiência e motor com 90% de eficiência, coeficiente de performance (COP) de 3,50 W/W para resfriamento e para aquecimento, e dimensionamento da potência do sistema com coeficiente de 1,2, a partir dos dados anuais dos arquivos climáticos.

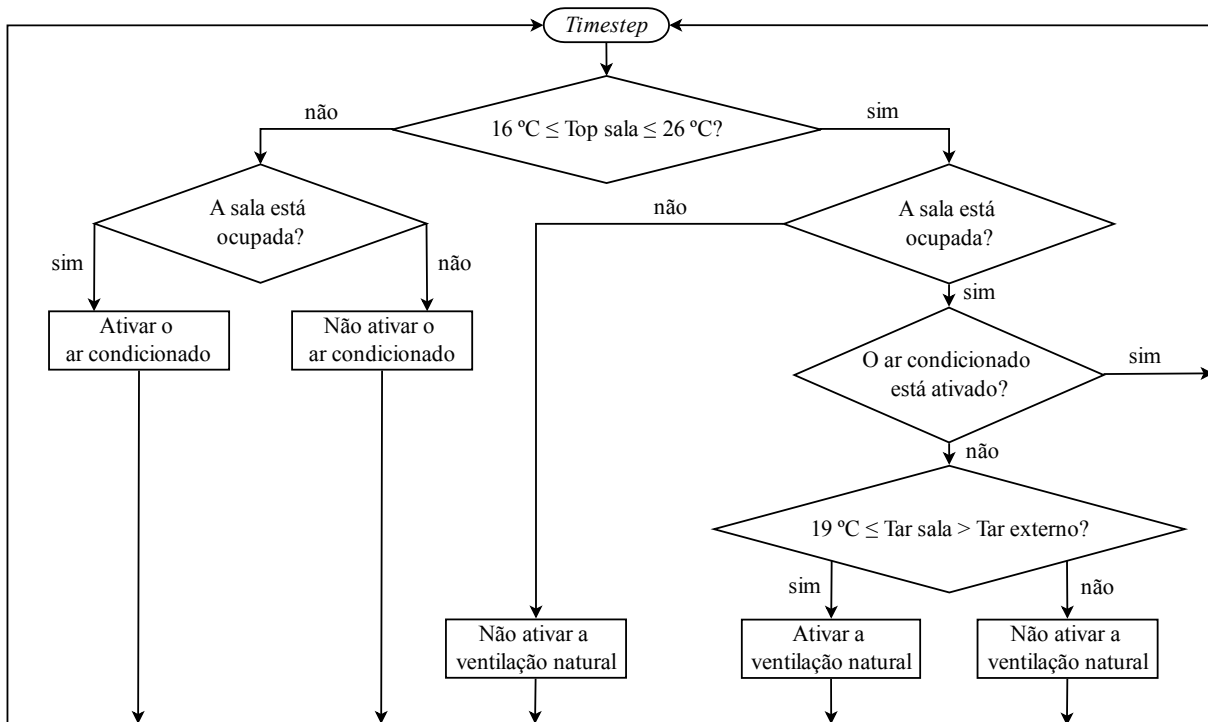
Nas Figuras 23 e 24, ilustram-se os fluxogramas dos algoritmos de controle da integração do sistema híbrido que foram considerado para cada um dos dormitórios e para a sala/cozinha, respectivamente.

Figura 23 – Fluxograma do algoritmo de controle da integração do sistema de condicionamento artificial e da ventilação natural para os dormitórios



Fonte: o autor

Figura 24 – Fluxograma do algoritmo de controle da integração do sistema de condicionamento artificial e da ventilação natural para a sala/cozinha

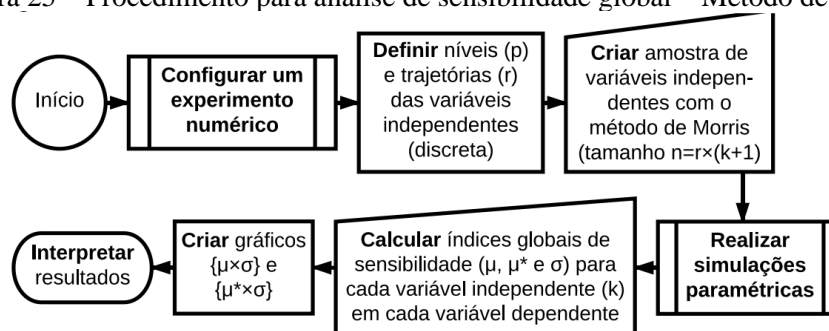


Fonte: o autor

3.3.3 Análise de Sensibilidade

A análise de sensibilidade global, na fonte das variáveis termofísicas, foi desenvolvida por meio do método de Morris, considerando-se os ambientes de permanência prolongada, ou seja, dormitórios e sala de estar. Assim, foi obtida a classificação dos parâmetros mais influentes para o desempenho termoenergético da habitação, em um determinado clima, diante de períodos climáticos futuros. Ressalta-se que, conforme investigado na revisão bibliográfica, o método estatístico citado consegue captar a influência das variáveis, possibilitando identificar parâmetros do modelo que possuem efeitos (a) desprezíveis ou negligenciáveis, (b) lineares e aditivos, ou (c) não-lineares ou de segunda ordem, quando estão em níveis distantes, como no caso dos parâmetros termofísicos, e foi aplicado por diversos pesquisadores. Na Figura 25, mostra-se um resumo do procedimento para análise de sensibilidade global pelo método de Morris.

Figura 25 – Procedimento para análise de sensibilidade global – Método de Morris



Fonte: Silva (2016)

Compreendendo uma distribuição de probabilidades discreta e normalizada, foram adotados quatro níveis de variação (p), considerando-se um número de trajetórias (r) igual a 12, para uniformidade na amostragem. O número de variáveis analisadas (k) foi 13, gerando-se, portanto, um tamanho de amostra (n) igual a 168 para cada localidade (Belém, Brasília, Curitiba e São Paulo) e para cada um dos arquivos de períodos climáticos (TRY, 2020, 2050 e 2080). Considerando, ainda, que foram adotados dois sistemas de ventilação da edificação, tem-se que um total de 5.376 simulações foram realizadas.

Os modelos que compõem a amostra foram elaborados com auxílio da ferramenta R, por meio do programa *RStudio*. Um algoritmo em linguagem R foi desenvolvido para esta finalidade, possibilitando a criação paramétrica automatizada de cada modelo, conforme a amostragem Morris.

Os procedimentos relacionados à análise de sensibilidade também foram desenvolvidos com auxílio da linguagem R, a partir dos *scripts* (algoritmos) ‘*morris.create*’ (para gerar a amostra) e ‘*morris.analyse*’ (para calcular os índices de sensibilidade), desenvolvidos por Silva (2016), visando “sistematizar as análises, facilitar o uso, evitar erros humanos e diminuir o tempo de planejamento, implementação e execução das análises” (SILVA, 2016, p. 140). Os *scripts*, que têm as instruções de uso e seus códigos integralmente descritos no Anexo A, fizeram uso da função ‘*morris*’ do pacote ‘*sensitivity*’ de Iooss et al. (2020).

Foram calculados os índices de sensibilidade μ (média dos efeitos elementares das variáveis), μ^* (média, em valor absoluto, dos efeitos elementares das variáveis) e σ (desvio padrão dos efeitos elementares das variáveis), conforme Morris (1991) e Campolongo, Cariboni e Saltelli (2007). Nos itens a seguir, apresentam-se mais detalhes sobre a análise de sensibilidade.

3.3.3.1 Determinação e Interpretação dos Efeitos Elementares de Morris

A partir de um vetor de parâmetros $x = (x_1, x_2, \dots, x_k)$, correspondente a uma ‘saída’ y do modelo, define-se, inicialmente, uma região de experimentação (ω), que corresponde a uma grade k -dimensional com p níveis, onde cada x_i pode assumir valores discretos adimensionais a partir do conjunto: $\left\{0, \frac{1}{p-1}, \frac{2}{p-1}, \dots, 1\right\}$. Para um dado x , define-se uma medida que corresponde ao efeito elementar do i -ésimo fator de entrada (d_i), de acordo com a Equação (5).

$$d_i(x) = \frac{y(x_1, x_2, \dots, x_{i-1}, x_i + \Delta, x_{i+1}, x_{i+2}, \dots, x_k) - y(x)}{\Delta} \quad \text{Equação (5)}$$

Em que:

- i varia de $\{1, 2, \dots, k\}$, seguindo o número de variáveis (‘entrada’ do modelo);
- $d_i(x)$ é o efeito elementar da i -ésima variável na função y (‘saída’ do modelo);
- y é a função analisada (‘saída’ do modelo);
- x é cada valor selecionado pertencente à região experimental;
- Δ é um valor entre $\left\{0, \frac{1}{p-1}, \frac{2}{p-1}, \dots, 1\right\}$, em que p é o número de níveis da amostra.

Um conjunto de r diferentes trajetórias aleatórias (com índice j) é definido no hipercubo unitário das variáveis de entrada. A partir do número total de trajetórias r , se fazem k

movimentos, um por vez (OAT), para se calcular o efeito elementar da i -ésima variável na trajetória j , dado como $d_i(x_j)$. A partir disso, por meio das Equações (6), (7) e (8), determinam-se os índices μ , μ^* e σ .

$$\mu_i = \frac{1}{r} \sum_{j=1}^r d_i(x_j) \quad \text{Equação (6)}$$

$$\mu_i^* = \frac{1}{r} \sum_{j=1}^r |d_i(x_j)| \quad \text{Equação (7)}$$

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{(r-1)} \sum_{j=1}^r [d_i(x_j) - \mu_i]^2} \quad \text{Equação (8)}$$

Em que:

- i é cada uma das variáveis;
- r é o número de trajetórias da amostra;
- j é cada trajetória no espaço amostral de cada variável i ;
- μ_i é a média dos efeitos elementares da variável i ;
- μ_i^* é a média, em valor absoluto, dos efeitos elementares da variável i ;
- σ_i é o desvio padrão dos efeitos elementares da variável i ;
- $d_i(x_j)$ é o efeito elementar da i -ésima variável na trajetória j .

Dessa forma, por meio da análise de μ^* , descobrem-se as variáveis negligenciáveis ou pouco influentes (importância, embora sem o sinal); por meio da análise de μ , encontra-se a proporcionalidade da variável com a função y ; e por meio da análise conjunta de μ^* e σ descobre-se a linearidade ou influências de segunda ordem no modelo. Ainda nesse sentido, a comparação entre as médias dos efeitos elementares, permite identificar parâmetros que possuem mais influência na resposta do modelo; quanto maior a média, maior a influência (sendo μ^* mais abrangente do que μ). Em complemento, o desvio padrão possibilita identificar parâmetros com comportamento não linear ou que possuem interações com outros parâmetros (segunda ordem); quanto maior o desvio padrão, maior a interação com outros fatores, ou comportamento não linear mais pronunciado.

Neste trabalho, os resultados da análise dos efeitos elementares das simulações termoenergéticas são apresentados como gráficos de dispersão, com um símbolo para cada parâmetro termofísico considerado: o eixo horizontal representa a média μ ou média absoluta μ^* , e o eixo vertical representa o desvio padrão σ dos efeitos elementares. A média indica a influência da variável na resposta do modelo, porém, Campolongo, Cariboni e Saltelli (2007) recomendaram a média absoluta como uma medida mais abrangente para essa finalidade, já que alguns efeitos elementares podem eliminar uns aos outros em modelos não monotônicos. É importante entender que, segundo Morris (1991), o valor numérico da média indica se uma variável é mais ou menos influente do que a outra, e não o quanto uma variável é mais ou menos influente. A média absoluta conduz uma medida de importância para a variável independente na resposta do modelo, ou seja, revela a influência de um parâmetro no resultado e é usada para classificar as variáveis de acordo com a sua importância (quanto maior o valor, maior a importância). Ressalta-se que, embora a média absoluta seja usualmente aplicada para identificar a influência das variáveis independentes na resposta de um modelo, tecnicamente, ela é uma medida para identificar parâmetros “sem importância” ou negligenciáveis (CAMPOLONGO; CARIBONI; SALTELLI, 2007; MENBERG; HEO; CHOUDHARY, 2016). Por sua vez, o desvio padrão é útil para avaliar o espalhamento na resposta do modelo devido a mudanças em um parâmetro específico. Ele indica que a magnitude da influência de um parâmetro depende dos valores dos outros parâmetros, e pode ser interpretado como uma medida para não linearidade e interações de parâmetros (quanto maior o valor, maior a não-linearidade ou interação com outras variáveis) (MENBERG; HEO; CHOUDHARY, 2016; MORRIS, 1991).

Outra vantagem do método de Morris é indicar a relação monotônica⁶ das variáveis. Por meio da monotonia é possível entender se, em média, um aumento no valor da variável independente provoca um aumento do valor da variável dependente (denominada ‘monotonia positiva’) ou, inversamente, uma diminuição no valor da variável dependente (denominada ‘monotonia negativa’). Também é possível que a monotonia seja ambígua, o que significa que, dependendo da variável independente e das outras entradas do modelo, um aumento em seu valor induz às vezes um aumento e outras vezes uma diminuição no valor da variável dependente (BRANGER et al., 2015). Sanchez et al. (2014) explicam que, se todas as estimativas de efeitos elementares de uma variável independente possuem o mesmo sinal, pode-

⁶ Em uma relação monotônica, as variáveis tendem a mudar juntas, mas não necessariamente a uma taxa constante.

se dizer que ela tem um efeito monotônico sobre a variável dependente, aumentando ou diminuindo, dependendo do sinal dos efeitos elementares. Neste caso, o valor da média absoluta μ^* é igual ao valor absoluto da média μ , ou seja, $\mu^* = |\mu|$. Em outras palavras, desprezando-se o sinal da média, se os valores de μ e μ^* de um parâmetro termofísico forem iguais, os efeitos deste parâmetro na resposta do modelo são monotônicos; e qualquer diferença significativa entre μ e μ^* indica uma influência não monotônica.

Adicionalmente, Sanchez et al. (2014) trazem outras correlações estatísticas, propondo um esquema de classificação, a partir da relação σ/μ^* , em termos de linearidade, monotonicidade e possíveis interações de parâmetros: quase linear ($\sigma/\mu^* < 0,1$), monotônico ($0,5 > \sigma/\mu^* > 0,1$) ou quase monotônico ($1 > \sigma/\mu^* > 0,5$), e os fatores com acentuadas não linearidades ou interações com outros fatores ($\sigma/\mu^* > 1$).

3.3.3.2 Variáveis independentes (parâmetros de ‘entrada’)

As variáveis independentes, nesta dissertação, correspondem à parâmetros termofísicos relacionados a decisões de projetos de edificações. A partir desses parâmetros, a análise de sensibilidade global possibilitou a ‘priorização de variáveis’, que consistiu em estabelecer as variáveis responsáveis pela maior parte da variabilidade do modelo.

As variáveis independentes foram 13 parâmetros termofísicos relacionados ao envelope do ambiente construído, e que são associados ao conforto ambiental dos usuários e desempenho termoenergético das edificações. Nesse processo, foram adotados limites amostrais representativos, isto é, parâmetros representativos de possíveis escolhas de projeto em uma habitação real. No Quadro 5, estão listadas todas as variáveis de entrada, as simbologias para as análises, os valores limites amostrais e as variações. A explicação dos parâmetros termofísicos que compõem as variáveis independentes do modelo está apresentada no Apêndice B.

Quadro 5 – Variáveis independentes para a análise de sensibilidade global

Parâmetros termofísicos	Símbolo	LI LS	Variação (p)
Absortância solar da cobertura [-]	acob	{0,2 0,8}	0,20
Absortância solar das paredes [-]	apar	{0,2 0,8}	0,20
Capacidade térmica da cobertura [kJ/m ² K]	CTcob	{11 568}	185,67
Capacidade térmica das paredes [kJ/m ² K]	CTpar	{40 445}	135,00
Capacidade térmica do piso [kJ/m ² K]	CTpis	{13,40 505}	163,87
Emissividade da face interna da cobertura [-]	ecob	{0,05 0,9}	0,28
Fator de ventilação das janelas [-]	Fvent	{0,2 0,9}	0,23
Fator solar dos vidros das janelas [-]	FSvid	{0,36 0,87}	0,17
Orientação solar [°]	OS	{0 270}	90
Transmitância solar e visível das janelas (sombreamento) [-]	tvnez	{0,2 0,9}	0,23
Transmitância térmica da cobertura [W/m ² K]	Ucob	{0,53 2,30}	1,36
Transmitância térmica das paredes externas [W/m ² K]	Upar	{0,27 4,40}	1,38
Transmitância térmica do piso [W/m ² K]	Upis	{0,72 4,67}	1,32

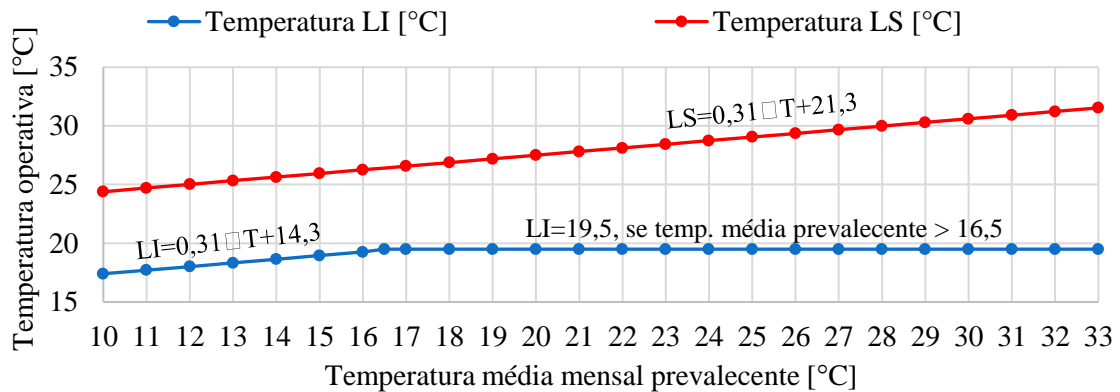
Fonte: o autor

3.3.3.3 Variáveis dependentes (parâmetros de ‘saída’)

As variáveis dependentes, que definem a resposta do modelo, ou seja, que representam o desempenho térmico e energético da edificação, foram obtidas por meio de indicadores de graus-hora para aquecimento (GHA) e resfriamento (GHR), consumo energético com aquecimento (CA) e resfriamento (CR), e desempenho equivalente (I_{eq}), seguindo-se o método desenvolvido por Silva (2016), também apresentado em Silva e Ghisi (2020). Dessa maneira, os dormitórios e a sala/cozinha tiveram seu desempenho anual avaliado em termos de índices de conforto térmico e de consumo de energia.

O conforto térmico adaptativo condicionou os parâmetros para os cálculos dos graus-hora (GHA e GHR), sendo que nesta etapa considerou-se ventilação exclusivamente natural, conforme sistema descrito no Item 3.3.2.3.1. Computou-se, assim, a quantidade de horas ocupadas (conforme Figura 19) em desconforto térmico, para 80% de aceitabilidade, por meio da norma *Standard 55* (ASHRAE, 2017a), e admitindo-se a proposta de fixação do limite inferior em 19,5 °C quando a temperatura média mensal do ar externo excede 16,5 °C, segundo a ABNT/CB-55 (2017) e De Vecchi et al. (2014), conforme apresenta-se na Figura 26.

Figura 26 – Limites de conforto térmico adaptativo



Fonte: o autor; elaborado a partir de ABNT/CB-55 (2017), ASHRAE (2017a) e De Vecchi et al. (2014)

Dessa forma, a partir das definições dos limites de conforto térmico para cada localidade e período climático, os indicadores GHA e GHR caracterizaram as informações de desempenho da habitação naturalmente condicionada. Por meio das Equações (9), (10), (11) e (12) mostram-se os procedimentos para os cálculos dos graus-hora.

$$GHA_{app,j} = \sum_{i=1}^n (T_{LI,mês} - T_{opi,appj}), \text{ se } T_{opi,appj} < T_{LI,mês} \quad \text{Equação (9)}$$

$$GHR_{app,j} = \sum_{i=1}^n (T_{opi,appj} - T_{LS,mês}), \text{ se } T_{opi,appj} > T_{LS,mês} \quad \text{Equação (10)}$$

$$GHA = \frac{\sum GHA_{app,j} \times A_{app,j}}{\sum A_{app,j}} \quad \text{Equação (11)}$$

$$GHR = \frac{\sum GHR_{app,j} \times A_{app,j}}{\sum A_{app,j}} \quad \text{Equação (12)}$$

Em que:

- i é cada uma das horas ocupadas no ano, sob condição de ventilação natural;
- j é cada um dos três ambientes de permanência prolongada;
- n é o total de horas ocupadas no ano, sob condição de ventilação natural;
- $T_{LI, mês}$ é a temperatura limite inferior mensal de conforto térmico [°C];
- $T_{LS, mês}$ é a temperatura limite superior mensal de conforto térmico [°C];
- $T_{opi,appj}$ é a temperatura operativa horária em cada ambiente de permanência prolongada [°C];

$GHA_{app,j}$ é o indicador de graus-hora para aquecimento de cada ambiente de permanência prolongada [$^{\circ}\text{Ch}$];

$GHR_{app,j}$ é o indicador de graus-hora para resfriamento de cada ambiente de permanência prolongada [$^{\circ}\text{Ch}$];

GHA é o indicador de graus-hora para aquecimento (ponderado) da edificação [$^{\circ}\text{Ch}$];

GHR é o indicador de graus-hora para resfriamento (ponderado) da edificação [$^{\circ}\text{Ch}$];

$A_{app,j}$ é a área de cada ambiente de permanência prolongada [m^2];

Por sua vez, os indicadores de consumo de energia para aquecimento (CA) e resfriamento (CR) da edificação, se referem às somas totais de energia consumida com aquecimento e resfriamento, durante o ano todo (conforme Item 3.3.2.3), nos ambientes de permanência prolongada, como mostram as Equações (13), (14), (15) e (16). Nesta etapa, considerou-se as simulações com o sistema de ventilação híbrida, descrito no Item 3.3.2.3.2.

$$CA_{app,j} = \sum_{i=1}^n ca_{i,app,j}, \text{ se } T_{i,app,j} \leq 16 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \text{Equação (13)}$$

$$CR_{app,j} = \sum_{i=1}^n cr_{i,app,j}, \text{ se } T_{i,app,j} \geq 26 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \text{Equação (14)}$$

$$CA = \sum CA_{app,j} \quad \text{Equação (15)}$$

$$CR = \sum CR_{app,j} \quad \text{Equação (16)}$$

Em que:

i é cada uma das horas ocupadas no ano, sob condicionamento artificial;

j é cada um dos três ambientes de permanência prolongada;

n é o total de horas ocupadas no ano, sob condicionamento artificial;

$T_{i,app,j}$ é a temperatura horária em cada ambiente de permanência prolongada [$^{\circ}\text{C}$];

$ca_{i,app,j}$ é o consumo horário para aquecimento de cada ambiente de permanência prolongada [kWh];

$cr_{i,appj}$ é o consumo horário para resfriamento de cada ambiente de permanência prolongada [kWh];

$CA_{app,j}$ é o indicador de consumo anual para aquecimento de cada ambiente de permanência prolongada [kWh/ano];

$CR_{app,j}$ é o indicador de consumo anual para resfriamento de cada ambiente de permanência prolongada [kWh/ano];

CA é o indicador de consumo anual total para aquecimento da edificação [kWh/ano];

CR é o indicador de consumo anual total para resfriamento da edificação [kWh/ano].

Por último, em posse dos indicadores de desempenho da edificação quando naturalmente ventilada e quando artificialmente condicionada, foi obtido o indicador equivalente de desempenho, normalizado entre 0 e 1, de acordo com a Equação (17).

$$I_{eq} = \left[\frac{(GHA + GHR)}{(GHA + GHR)_{m\acute{a}x}} + \frac{(CA + CR)}{(CA + CR)_{m\acute{a}x}} \right] \times 0,5 \quad \text{Equação (17)}$$

Em que:

I_{eq} é o indicador equivalente de desempenho da edificação;

$(GHA + GHR)$ é a soma dos graus-hora para aquecimento e resfriamento da edificação, em cada observação;

$(GHA + GHR)_{m\acute{a}x}$ é o máximo valor da soma dos graus-hora para aquecimento e resfriamento da edificação;

$(CA + CR)$ é a soma do consumo de energia total para aquecimento e resfriamento da edificação, em cada observação;

$(CA + CR)_{m\acute{a}x}$ é o máximo valor da soma do consumo de energia total para aquecimento e resfriamento da edificação.

4 RESULTADOS

Neste capítulo, apresentam-se os resultados de validação da ferramenta de progressão climática *CCWorldWeatherGen*, os dados climáticos futuros para as cidades consideradas no estudo, e os resultados da análise de sensibilidade global dos parâmetros termofísicos do objeto de estudo para cada cidade, em cada período climático.

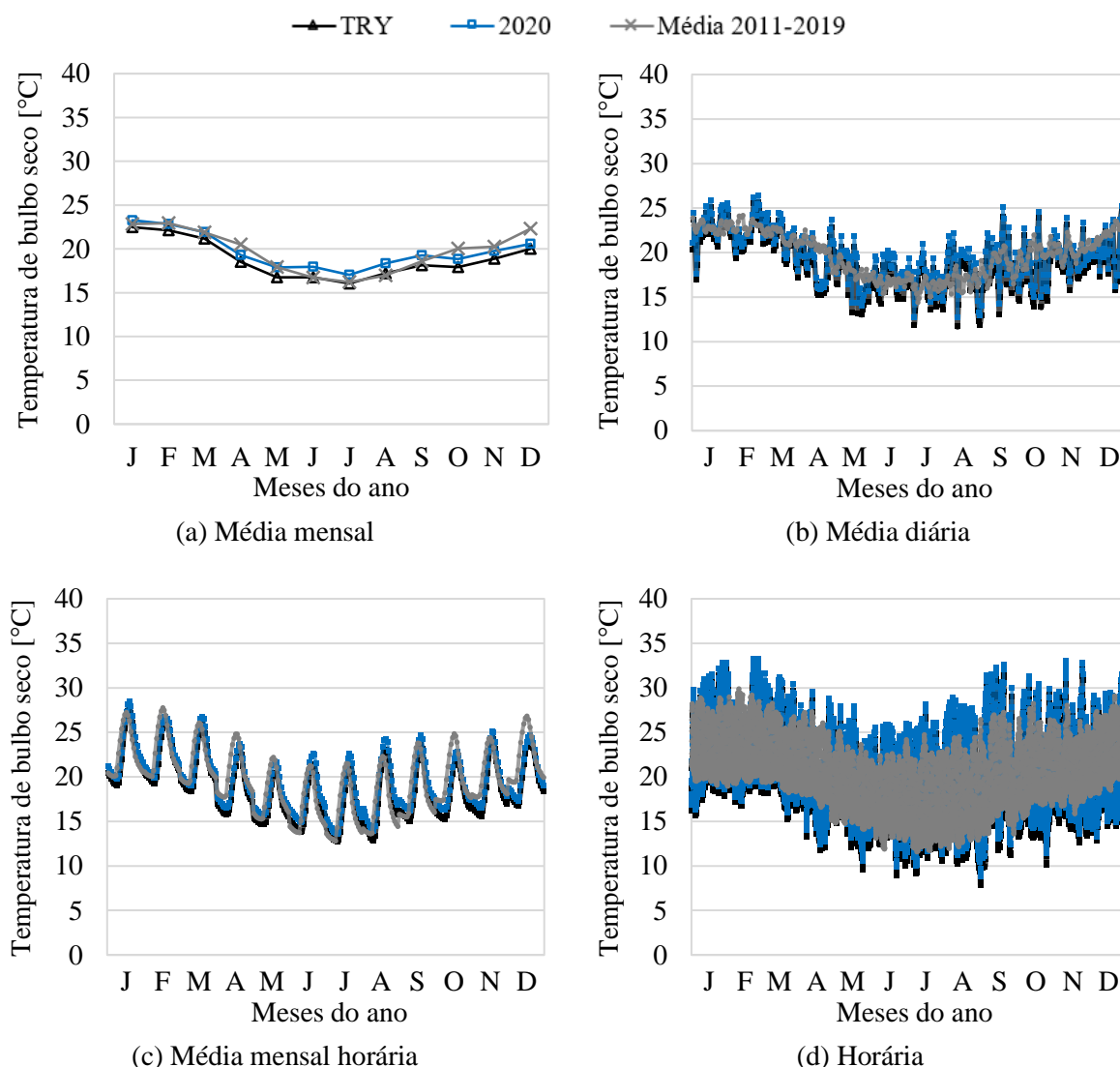
4.1 VALIDAÇÃO DA FERRAMENTA *CCWORLDWEATHERGEN*

Nas Figuras 27 a 30, ilustram-se os dados de temperatura de bulbo seco, umidade relativa do ar, radiação solar global e velocidade do vento de São Paulo, em médias mensais, médias diárias, médias mensais horárias, e valores horários para o ano todo. As diferentes linhas plotadas nos gráficos retratam os dados obtidos pelo arquivo TRY (1954), pelas progressões do software *CCWorldWeatherGen* para o período 2020, e pelas medições realizadas na estação meteorológica do IAG-USP durante os anos de 2011 a 2019 (IAG-USP, 2020).

4.1.1 Temperatura de Bulbo Seco

Na Figura 27, apresentam-se os valores de temperatura de bulbo seco de São Paulo.

Figura 27 – Temperatura de bulbo seco de São Paulo



Fonte: o autor; elaborado a partir de dados de Carlo e Lamberts (2005), Goulart, Lamberts e Firmino (1998) e IAG-USP (2020)

Por meio da Figura 27, observando-se as informações sobre a temperatura de bulbo seco, fica evidente, além do aumento da temperatura nos últimos anos, a elevação progressiva da temperatura no cenário futuro. Em relação aos dados do arquivo TRY de São Paulo, o aumento da temperatura média anual do ar é estimado em $0,91\text{ }^{\circ}\text{C}$ no período 2020. Ademais, a temperatura mínima passará de $16,05\text{ }^{\circ}\text{C}$ para $17,03\text{ }^{\circ}\text{C}$ até 2040, enquanto a máxima passará de $22,47\text{ }^{\circ}\text{C}$ para $23,27\text{ }^{\circ}\text{C}$. Analisando-se a temperatura média de 2011 a 2019, observa-se que a progressão para o alongamento 2020, período atual, já apresenta notável fidelidade com os dados medidos diariamente na estação meteorológica do IAG-USP. A menor diferença média mensal ($-0,04\text{ }^{\circ}\text{C}$) entre 2020 e as medições, foi observada em março, enquanto a maior diferença ($+1,73\text{ }^{\circ}\text{C}$) foi observada em dezembro. Percebe-se que, em meses mais quentes, as

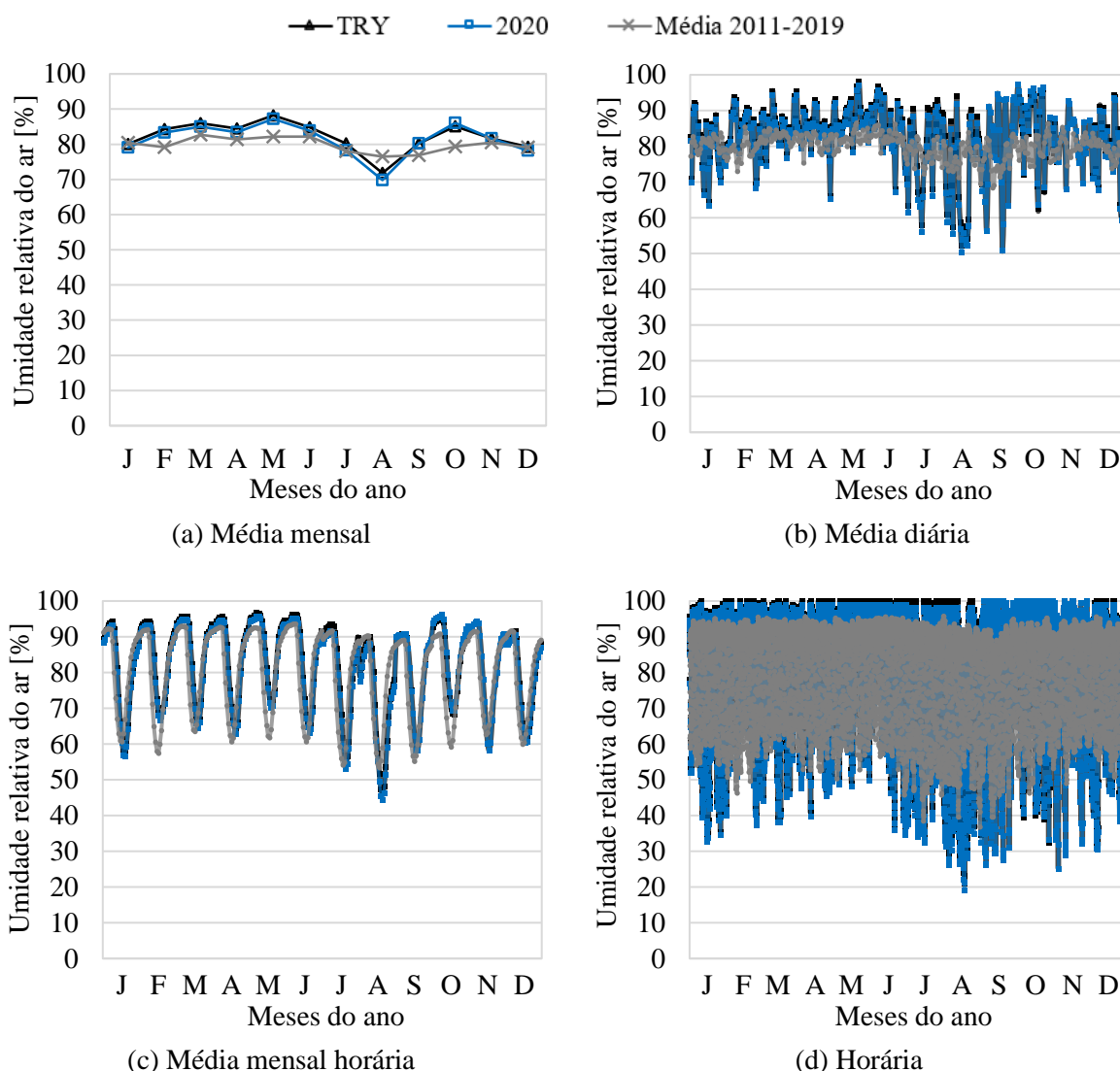
temperaturas obtidas por meio da progressão e as medidas se aproximam mais entre si, sendo que em abril, outubro, novembro e dezembro, as temperaturas medidas são superiores às do arquivo climático 2020; por outro lado, nos meses mais frios, as temperaturas medidas são inferiores às do arquivo climático 2020. Nota-se, também, por meio das médias diárias e valores horários, uma oscilação maior nas temperaturas dos arquivos climáticos, face às temperaturas medidas. A estação meteorológica fica em uma área arborizada, o que pode justificar a maior constância nas temperaturas medidas.

No geral, em comparação com os dados atuais medidos na estação, os gráficos indicam que a temperatura do ar obtida na progressão apresenta mais fidelidade do que os dados do arquivo climático TRY. Essa análise é corroborada pelos números do MAPE. O MAPE calculado, considerando todas as horas do ano, é 13,78% para o arquivo climático TRY, e 13,45% para o arquivo climático 2020. Além do mais, analisando individualmente as horas dos meses que possuem temperaturas medidas mais altas e mais baixas, respectivamente, em fevereiro, o MAPE é 9,20% para os dados TRY e 8,60% para os dados 2020, e em julho, o MAPE é 15,52% para os dados TRY e 16,48% para os dados 2020.

4.1.2 Umidade Relativa do Ar

Na Figura 28, apresentam-se os valores de umidade relativa do ar de São Paulo.

Figura 28 – Umidade relativa do ar de São Paulo



Fonte: o autor; elaborado a partir de dados de Carlo e Lamberts (2005), Goulart, Lamberts e Firmino (1998) e IAG-USP (2020)

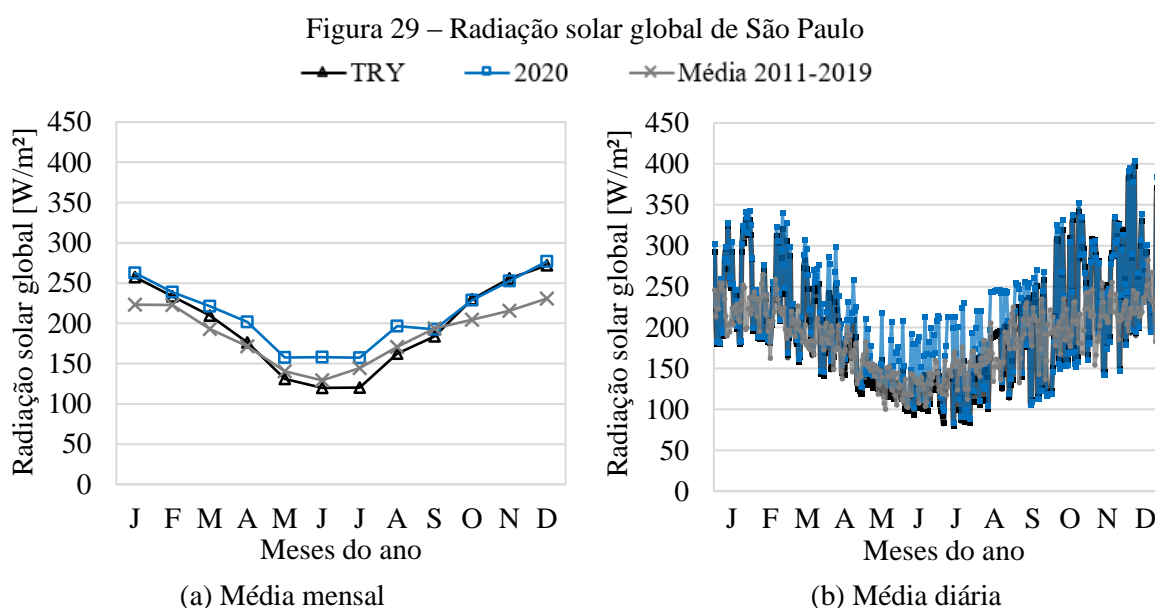
Por meio da Figura 28, nota-se uma redução da umidade relativa no período 2020. Segundo as progressões para São Paulo, até 2040 o valor máximo será de 87,22%, em maio, e o mínimo será 69,82%, no mês de agosto. De acordo com os resultados, estima-se que a média anual passará de 82,17% (TRY) para 81,33% (2020) até 2040. Destaca-se, porém, que os dados atuais medidos (2011-2019) apresentam média anual de 79,84% e, em vários meses do ano, já estão bem abaixo da previsão para o período 2020.

Em referência aos dados medidos na estação IAG-USP, o MAPE calculado da umidade relativa dos arquivos climáticos, considerando todas as horas do ano, é 14,73% para o arquivo TRY, e 14,47% para o arquivo 2020. Em fevereiro o MAPE é 13,60% para os dados TRY e

13,01% para os dados 2020, e em julho o MAPE é 17,36% para os dados TRY e 16,61% para os dados 2020.

4.1.3 Radiação Solar Global

Na Figura 29, apresentam-se os valores de radiação solar global de São Paulo. Uma vez que a estação do IAG-USP só fornece a radiação solar global em médias diárias, não foi possível elaborar os gráficos com valores em médias mensais horárias e horários para o ano todo.



Fonte: o autor; elaborado a partir de dados de Carlo e Lamberts (2005), Goulart, Lamberts e Firmino (1998) e IAG-USP (2020)

As médias anuais de radiação solar global dos arquivos climáticos são de 195,94 W/m² (TRY) e 212,04 W/m² (2020), enquanto o valor medido na estação IAG-USP, de 2011 a 2019, é de 186,69 W/m². Segundo a estimativa das progressões, a radiação média mensal máxima passará de 271,93, W/m² (dezembro, TRY) para 276,98 W/m² (dezembro, 2020) até 2040, enquanto a mínima passará de 119,85, W/m² (junho, TRY) para 157,34 W/m² (julho, 2020). Comparando-se os dados medidos de 2011 a 2019 com os dados dos arquivos climáticos, notam-se diferenças com o período 2020 (atual) e até mesmo com o arquivo TRY de 1954. Percebe-se que, em alguns meses, a radiação solar medida na estação está abaixo dos valores indicados nos arquivos climáticos, o que pode ser justificado pela localização da estação e pelo equipamento – actinógrafo – utilizado para medição no IAG-USP. Enquanto alguns piranômetros se enquadram como instrumentos de primeira (2% de incerteza) ou segunda (5%

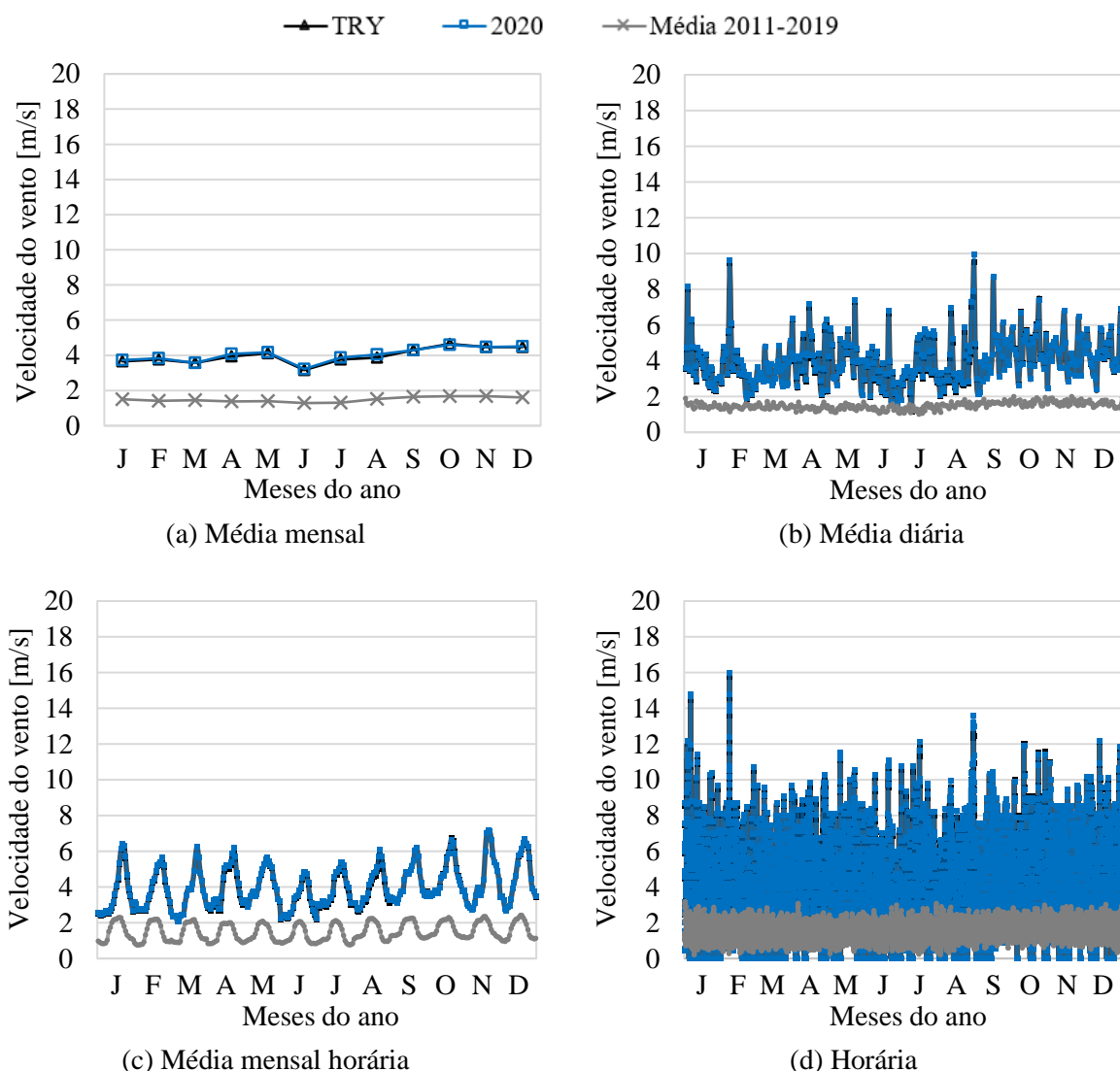
de incerteza) classe, os actinógrafos são tidos como instrumentos de terceira classe (15 a 20% de incerteza) com baixa precisão, de acordo com a Organização Mundial de Meteorologia (CRESESB, 2014; WMO, 2018). Brock e Nicolaidis (1984), Dallacort et al. (2004), Malm e Walther (1980) alegam que a precisão do actinógrafo pode gerar desvios de até 19% nas informações medidas. Isto posto, embora o Boletim de 2008 (IAG-USP, 2008) descreva que os dados medidos pelo actinógrafo da estação passam por um tratamento para se obter uma ‘estimativa’ do valor medido por um piranômetro, imprecisões nas medições horária podem ocorrer e causar inconsistências. Outra possibilidade plausível para as diferenças relativas nesse parâmetro, é o fato de os dados horários de radiação solar do arquivo TRY possuírem limitações, por terem sido estimados a partir da nebulosidade horária, afetando a exatidão das informações (CARLO; LAMBERTS, 2005; GOULART; LAMBERTS; FIRMINO, 1998).

Em referência aos dados medidos na estação IAG-USP, o MAPE da radiação solar global dos arquivos climáticos, considerando a média diária anual, é 21,95% para o arquivo TRY, e 27,94% para o arquivo 2020. Analisando a média diária em fevereiro, o MAPE é 17,89% para os dados TRY e 19,21% para os dados 2020, e analisando a média diária em julho, o MAPE é 20,21% para os dados TRY e 31,15% para os dados 2020.

4.1.4 Velocidade do Vento

Na Figura 30, apresentam-se os valores de velocidade do vento de São Paulo.

Figura 30 – Velocidade do vento de São Paulo



Fonte: o autor; elaborado a partir de dados de Carlo e Lamberts (2005), Goulart, Lamberts e Firmino (1998) e IAG-USP (2020)

De modo geral, pelos gráficos da Figura 30, não existem diferenças notáveis entre as velocidades do vento do arquivo TRY e do arquivo com a progressão para 2020. As médias anuais de velocidade do vento dos arquivos climáticos são de 3,98 m/s (TRY) e 4,03 m/s (2020). Nesse sentido, segundo a estimativa das progressões, a velocidade do ar média mensal máxima passará de 4,65 m/s (outubro, TRY) para 4,60 m/s (outubro, 2020) até 2040, enquanto a mínima passará de 3,16 m/s (junho, TRY) para 3,22 m/s (junho, 2020).

A velocidade do vento foi a variável climática de São Paulo que apresentou maior discrepância entre os valores medidos pelo IAG-USP e os valores dos arquivos climáticos. Os dados horários dos arquivos climáticos indicam velocidade do vento atingindo até cerca de 15 m/s, enquanto os valores medidos na estação não passam de 4 m/s. O MAPE da velocidade do

vento dos arquivos climáticos, considerando os dados horários, é 44,54% para o arquivo TRY, e 44,75% para o arquivo 2020. Uma provável justificativa para as discrepâncias elevadas pode ser as características locais da origem dos dados. Os parâmetros TRY eram coletados em regiões demasiadamente abertas (aeroporto), enquanto a estação IAG-USP está localizada em uma área vegetada, em meio à metrópole.

4.2 PROGRESSÕES CLIMÁTICAS

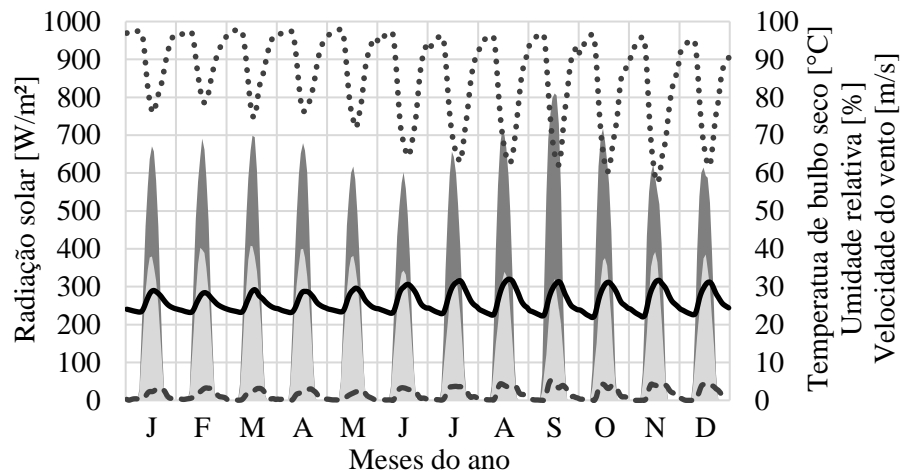
Nos subitens desta seção, apresentam-se as médias mensais horárias, bem como outros parâmetros estatísticos, das progressões das variáveis climáticas temperatura de bulbo seco, umidade relativa, radiação solar (desconsiderando-se os horários noturnos) e velocidade do vento, de Belém, Brasília, Curitiba e São Paulo. Informações complementares das variáveis climáticas descritas estão expostas no Apêndice C.

4.2.1 Belém

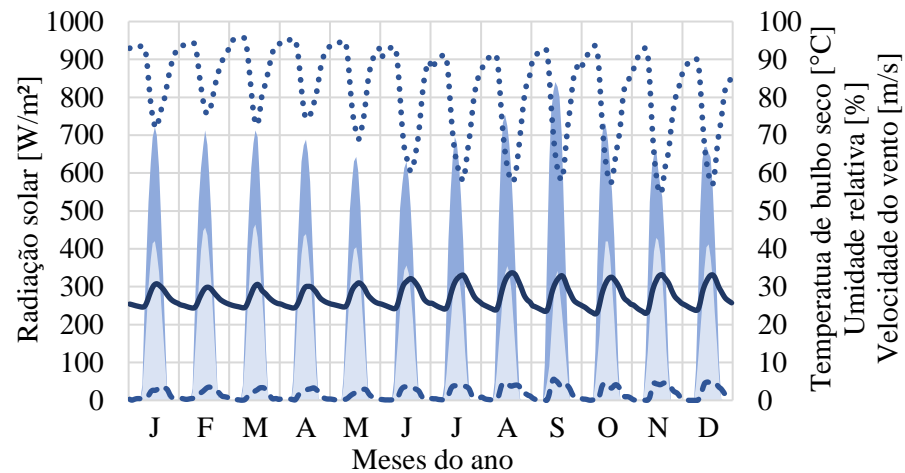
As características das principais variáveis climáticas de Belém são ilustradas nos gráficos das Figuras 31 a 33.

Figura 31 – Variáveis climáticas de Belém, em médias mensais horárias, conforme arquivo climático TRY e progressões para 2020, 2050 e 2080

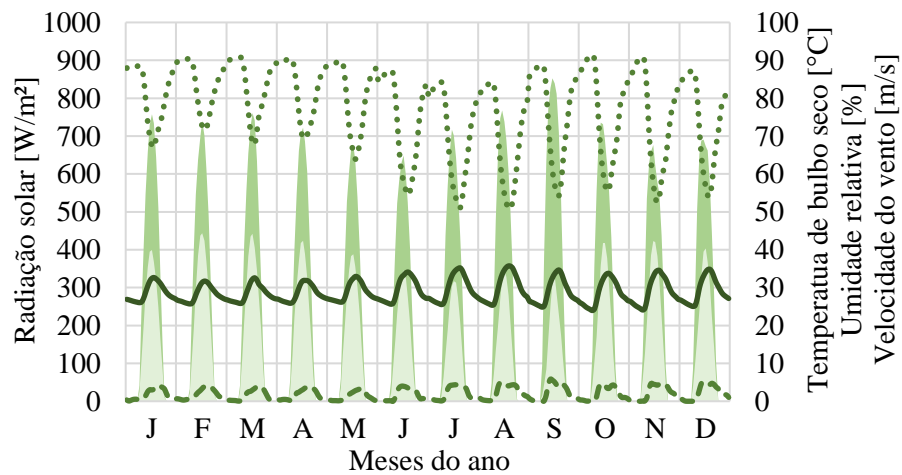
■ ■ Radiação solar global
 ■ ■ Radiação solar difusa
 — — Temperatura de bulbo seco
 ⋯ ⋯ Umidade relativa do ar
 - - - - - - Velocidade do vento



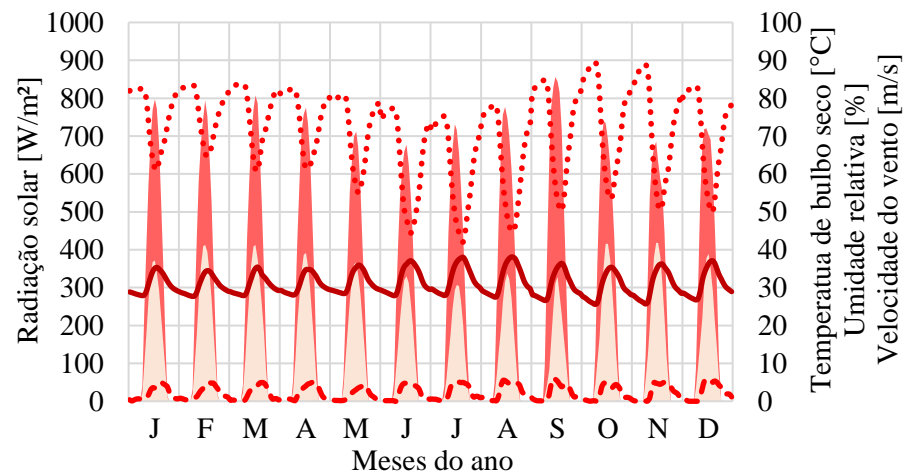
(a) TRY



(b) 2020



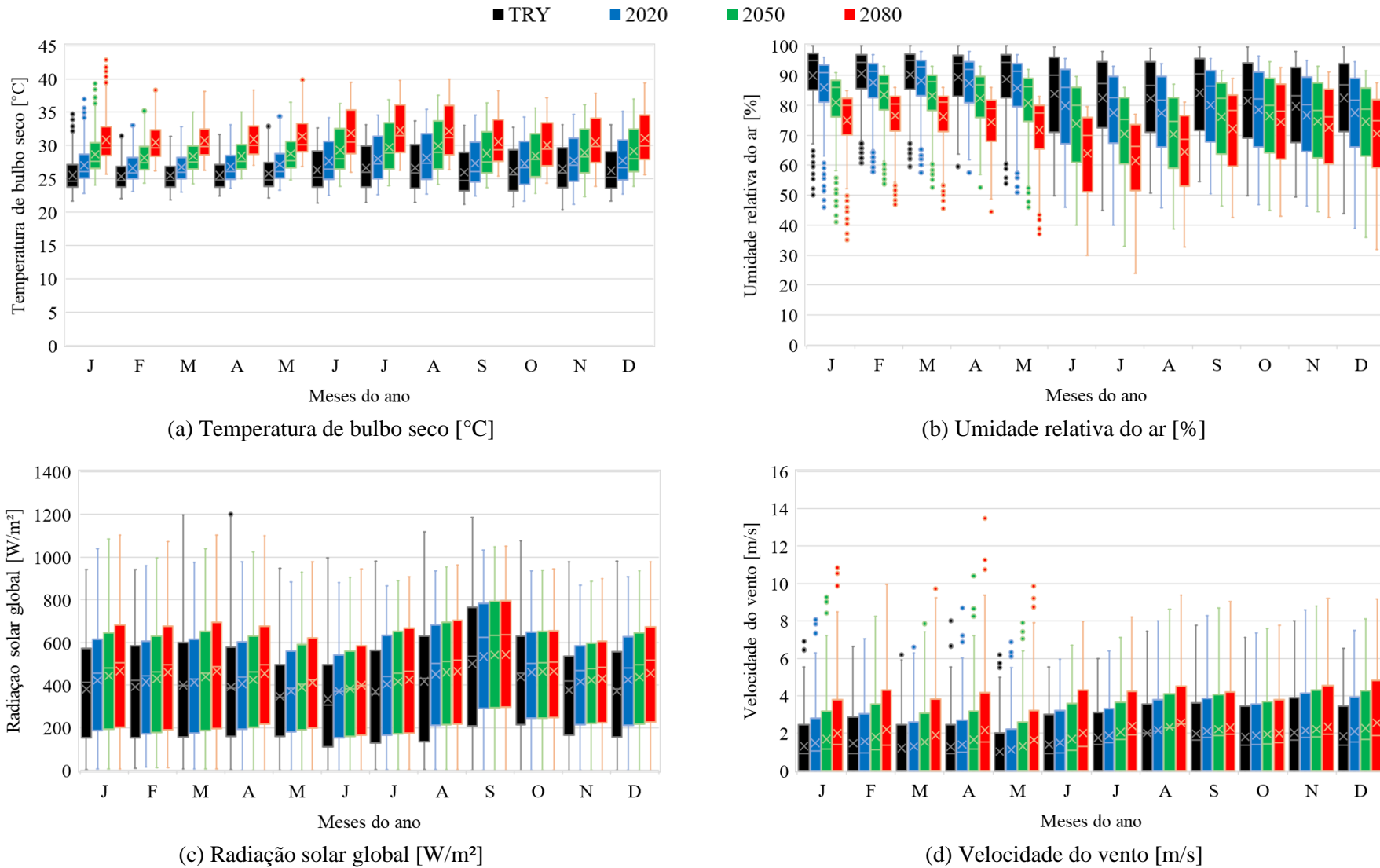
(c) 2050



(d) 2080

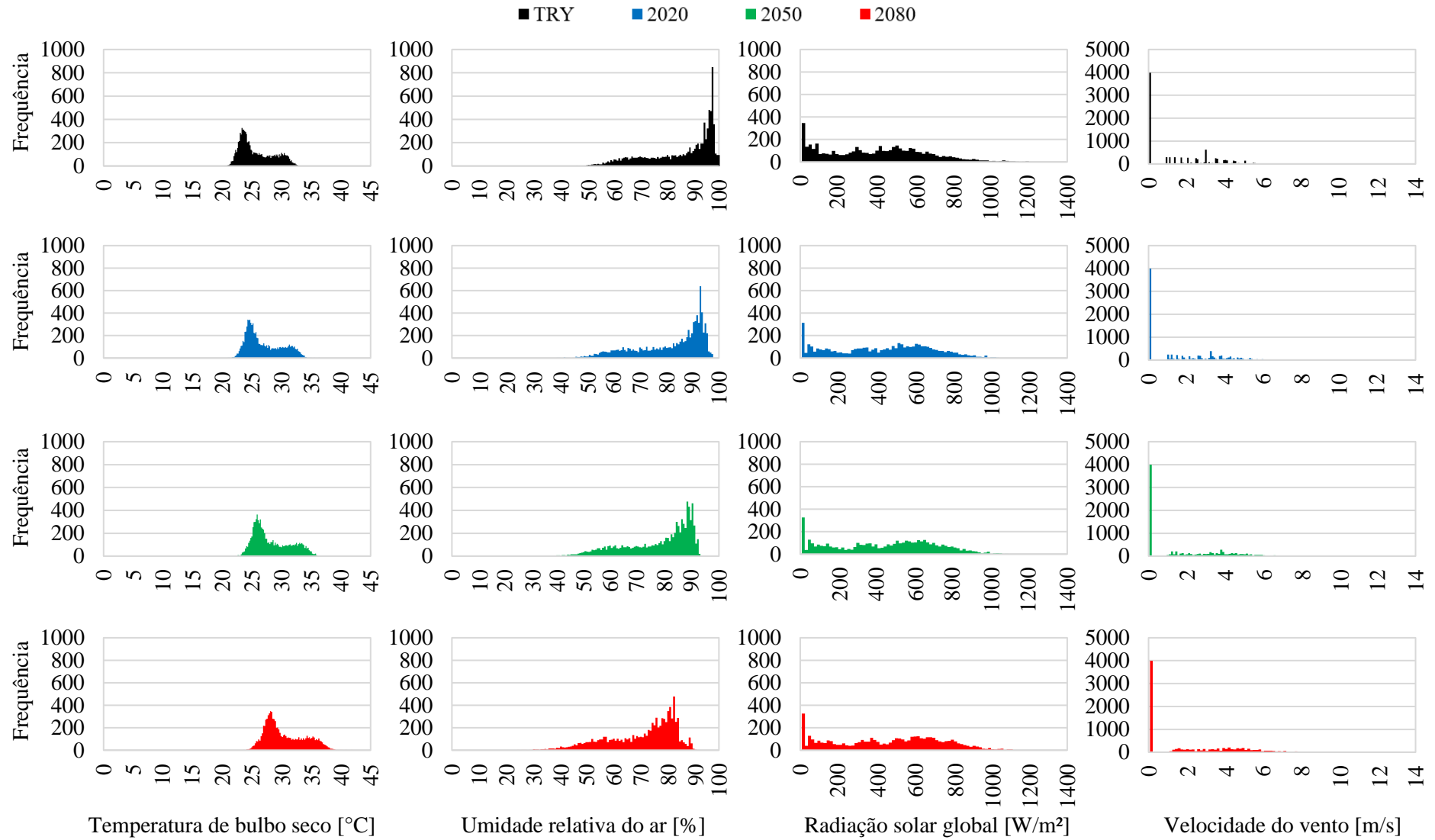
Fonte: o autor; elaborado a partir de dados de Carlo e Lamberts (2005) e Goulart, Lamberts e Firmino (1998)

Figura 32 – Diagramas de caixa para variáveis climáticas de Belém, conforme arquivo climático TRY e progressões para 2020, 2050 e 2080



Fonte: o autor; elaborado a partir de dados de Carlo e Lamberts (2005) e Goulart, Lamberts e Firmino (1998)

Figura 33 – Histogramas de frequência para variáveis climáticas de Belém, conforme arquivo climático TRY e progressões para 2020, 2050 e 2080



Fonte: o autor; elaborado a partir de dados de Carlo e Lamberts (2005) e Goulart, Lamberts e Firmino (1998)

Os resultados das progressões climáticas para Belém apontam que a temperatura média anual do ar aumentará, em relação aos dados TRY, 1,33 °C no período 2020, 2,88 °C no período 2050 e 5,06 °C no período 2080. Embora agosto (TRY, 2020 e 2050) e julho (2080) tendam a apresentar a temperatura média mensal mais elevada, é em janeiro que continuarão sendo alcançadas as temperaturas horárias mais altas em todos os quatro períodos, atingindo 42,83 °C até 2100. Por outro lado, a temperatura horária mínima, observada no mês de novembro, passará de 20,39 °C para 23,89 °C no até 2100, segundo as previsões realizadas.

Com relação à umidade relativa, a média anual passará de 85,48% (TRY), para 81,90% (2020), 77,31% (2050) e 71,15% (2080). Algumas alterações no comportamento da umidade relativa ao longo do ano podem ser observadas. Nos arquivos climáticos dos quatro períodos, os meses de janeiro a março apresentam as médias e médias das máximas mais altas, porém, segundo as previsões para o período 2080, serão os meses de setembro a novembro que apresentarão as maiores médias das máximas. Adicionalmente, no arquivo TRY, as menores médias de umidade relativa são observadas em agosto, outubro e novembro, enquanto a previsão do período 2080 aponta que as menores umidades em Belém acontecerão de julho a agosto. Os registros de frequência, que no arquivo TRY se concentram em números por volta de 96% e 98% de umidade relativa, se concentrarão números entre 80% e 85% de umidade relativa.

Por sua vez, a média anual da radiação solar global aumentará de 393,48 W/m² (TRY), para 424,26 W/m² (2020), 437,93 W/m² (2050) e 453,60 W/m² (2080). No arquivo TRY, a radiação solar possui valores médios mensais mais altos em setembro, outubro e agosto, enquanto a previsão para 2080 indica que as maiores médias ocorrerão em setembro, janeiro e agosto. A radiação solar difusa, que possui números maiores do que a direta na maior parte do ano pelos dados TRY, têm essa característica relativamente diminuída nos arquivos das progressões, onde a radiação solar direta é mais notável. Também é interessante relatar que os extremos superiores de radiação solar horária contida nos dados TRY nos meses de março a dezembro, diminuem nas progressões de 2020, 2050 e 2080. Portanto, observa-se que as progressões não seguem, necessariamente, elevações constantes, evidenciando que a ferramenta utiliza, de fato, alterações nos comportamentos climáticos de cenários diferentes no futuro.

Por último, as análises indicam que a média anual da velocidade do vento aumentará 0,13 m/s no período 2020, 0,30 m/s no período 2050 e 0,58 m/s no período 2080. Pelo arquivo TRY, os meses com maior média de velocidade do vento são agosto, novembro e setembro, enquanto as progressões para 2080 sugerem que os maiores registros ocorrerão em dezembro,

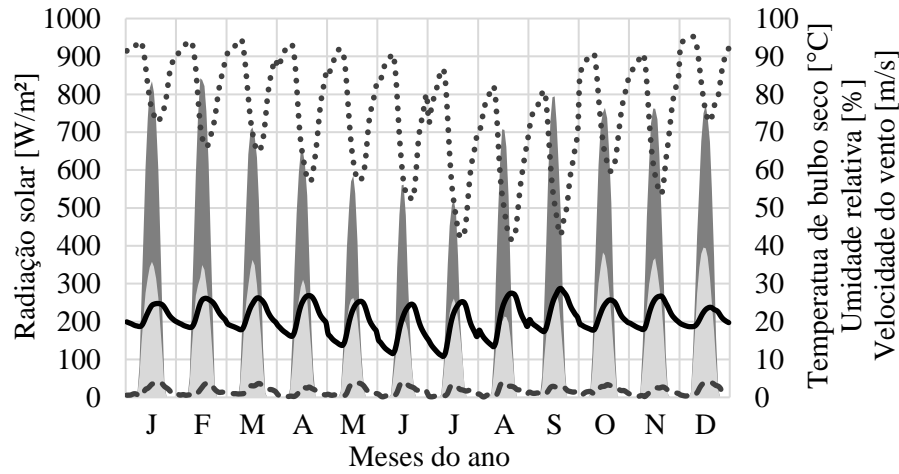
agosto e setembro. As velocidades máximas horárias alcançam 8 m/s, em abril, no arquivo TRY; enquanto o arquivo com a previsão para o período 2080 indica velocidades máximas de até 13,5 m/s, no mesmo mês, em Belém.

4.2.2 Brasília

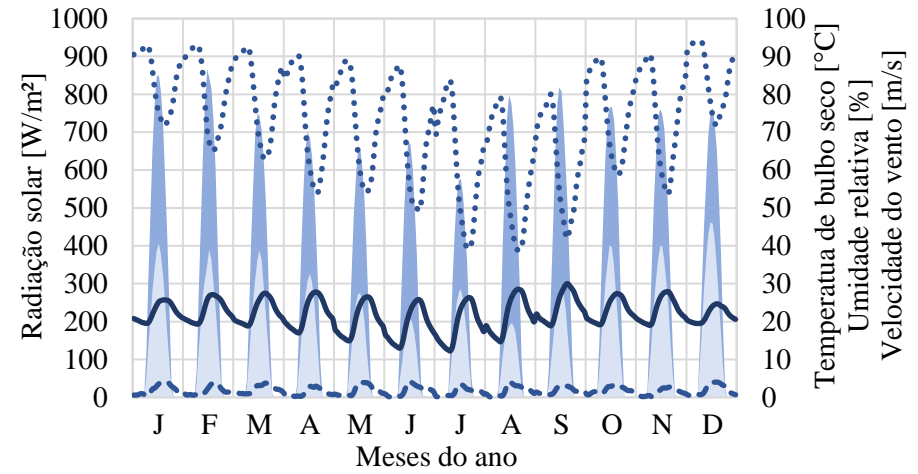
As características das principais variáveis climáticas de Brasília são ilustradas nos gráficos das Figuras 34 a 36.

Figura 34 – Variáveis climáticas de Brasília, em médias mensais horárias, conforme arquivo climático TRY e progressões para 2020, 2050 e 2080

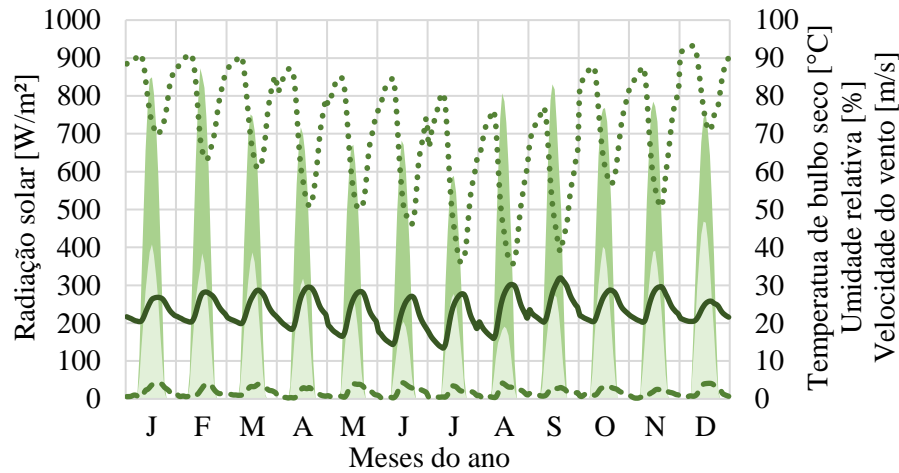
■ ■ Radiação solar global
 ■ ■ Radiação solar difusa
 — — Temperatura de bulbo seco
 ⋯ ⋯ Umidade relativa do ar
 - - - - - - Velocidade do vento



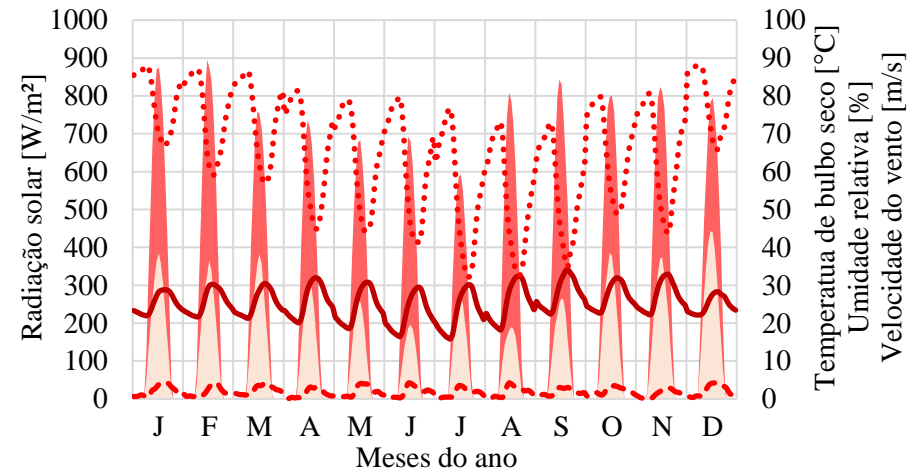
(a) TRY



(b) 2020



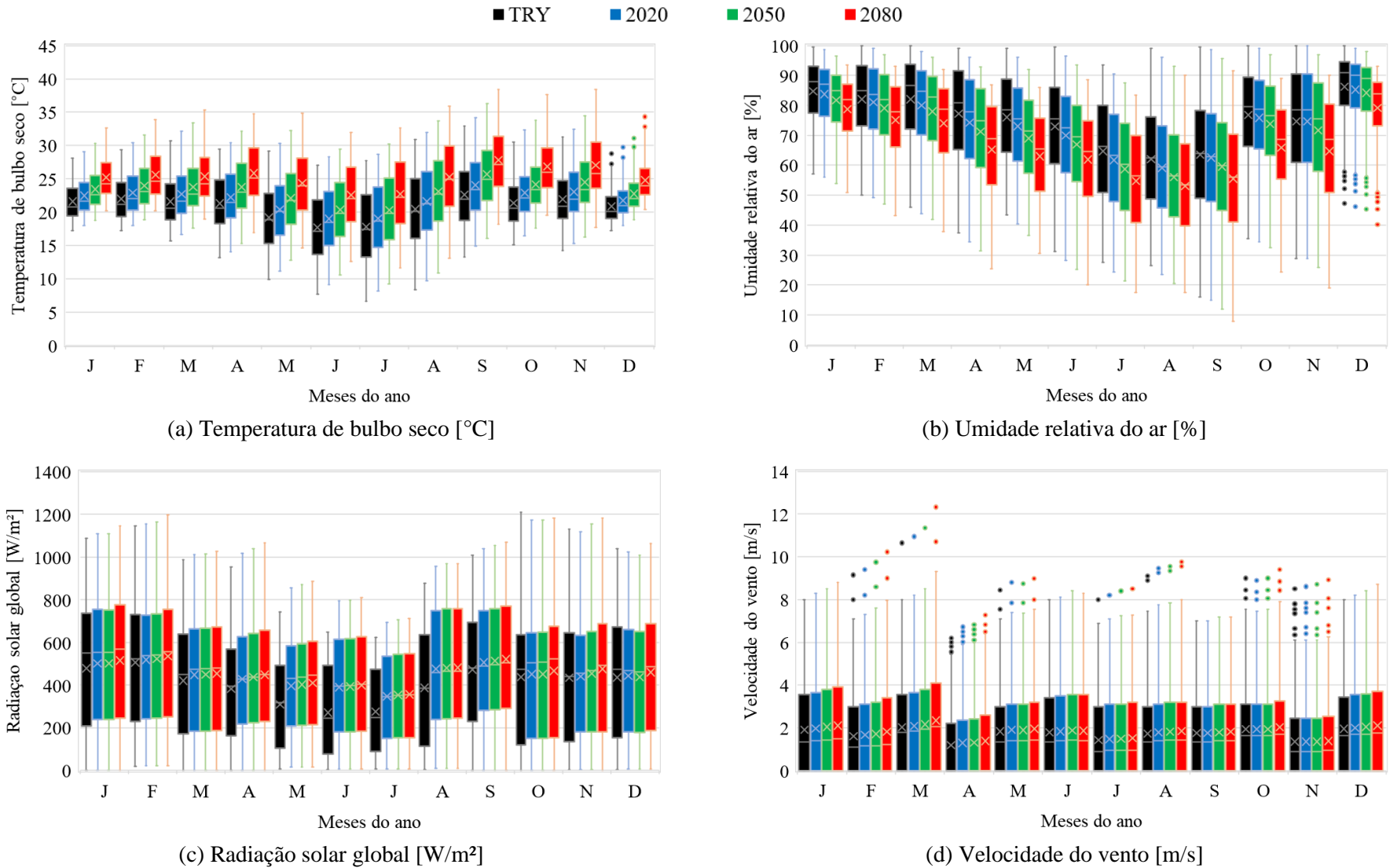
(c) 2050



(d) 2080

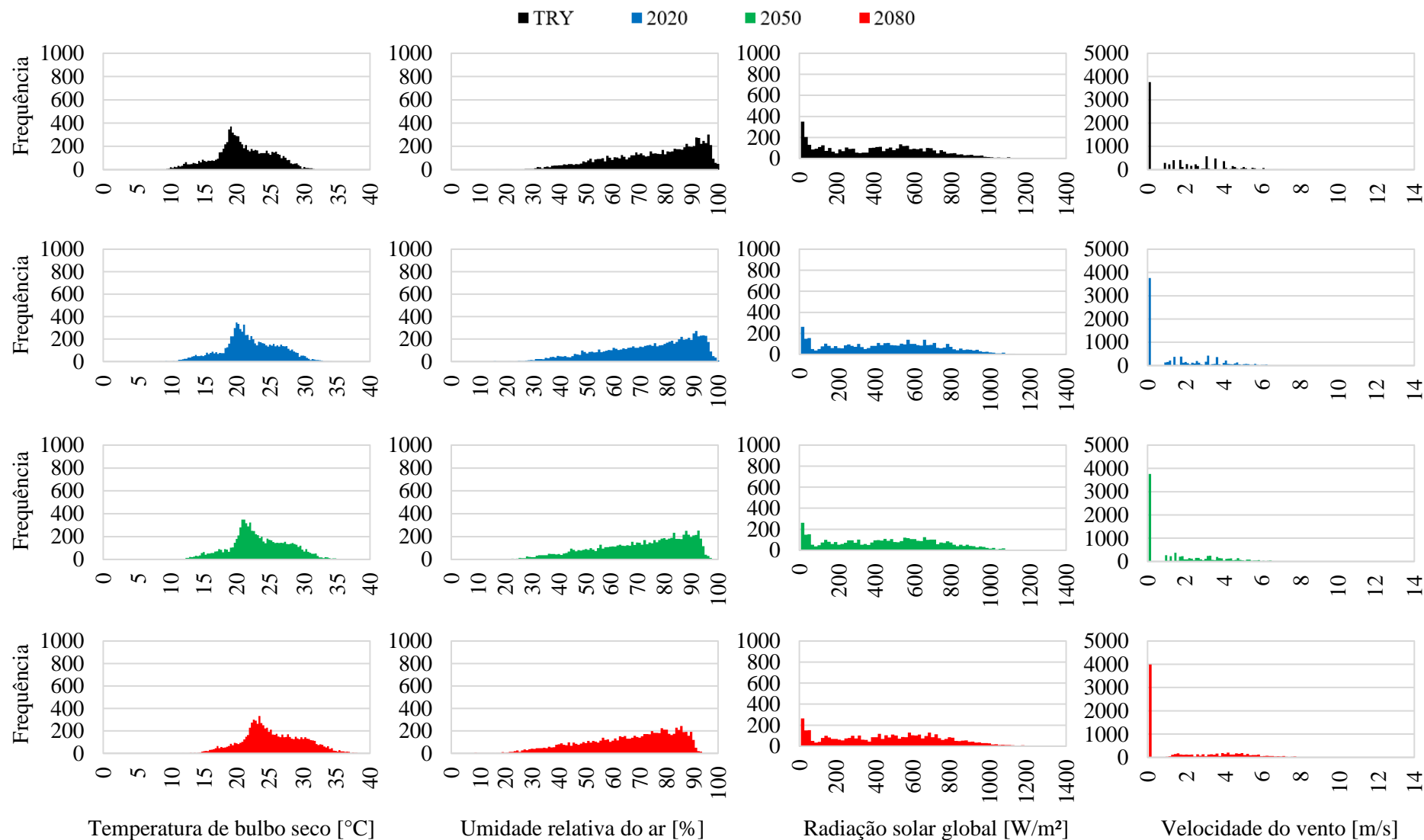
Fonte: o autor; elaborado a partir de dados de Carlo e Lamberts (2005) e Goulart, Lamberts e Firmino (1998)

Figura 35 – Diagramas de caixa para variáveis climáticas de Brasília, conforme os períodos climáticos



Fonte: o autor; elaborado a partir de dados de Carlo e Lamberts (2005) e Goulart, Lamberts e Firmino (1998)

Figura 36 – Histogramas de frequência para variáveis climáticas de Brasília, conforme os períodos climáticos



Fonte: o autor; elaborado a partir de dados de Carlo e Lamberts (2005) e Goulart, Lamberts e Firmino (1998)

Em Brasília, as progressões realizadas indicam que a temperatura média anual do ar aumentará 1,14 °C no período 2020, 2,46 °C no período 2050 e 4,60 °C no período 2080. Setembro, novembro e novembro são os meses mais quentes nos quatro períodos, sendo que a máxima horária, que é 32,96 °C no arquivo TRY, pode chegar a 38,46 °C até 2100. Em contrapartida, as temperaturas mínimas, observadas em junho, julho e maio, que alcançam cerca de 7,67 °C no arquivo TRY, chegarão a 12,57 °C, conforme as previsões analisadas.

A média anual da umidade relativa sofrerá redução, passando de 75,27% no período do TRY, para 73,43% no período 2020, 70,84% no período 2050 e 65,93% no período 2080. Brasília é uma das cidades com clima mais seco do centro oeste brasileiro. No arquivo TRY, observa-se que a umidade relativa da cidade alcança números inferiores à 30% nos meses mais secos, como setembro, agosto e julho. Conforme as progressões climáticas, espera-se que a umidade relativa alcance valores inferiores a 10%, em setembro.

Com relação à radiação solar, a média anual da radiação global aumentará de 401,30 W/m² no período do TRY, para 445,86 W/m² no período 2020, 449,93 W/m² no período 2050 e 460,63 W/m² no período 2080. Alguns destaques podem ser feitos sobre o comportamento das progressões climáticas desta variável. Fevereiro, janeiro e setembro são os meses com maiores indicadores. As progressões não são tão expressivas nos meses de outubro a fevereiro. Além disso, de março a setembro, a elevação radiação solar é acentuada apenas no período 2020; nos outros períodos, a radiação solar é mais “estável”. Percebe-se, também, que em relação ao arquivo TRY, a média das máximas em novembro e dezembro tende a diminuir no período 2020, assim como os valores horários máximos de outubro a dezembro.

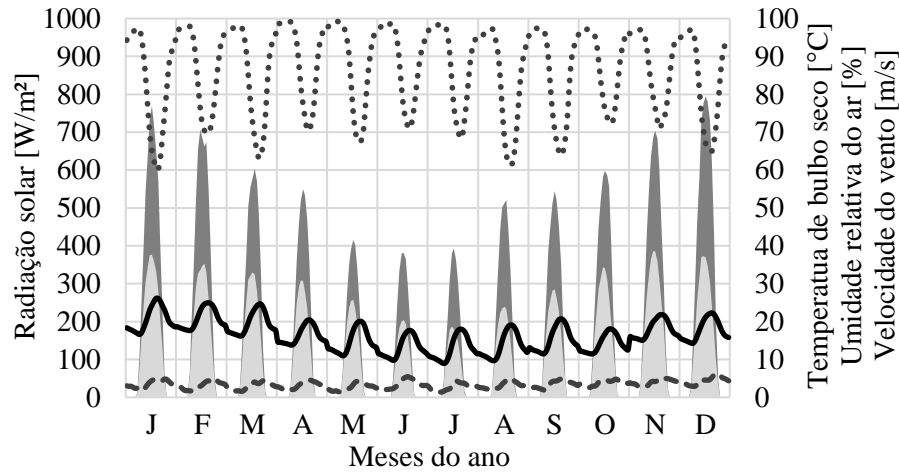
As progressões da velocidade do vento apontam que a média anual desta variável passará de 1,71 m/s, no arquivo TRY, para 1,76 m/s no período 2020, 1,79 m/s no período 2050 e 1,85 m/s no período 2080. A velocidade do vento é maior nos meses de janeiro, março e dezembro, quando se atingem velocidades de cerca de 8 m/s no arquivo TRY. Já segundo as progressões, até 2100, os números de velocidade do vento chegarão a cerca de 12 m/s em março. Vale destacar que, analogamente ao observado para a variável radiação solar, em meses como de maio a novembro, os números médios de velocidade do vento não alteram significativamente, demonstrando certa estabilidade, conforme os avanços no tempo.

4.2.3 Curitiba

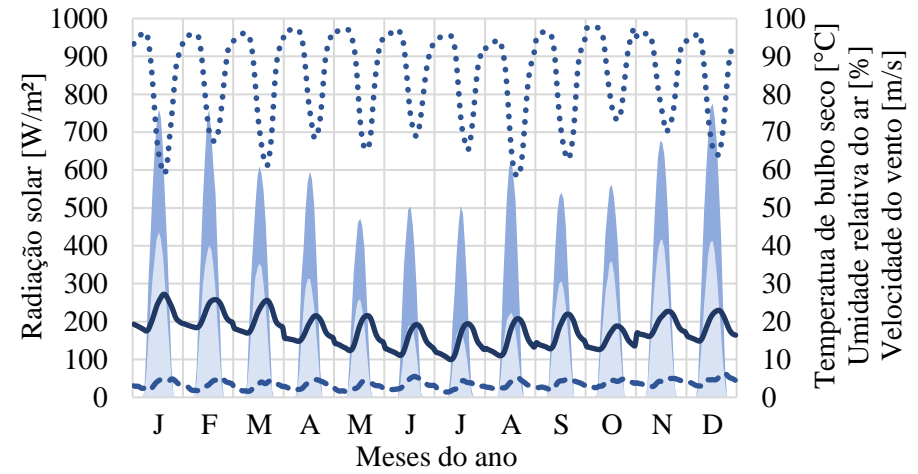
As características das principais variáveis climáticas de Curitiba são ilustradas nos gráficos das Figuras 37 a 39.

Figura 37 – Variáveis climáticas de Curitiba, em médias mensais horárias, conforme arquivo climático TRY e progressões para 2020, 2050 e 2080

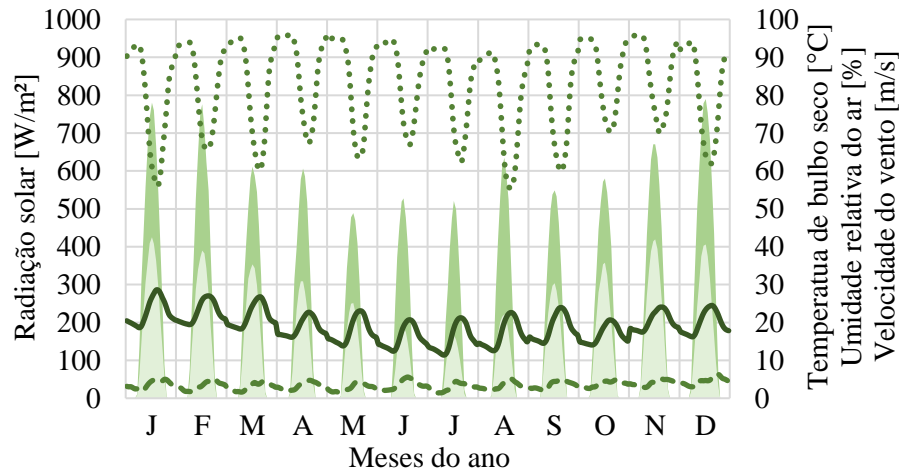
■ ■ Radiação solar global
 ■ ■ Radiação solar difusa
 — — Temperatura de bulbo seco
 ⋯ ⋯ Umidade relativa do ar
 - - - - - - Velocidade do vento



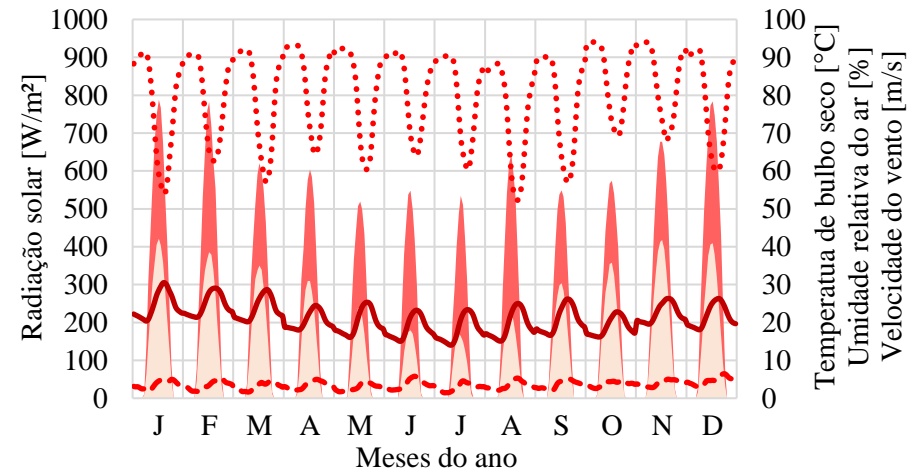
(a) TRY



(b) 2020



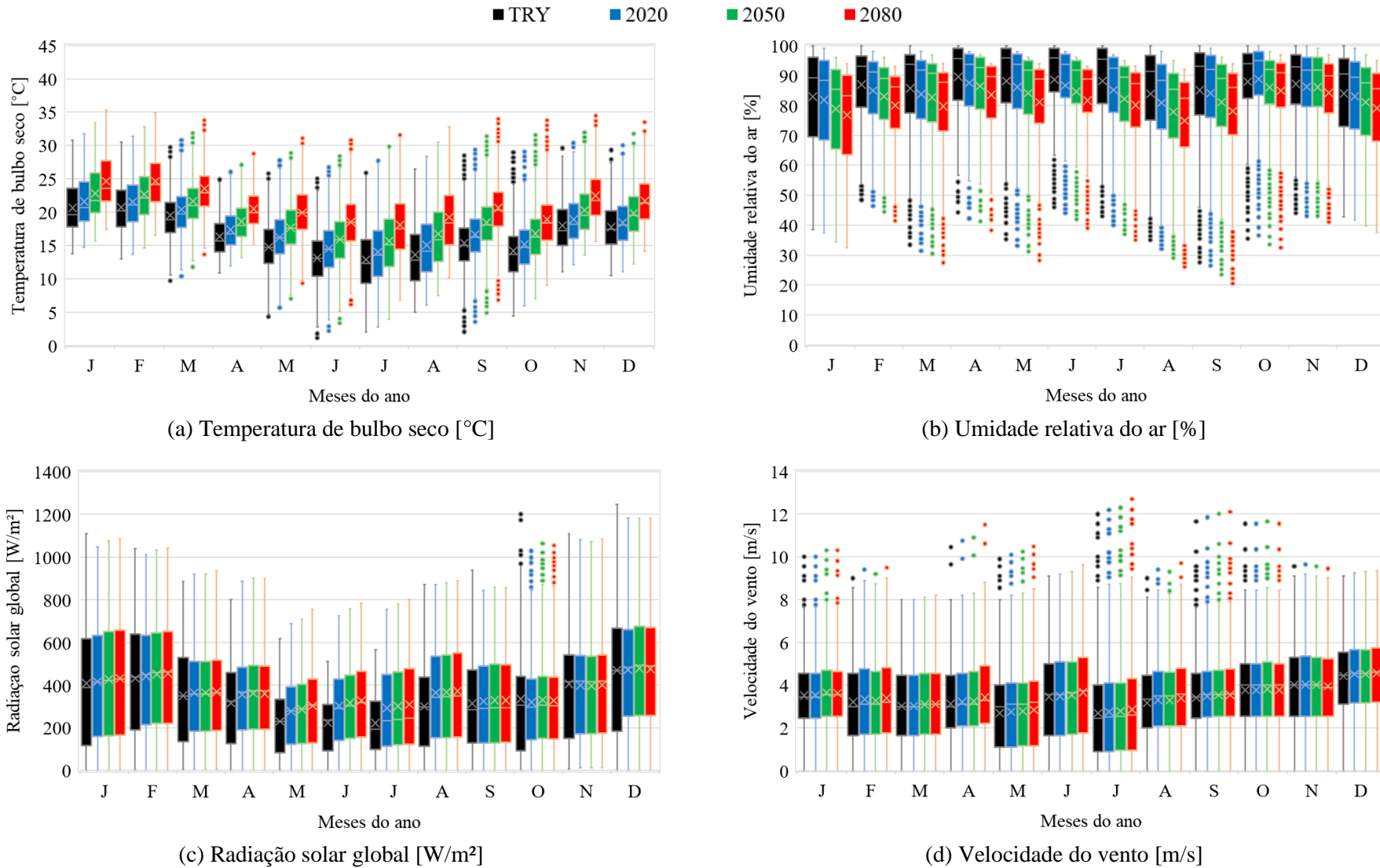
(c) 2050



(d) 2080

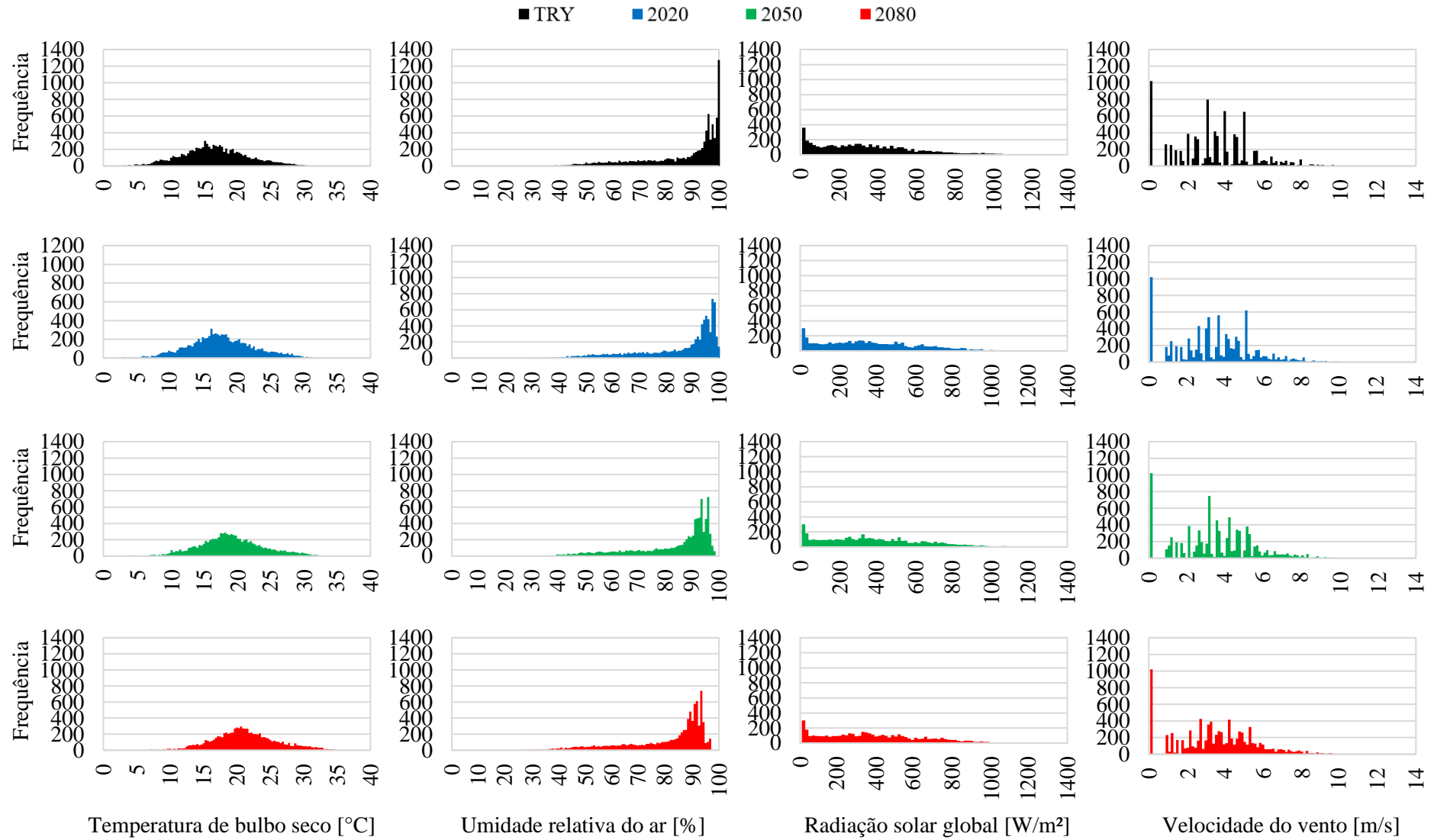
Fonte: o autor; elaborado a partir de dados de Carlo e Lamberts (2005) e Goulart, Lamberts e Firmino (1998)

Figura 38 – Diagramas de caixa para variáveis climáticas de Curitiba, conforme os períodos climáticos



Fonte: o autor; elaborado a partir de dados de Carlo e Lamberts (2005) e Goulart, Lamberts e Firmino (1998)

Figura 39 – Histogramas de frequência para variáveis climáticas de Curitiba, conforme os períodos climáticos



Fonte: o autor; elaborado a partir de dados de Carlo e Lamberts (2005) e Goulart, Lamberts e Firmino (1998)

Conforme as progressões apresentadas para Curitiba, a temperatura média anual do ar aumentará 1,08 °C no período 2020, 2,52 °C no período 2050 e 4,65 °C no período 2080. De modo geral, as progressões de temperatura de bulbo seco, principalmente, alertam para uma mudança expressiva do comportamento climático de Curitiba, conhecida por ser uma capital fria na maior parte do ano. Segundo os dados TRY, nos meses mais frios, como junho e julho, a média das mínimas chegam a 10 °C. Porém, por meio da progressão até 2100, a média das mínimas nesses mesmos meses ficarão em torno de 15 °C. Além disso, as temperaturas máximas do arquivo TRY não chegam a 30 °C, mas poderão alcançar até 35 °C no período 2080. Os histogramas de frequência também ilustram bem as importantes mudanças na temperatura, uma vez que o TRY concentra números perto de 15 °C e o período 2080 concentra números perto de 20 °C. Essas alterações na temperatura de bulbo seco podem ser notadamente impactantes no desempenho termoenergético de edificações no futuro, visto que as soluções, ao invés de atenderem baixas temperaturas, deverão abranger um clima mais quente.

Além disso, a média anual da umidade relativa do ar sofrerá redução de 86,52% no período do arquivo TRY, para 84,92% no período 2020, 82,84% no período 2050 e 80,35% no período 2080. Os números de umidade relativa disponíveis no arquivo climático TRY, que acompanham a característica de um clima ameno como o de Curitiba, sofrerão alterações que merecem destaque. No arquivo TRY, os meses de abril, maio e junho apresentam umidade relativa elevada, mantendo valores de 100% em boa parte das horas. As progressões até 2100, porém, indicam redução da umidade relativa do ar, sendo que valores de 100% não serão mais observados no futuro. Embora o clima de Curitiba mantenha umidade relativamente elevada, em comparação com outras regiões do Brasil, percebe-se que as progressões sugerem que os valores de umidade possam atingir valores mínimos de cerca de 20% em setembro. Essas alterações no comportamento climático também podem ser percebidas pelos histogramas, que mostram que a frequência máxima de umidade relativa deixará de ser 100% no futuro.

As progressões mostram, também, que a média anual da radiação solar global aumentará de 334,12 W/m² no período TRY, para 360,85 W/m² no período 2020, 367,84 W/m² no período 2050 e 371,92 W/m² no período 2080. Observa-se que a elevação da radiação solar é mais acentuada nos meses mais frios, como maio, junho e julho. Além disso, percebe-se que as mudanças mais expressivas ocorrem no período 2020, sendo que nos demais períodos futuros as mudanças são mais amenas na maior parte do ano. Nas progressões até 2100, nota-se que a radiação solar direta aumenta mais significativamente, em relação à radiação solar difusa.

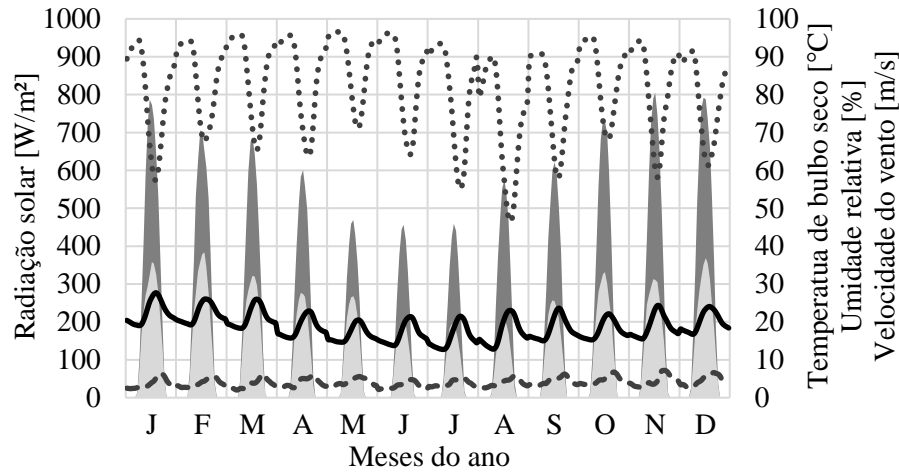
Por sua vez, as análises indicam que a média anual da velocidade do vento passará de 3,37 m/s no arquivo TRY, para 3,43 m/s no período 2020, 3,46 m/s no período 2050 e 3,51 m/s no período 2080. Os meses de dezembro, novembro e outubro apresentam as maiores médias de velocidade, porém os extremos horários de velocidade são observados nos meses de julho e setembro. Nesse sentido, as previsões sugerem um relativo aumento nos valores da velocidade do vento nos meses de fevereiro a julho, enquanto nos demais meses as variações são menos significativas. Além disso, os histogramas mostram que a distribuição da frequência da velocidade do vento, que é mais alternada no arquivo TRY, passará a ser concentrada em valores próximos de 3 a 5 m/s.

4.2.4 São Paulo

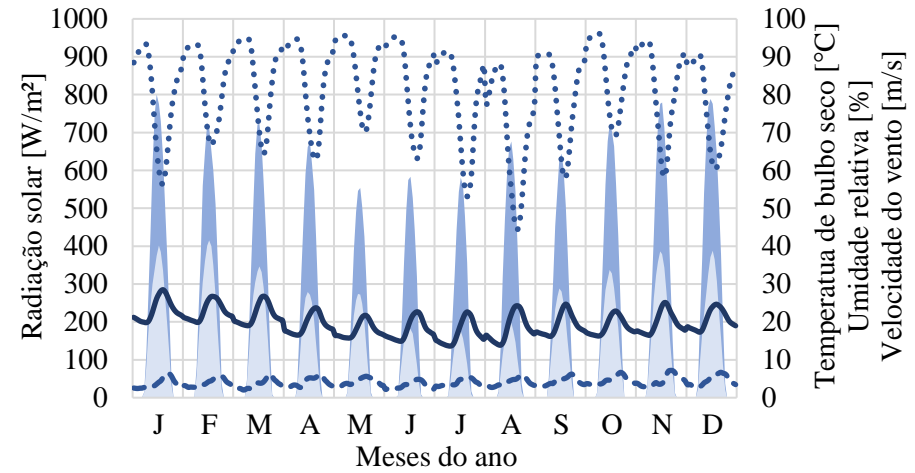
As características das principais variáveis climáticas de São Paulo são ilustradas nos gráficos das Figuras 40 a 42.

Figura 40 – Variáveis climáticas de São Paulo, em médias mensais horárias, conforme arquivo climático TRY e progressões para 2020, 2050 e 2080

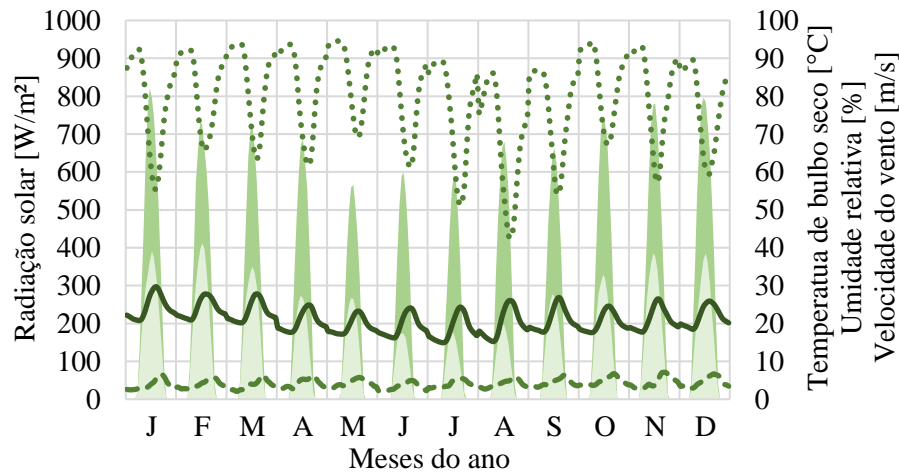
■ ■ Radiação solar global ■ ■ Radiação solar difusa — — Temperatura de bulbo seco ⋯ ⋯ Umidade relativa do ar - - - - - - Velocidade do vento



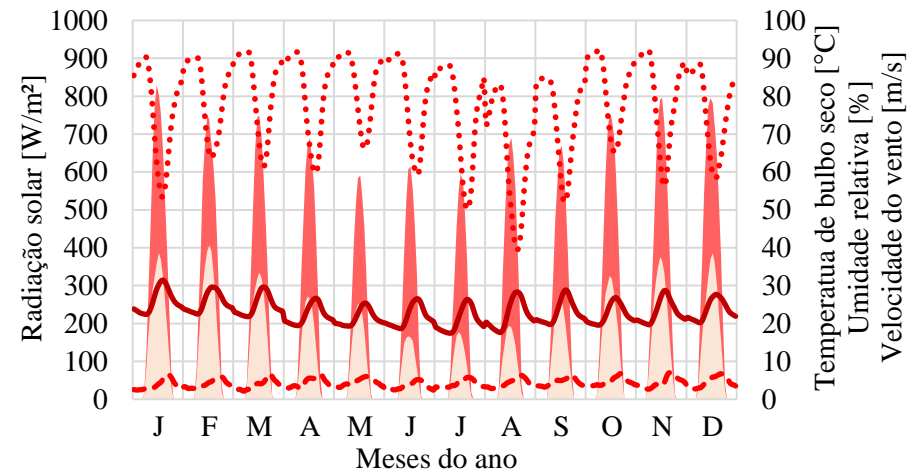
(a) TRY



(b) 2020



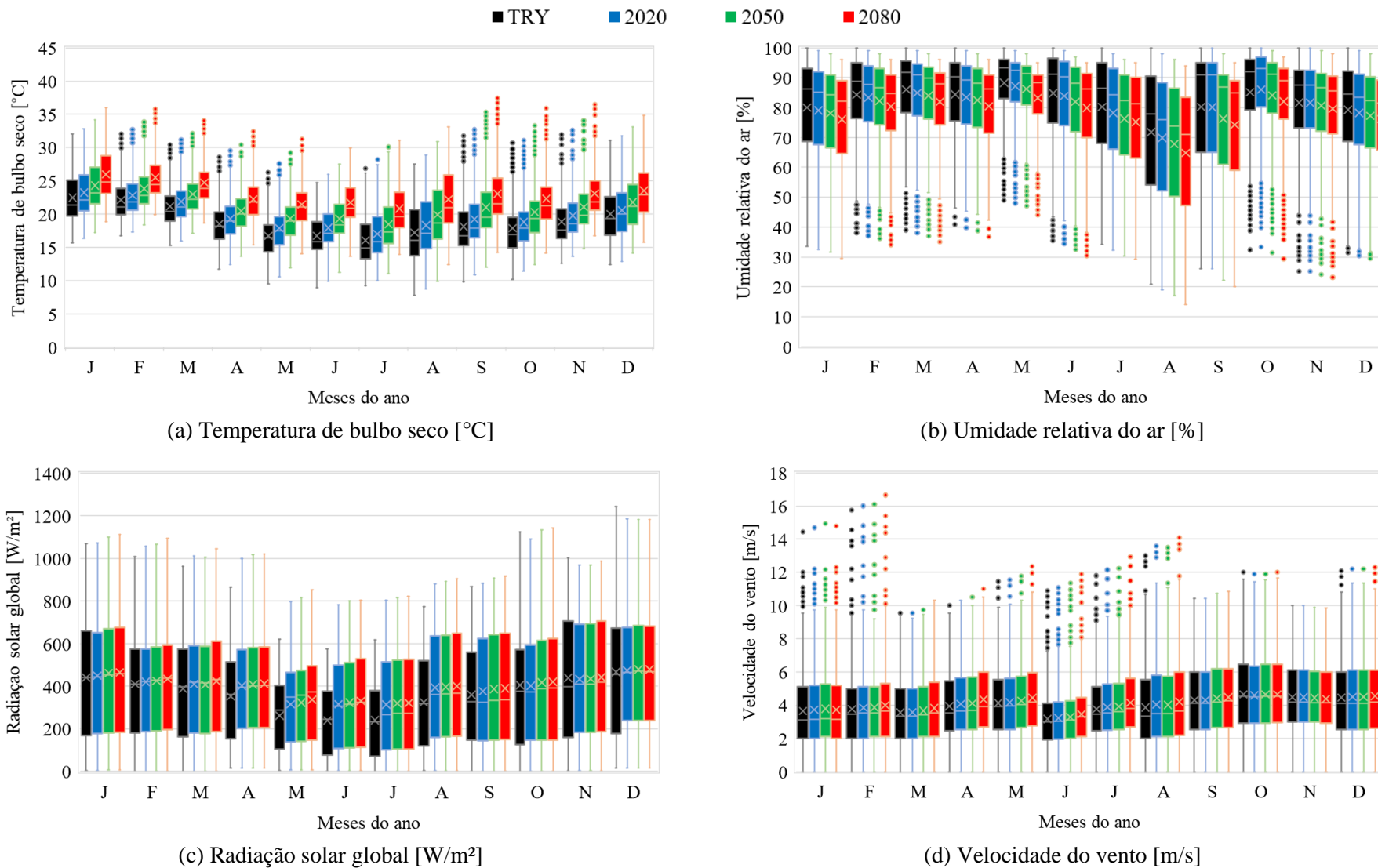
(c) 2050



(d) 2080

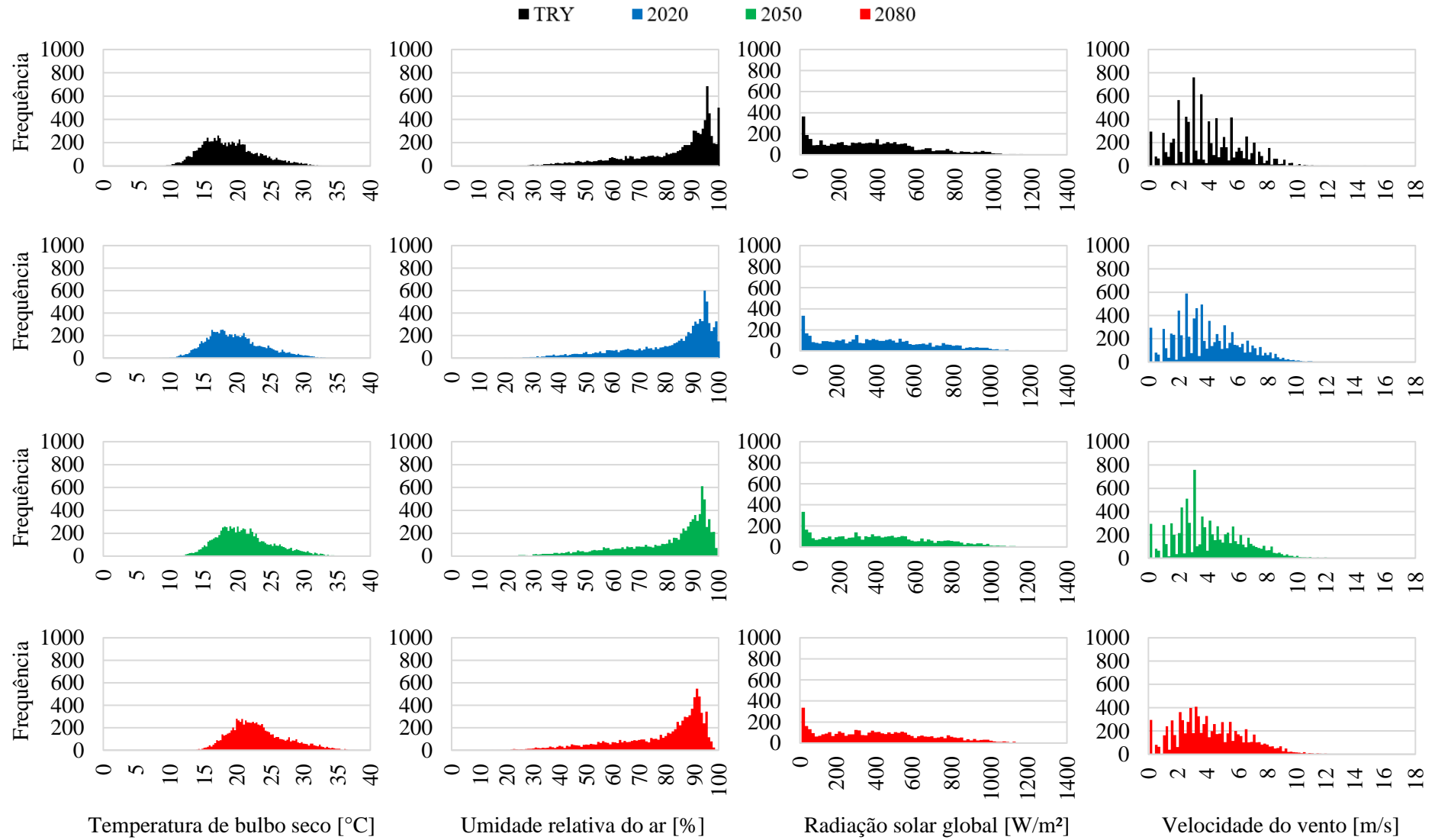
Fonte: o autor; elaborado a partir de dados de Carlo e Lamberts (2005) e Goulart, Lamberts e Firmino (1998)

Figura 41 – Diagramas de caixa para variáveis climáticas de São Paulo, conforme os períodos climáticos



Fonte: o autor; elaborado a partir de dados de Carlo e Lamberts (2005) e Goulart, Lamberts e Firmino (1998)

Figura 42 – Histogramas de frequência para variáveis climáticas de São Paulo, conforme os períodos climáticos



Fonte: o autor; elaborado a partir de dados de Carlo e Lamberts (2005) e Goulart, Lamberts e Firmino (1998)

Em relação aos dados do arquivo TRY de São Paulo, o aumento da temperatura média anual do ar é estimado em 0,91 °C no período 2020, 2,24 °C no período 2050, e 4,23 °C no período 2080. Ademais, a temperatura mínima, observada em julho, passará de 16,05 °C para 20,81 °C até 2100, enquanto a máxima, observada em janeiro, passará de 22,47 °C para 25,99 °C. De modo análogo ao observado para Curitiba, percebe-se que as progressões também sugerem ser mais relevantes no inverno, quando se tem temperatura média das mínimas inferior à 15 °C pelo TRY, e próxima de 20 °C pela progressão para 2080. As progressões apontam que a frequência da temperatura de bulbo seco deixará de estar concentrada entre 15 e 20 °C, e passará a estar concentrada entre 20 e 25 °C.

Nota-se um declínio constante dos indicadores de umidade relativa de São Paulo, conforme o passar dos anos. Segundo as progressões, até 2100 o valor mensal médio máximo será de 83,25%, em maio, e o valor mensal médio mínimo será 64,85%, em agosto. Ademais, de acordo com os resultados, estima-se que a média anual passará de 82,17%, no arquivo TRY, para 77,84%, até 2100. O mês de agosto é o mais seco do clima paulistano, chegando a atingir umidade relativa horária mínima perto de 20%, no arquivo com dados TRY; no arquivo com a previsão para 2080, esse indicador chega a menos de 15%.

As médias anuais de radiação solar global estimadas são de 360,74 W/m² (TRY), 392,53 W/m² (2020), 398,65 W/m² (2050) e 404,91 W/m² (2080). Segundo a estimativa das progressões, a radiação média mensal máxima passará de 466,12 W/m² (TRY) para 478,52 W/m² (2080) até 2100, enquanto a mínima passará de 239,64 W/m² (TRY) para 322,07 W/m² (2080). A elevação nessa variável climática também é mais acentuada no período mais frio do ano, sendo que as maiores mudanças, em relação aos dados TRY, ocorrem nas progressões para o período 2020. Adicionalmente, percebe-se que em alguns meses as variações devido às progressões são mínimas, e a radiação solar global poderá, inclusive, diminuir no mês de novembro.

Por último, a média anual da velocidade do vento passará de 3,98 m/s, no arquivo TRY, para 4,03 m/s no período 2020, 4,08 m/s no período 2050 e 4,18 m/s no período 2080. Os meses de outubro, novembro e dezembro apresentam as maiores médias de velocidade, embora os extremos horários de velocidade sejam observados em fevereiro e janeiro. Os gráficos das previsões até 2100, indicam que a velocidade do vento sofrerá aumento mais significativo nos meses mais frios, sendo que na maior parte do ano a velocidade do vento não sofrerá variações expressivas em São Paulo. Adicionalmente, os histogramas mostram que a distribuição da frequência da velocidade do vento passará a ser relativamente mais constante no período 2080.

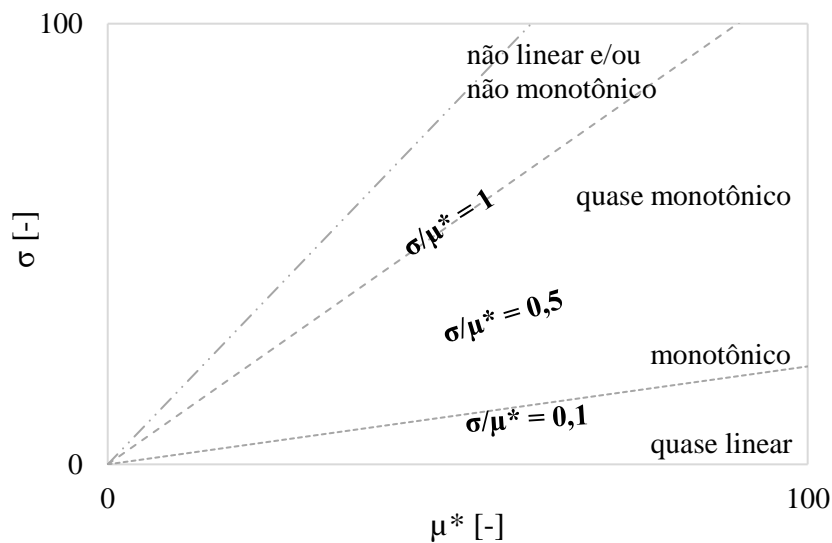
4.3 SENSIBILIDADE GLOBAL DE PARÂMETROS TERMOFÍSICOS E MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Nesta seção, apresentam-se os resultados dos Efeitos Elementares de Morris para os parâmetros termofísicos investigados, conforme cada cidade e período climático. As análises de sensibilidade apresentadas ajudam a entender a propagação de incertezas e permitem identificar a influência das variáveis no desempenho térmico e energético, de modo que projetistas possam planejar estratégias construtivas para a vida útil de habitações.

A seguir, em complemento ao que fora exposto no Item 3.3.3.1, salientam-se algumas observações gerais sobre a apresentação dos resultados e como interpretar os índices de sensibilidade de Morris nos gráficos ilustrados nesta dissertação. Se necessário, recomenda-se que a explicação apresentada no Item 3.3.3.1 seja lida novamente, para melhor entendimento dos resultados. Esta compreensão é importante para que o leitor consiga: aprender o que o comportamento dos índices indica sobre a resposta do modelo; e desenvolver um pouco de autonomia sobre o entendimento dos dados, visto que, para a leitura do texto não ficar demasiadamente exaustiva, por causa do grande volume de informações, a explanação dos resultados ao longo desta seção é focada em pontos mais relevantes.

Em resumo, a plotagem da média absoluta e do desvio padrão possibilita identificar os parâmetros termofísicos que podem ser consideradas como tendo um efeito: **negligenciável (média baixa, desvio padrão baixo); linear e aditivo (média alta, desvio padrão baixo); ou não linear ou com interações com outros parâmetros de entrada (desvio padrão alto)**. Por sua vez, **o sinal da média é útil para compreender os efeitos negativos e positivos das variáveis independentes nas variáveis dependentes**. Adicionalmente, **a partir da relação σ/μ e σ/μ^* , é possível classificar as variáveis, em termos de linearidade, monotonicidade e possíveis interações de parâmetros**, conforme ilustra-se no gráfico genérico da Figura 43, que possibilita uma identificação visual simplificada do esquema de classificação.

Figura 43 – Esquema genérico de áreas de classificação de parâmetros, a partir da relação σ/μ^*



Fonte: o autor

4.3.1 Resultados para os Climas de cada Cidade

Nos subitens a seguir, apresentam-se os resultados para cada cidade, seguindo-se um mesmo padrão de apresentação: gráficos com as médias μ e μ^* , e desvio padrão σ , dos efeitos elementares para os indicadores GHA, GHR, CA, CR, e I_{eq} , seguidos de um quadro resumo com a medida de sensibilidade de Morris para as variáveis independentes em todas as variáveis dependentes, conforme cada período climático.

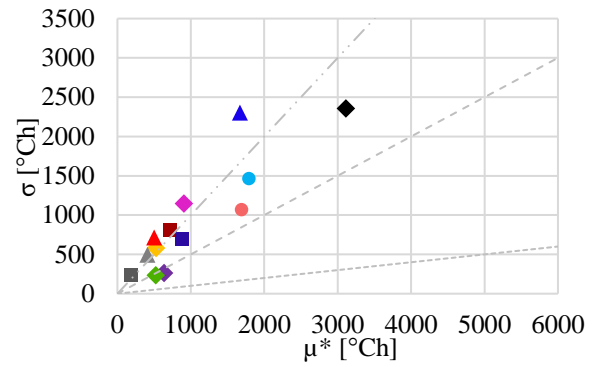
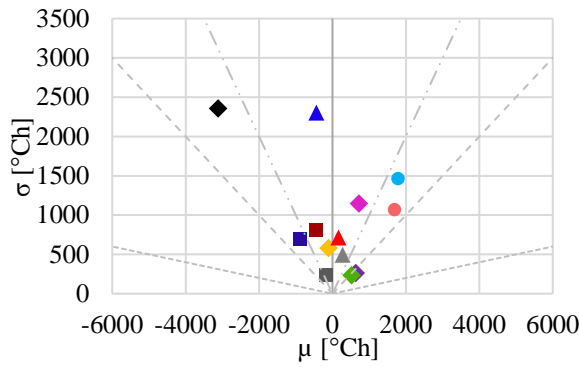
Destaca-se que o indicador I_{eq} consiste em agregações baseadas nos graus-horas e no consumo de energia, que podem causar algumas “distorções” às análises. Apesar dessa possível desvantagem, esse indicador agregado é importante para o entendimento e objetividade das conclusões acerca do desempenho térmico e energético do ambiente construído. Nesse âmbito, é evidente que os parâmetros termofísicos mais importantes para o desempenho podem divergir quando se analisa os graus-hora ou o consumo de energia. Logo, convém frisar que o projetista, por exemplo, pode trabalhar com os resultados para os indicadores separadamente, de acordo com o indicador de desempenho que ele achar mais adequado ao uso e operação da habitação em pauta (por exemplo, se a habitação está sendo projetada para ser operada com ventilação exclusivamente natural em um clima quente, os resultados da análise de sensibilidade para o indicador GHR podem ser mais interessantes para melhores soluções).

4.3.1.1 Belém

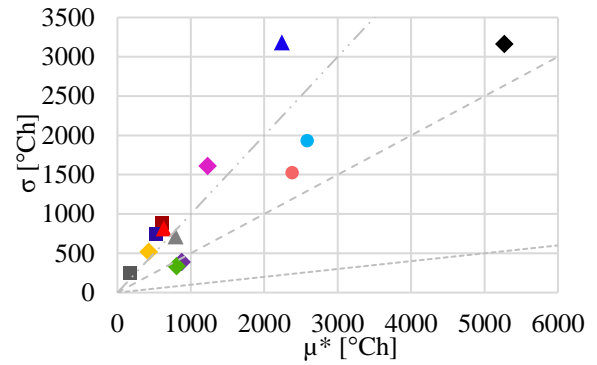
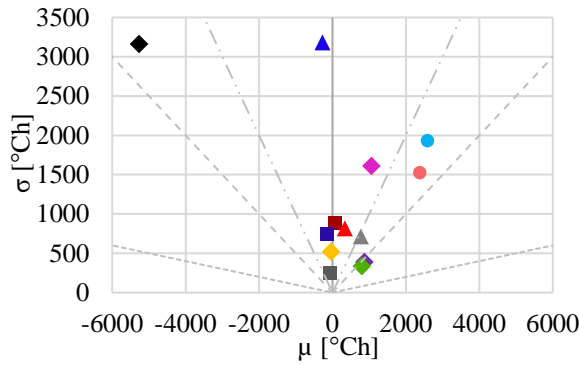
Nas Figuras 44 a 46, e no Quadro 6, apresentam-se os resultados das análises de sensibilidade para Belém. Devido ao clima quente da capital paraense, os indicadores GHA e CA foram nulos em todos os períodos climáticos analisados.

Figura 44 – Índices de sensibilidade para o indicador GHR, em cada período climático de Belém

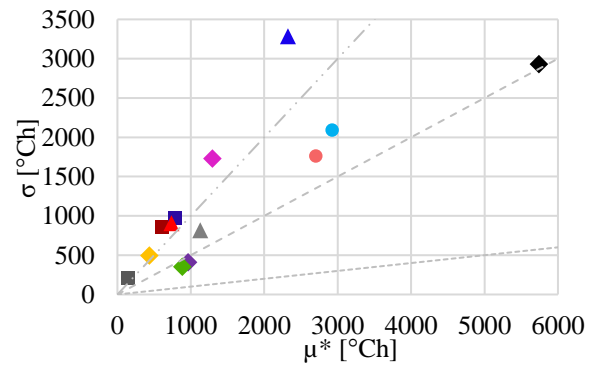
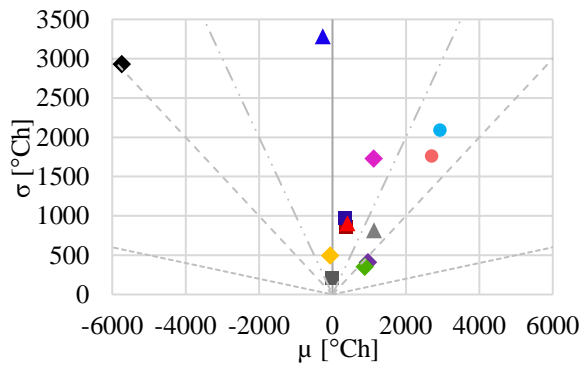
● acob ● apar ■ CTcob ■ CTpar ■ CTpis ◆ ecob ◆ Fvent ◆ FSvid ◆ OS ◆ tvenez ▲ Ucob ▲ Upar ▲ Upis
 - - - σ/μ ou $\sigma/\mu^* = 1$ - - - σ/μ ou $\sigma/\mu^* = 0,5$ - - - σ/μ ou $\sigma/\mu^* = 0,1$



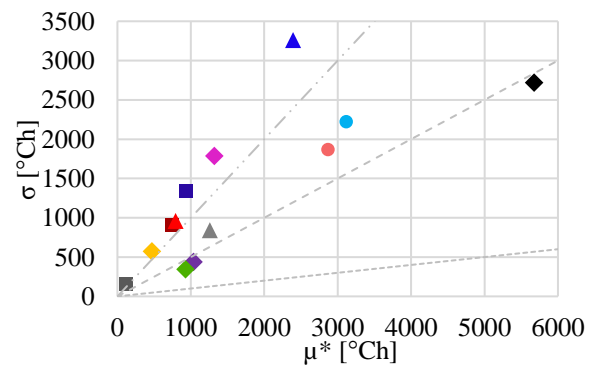
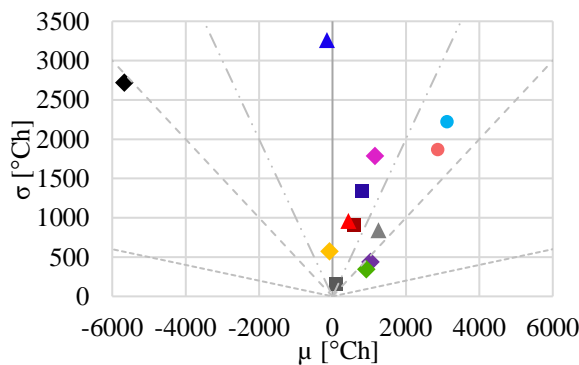
(a) TRY



(b) 2020



(c) 2050

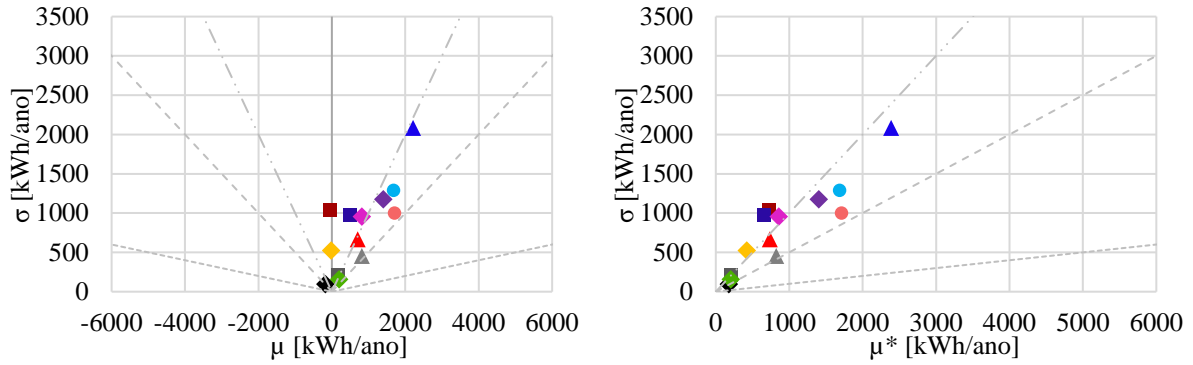


(d) 2080

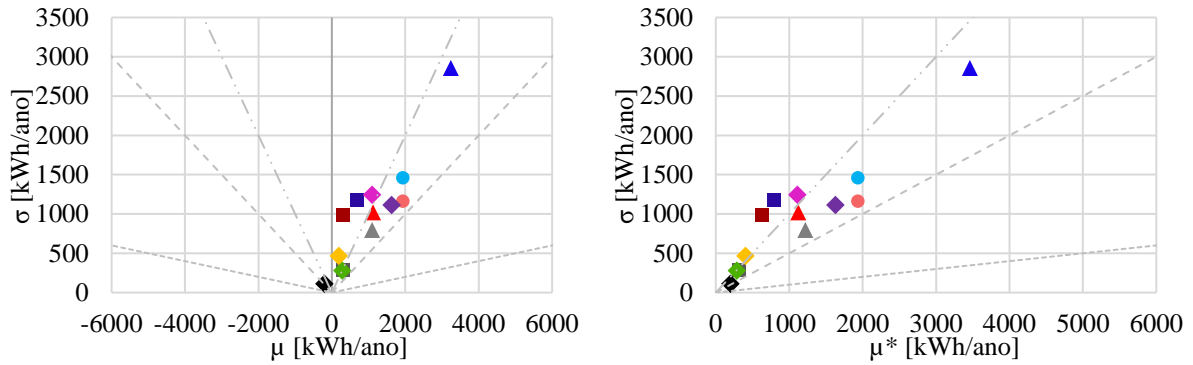
Fonte: o autor

Figura 45 – Índices de sensibilidade para o indicador CR, em cada período climático de Belém

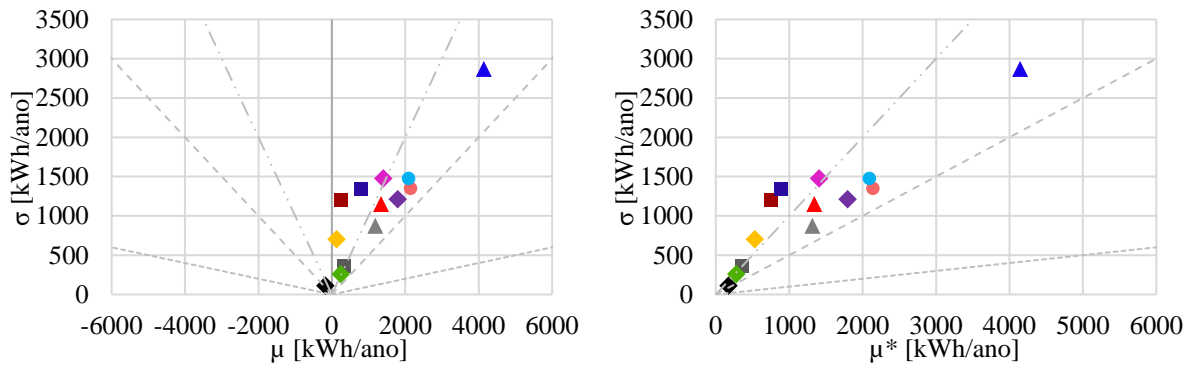
● acob ● apar ■ CTcob ■ CTpar ■ CTpis ◆ ecob ◆ Fvent ◆ FSvid ◆ OS ◆ tvenez ▲ Ucob ▲ Upar ▲ Upis
 - - - σ/μ ou $\sigma/\mu^* = 1$ - - - σ/μ ou $\sigma/\mu^* = 0,5$ - - - σ/μ ou $\sigma/\mu^* = 0,1$



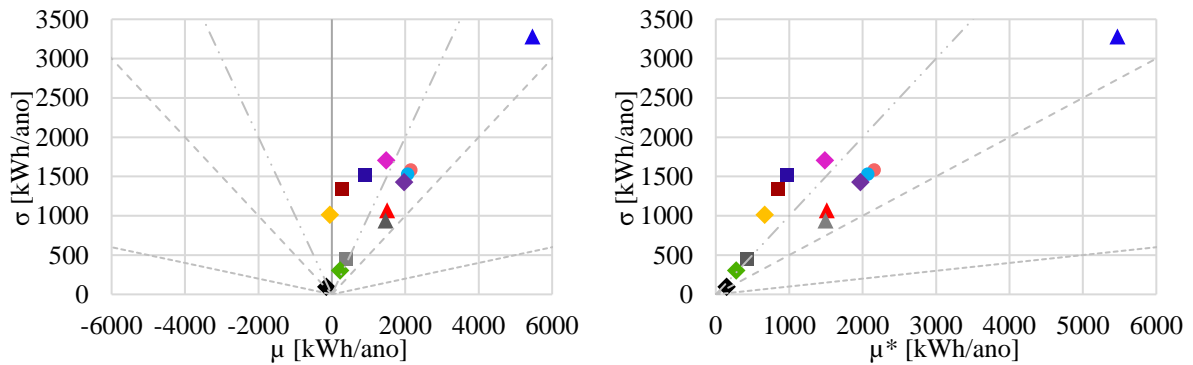
(a) TRY



(b) 2020



(c) 2050

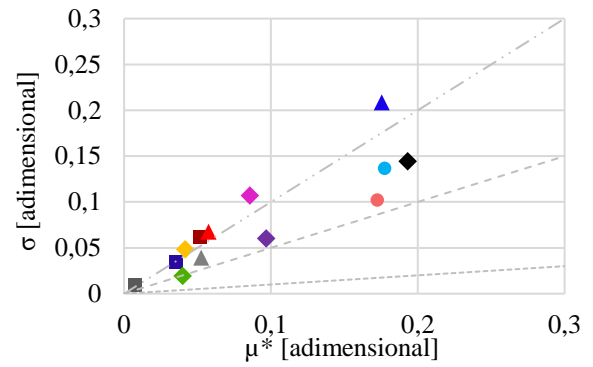
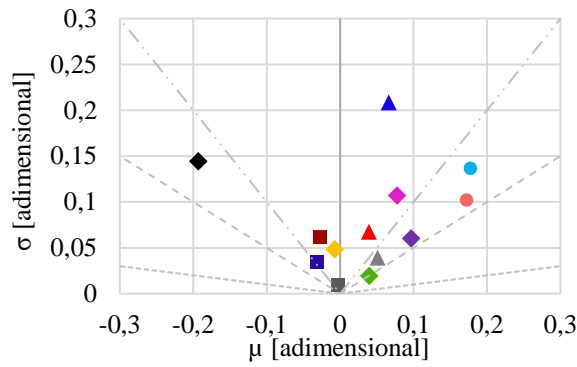


(d) 2080

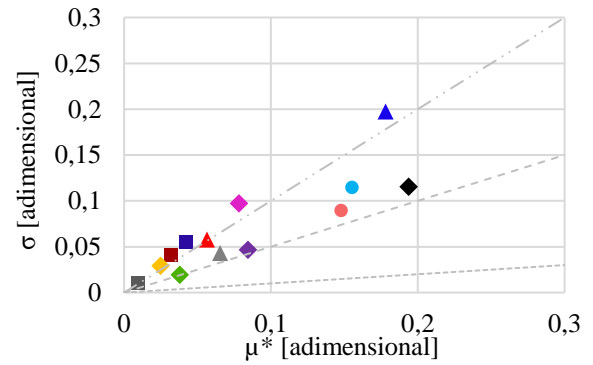
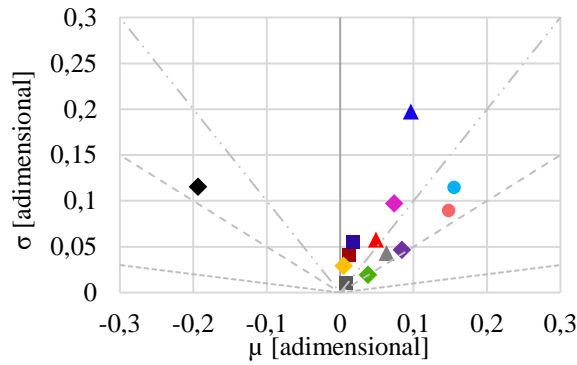
Fonte: o autor

Figura 46 – Índices de sensibilidade para o indicador I_{eq} , em cada período climático de Belém

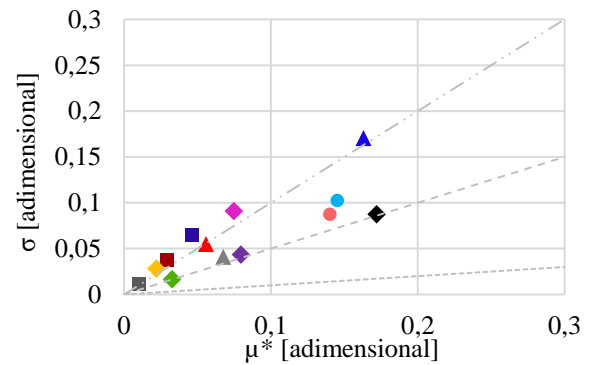
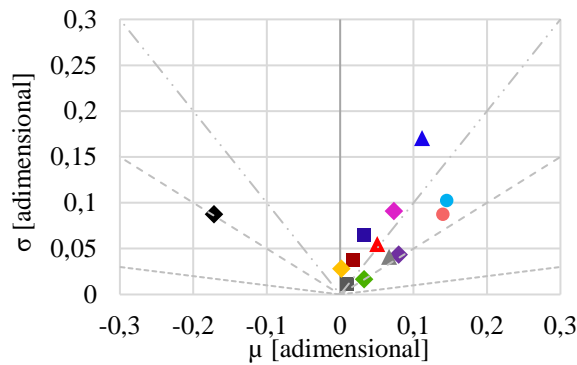
● acob ● apar ■ CTcob ■ CTpar ■ CTpis ◆ ecob ◆ Fvent ◆ FSvid ◆ OS ◆ tvenez ▲ Ucob ▲ Upar ▲ Upis
 - - - σ/μ ou $\sigma/\mu^* = 1$ - - - σ/μ ou $\sigma/\mu^* = 0,5$ - - - σ/μ ou $\sigma/\mu^* = 0,1$



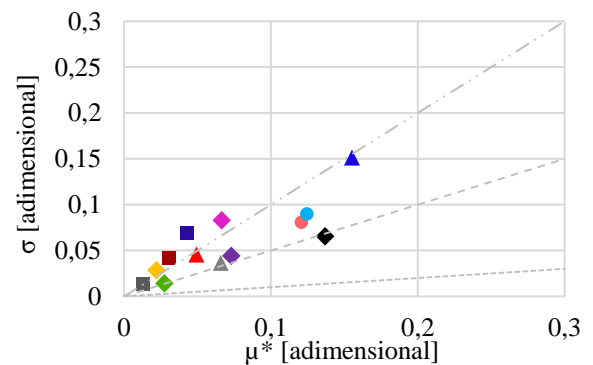
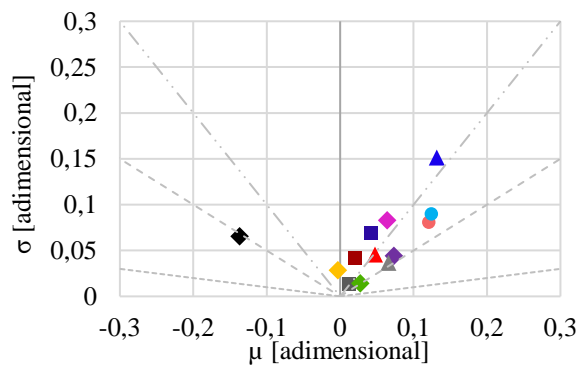
(a) TRY



(b) 2020



(c) 2050



(d) 2080

Fonte: o autor

Quadro 6 – Média absoluta μ^* para as variáveis independentes em todas as variáveis dependentes, conforme análise de sensibilidade global de Morris, para cada período climático de Belém

Par. termof.	GHR [°Ch]				CR [kWh/ano]				Ieq [adimensional]			
	TRY	2020	2050	2080	TRY	2020	2050	2080	TRY	2020	2050	2080
acob	1687,42	2377,77	2698,61	2867,36	1711,16	1932,35	2140,68	2157,07	0,17	0,15	0,14	0,12
apar	1789,12	2584,11	2923,99	3116,11	1684,41	1933,66	2090,08	2068,92	0,18	0,15	0,15	0,12
CTcob	711,84	604,58	601,26	747,95	726,19	626,18	748,74	853,44	0,05	0,03	0,03	0,03
CTpar	874,57	528,88	780,60	930,46	657,82	788,67	890,33	964,37	0,04	0,04	0,05	0,04
CTpis	185,30	165,56	138,32	120,51	202,27	319,64	352,32	427,79	0,01	0,01	0,01	0,01
ecob	904,64	1225,87	1292,85	1317,13	855,13	1107,82	1406,09	1483,16	0,09	0,08	0,07	0,07
Fvent	3111,56	5266,78	5739,22	5673,84	175,77	200,64	170,79	147,89	0,19	0,19	0,17	0,14
FSvid	522,36	802,65	880,11	925,32	203,97	285,44	276,39	275,76	0,04	0,04	0,03	0,03
OS	523,45	426,28	432,78	468,11	419,05	403,33	530,60	665,55	0,04	0,02	0,02	0,02
tvenez	634,17	871,25	961,07	1036,22	1403,95	1629,56	1792,59	1968,20	0,10	0,08	0,08	0,07
Ucob	499,84	631,34	735,92	790,38	734,57	1121,67	1340,49	1510,87	0,06	0,06	0,06	0,05
Upar	1664,82	2239,13	2322,71	2391,67	2388,98	3458,61	4142,64	5468,76	0,18	0,18	0,16	0,16
Upis	405,00	791,07	1127,13	1257,30	821,71	1217,14	1315,01	1494,28	0,05	0,07	0,07	0,07

Fonte: o autor

Por meio dos resultados para o indicador GHR (Figura 44), percebe-se que o fator de ventilação é o parâmetro com maiores médias em todos os quatro períodos climáticos analisados. Isso significa que essa é a variável que provoca maior variação na resposta do modelo e, portanto, possui grande influência no indicador GHR, que retrata o conforto térmico do usuário da edificação, em Belém. Além disso, pode-se perceber a monotonicidade dessa variável: os gráficos confirmam que o aumento do fator de ventilação da edificação provoca redução do indicador GHR. A absorvância solar da cobertura e das paredes apresentam comportamento parecido com o fator de ventilação, porém em proporção menor. Além desses, a transmitância térmica das paredes foi outro parâmetro termofísico que se destacou, indicando notável influência na resposta do modelo, sobretudo a partir da sua não linearidade, observada pelo seu desvio padrão alto nos quatro períodos climáticos.

Por sua vez, para o indicador CR (Figura 45), nos quatro períodos climáticos investigados, a transmitância térmica das paredes foi o parâmetro com maior influência, seguido pela absorvância solar da cobertura e das paredes e pela transmitância solar e visível das janelas, que representa o sombreamento das aberturas. Os gráficos indicam que a redução dos valores destas variáveis, principalmente a transmitância térmica das paredes, podem impactar positivamente na economia de energia com resfriamento nos períodos futuros, ao longo da vida útil de habitações.

Quando se analisa o indicador I_{eq} (Figura 46), o fator de ventilação, a transmitância térmica das paredes e absorvância solar das paredes e da cobertura se apresentam como mais influentes do desempenho termoenergético do modelo. Nesse caso, nos períodos TRY, 2020 e 2050, o fator de ventilação é o parâmetro termofísico mais influente, seguido da transmitância térmica das paredes externas. No período climático de 2080, esta situação se inverte. Ademais, de acordo com a dispersão dos indicadores no gráfico, é fato que o aumento do fator de ventilação e a redução da absorvância solar da envoltória, configuram estratégias importantes para o bom desempenho térmico e energético da habitação.

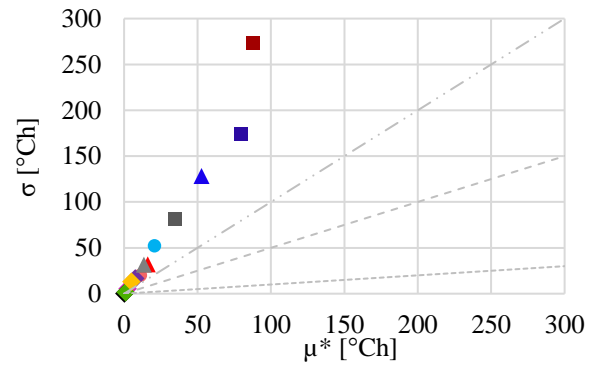
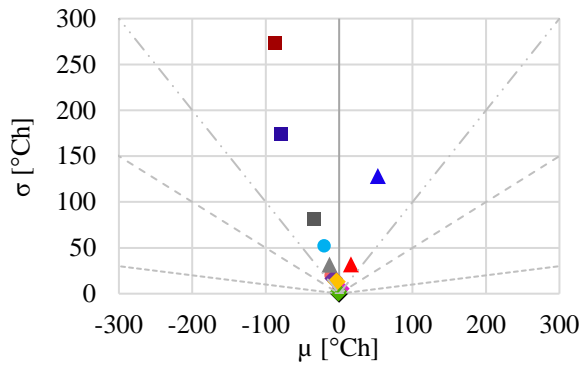
Em arremate, uma vez que as mudanças climáticas tendem a elevar a temperatura de Belém, que já é caracterizada como uma cidade com clima preponderantemente quente, com o passar dos anos, a influência das variáveis tende a manter a ordem de importância para os resultados; se tornando apenas mais pronunciadas, sem sofrer alterações significativas no arranjo da classificação, por exemplo.

4.3.1.2 Brasília

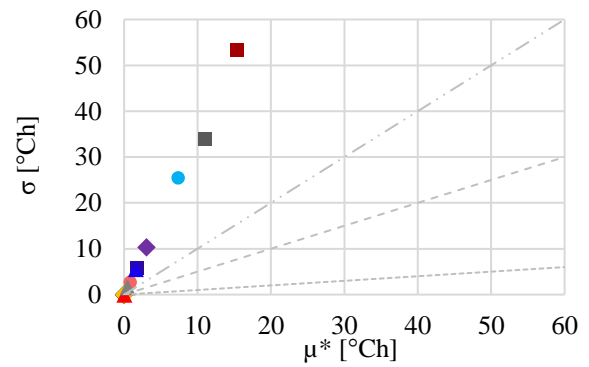
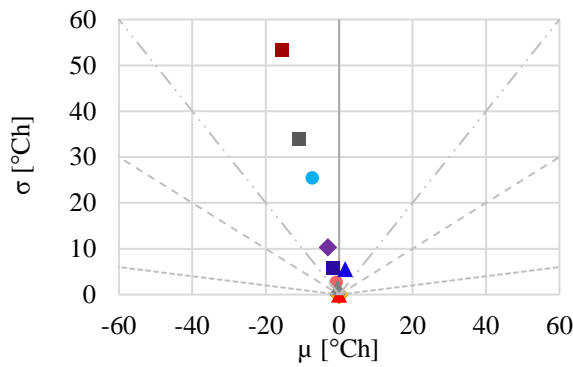
Nas Figuras 47 a 51, e no Quadro 7, apresentam-se os resultados das análises de sensibilidade para Brasília.

Figura 47 – Índices de sensibilidade para o indicador GHA, em cada período climático de Brasília

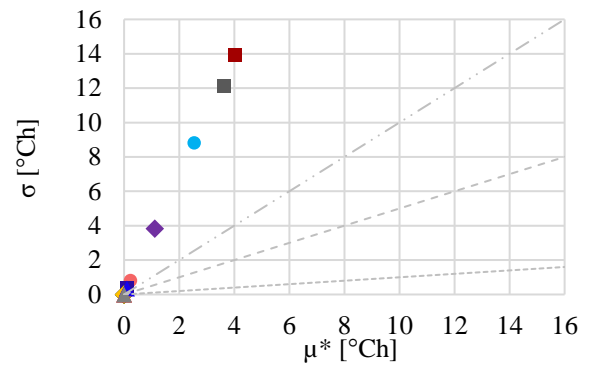
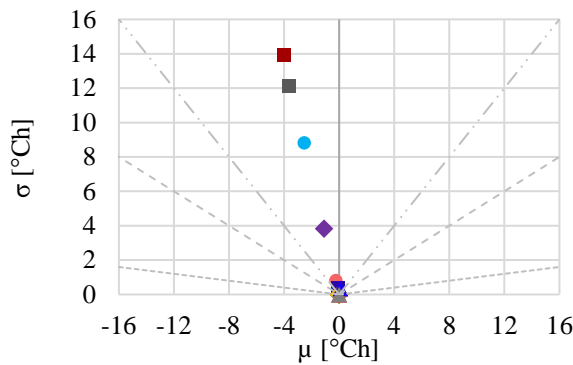
● acob ● apar ■ CTcob ■ CTpar ■ CTpis ◆ ecob ◆ Fvent ◆ FSvid ◆ OS ◆ tvenez ▲ Ucob ▲ Upar ▲ Upis
 - - - σ/μ ou $\sigma/\mu^* = 1$ - - - σ/μ ou $\sigma/\mu^* = 0,5$ - - - σ/μ ou $\sigma/\mu^* = 0,1$



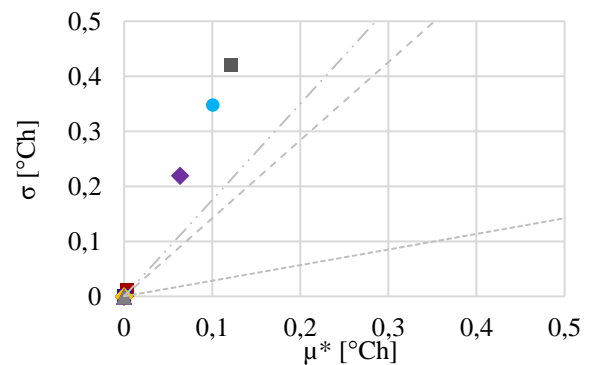
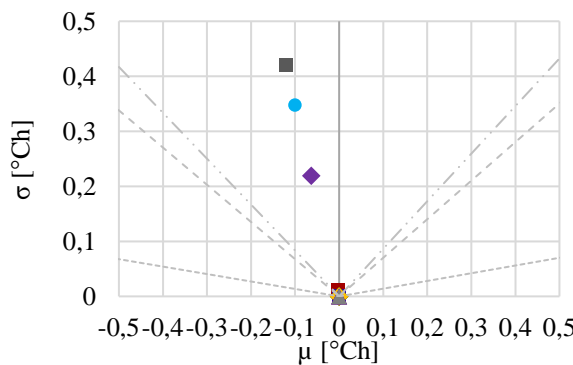
(a) TRY



(b) 2020



(c) 2050

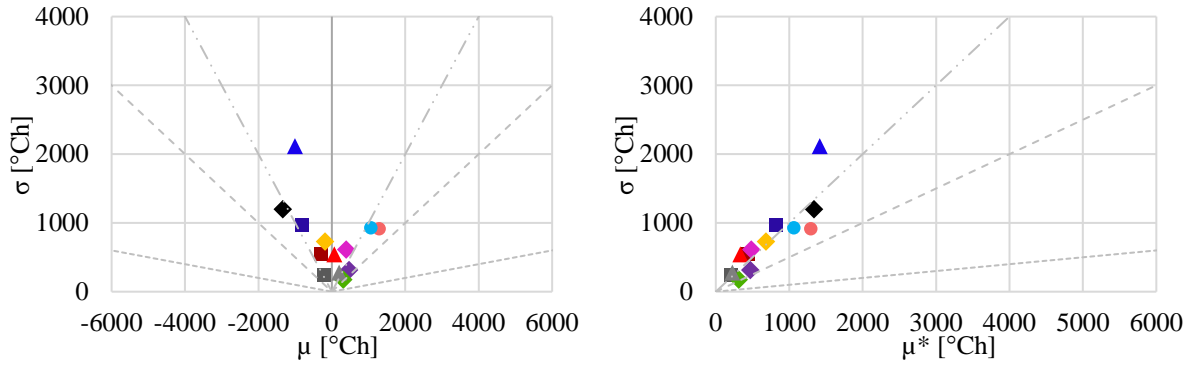


(d) 2080

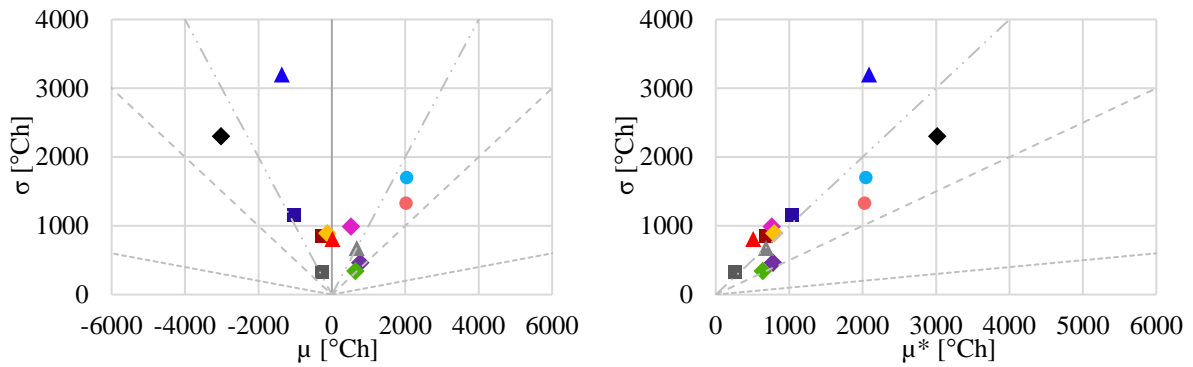
Fonte: o autor

Figura 48 – Índices de sensibilidade para o indicador GHR, em cada período climático de Brasília

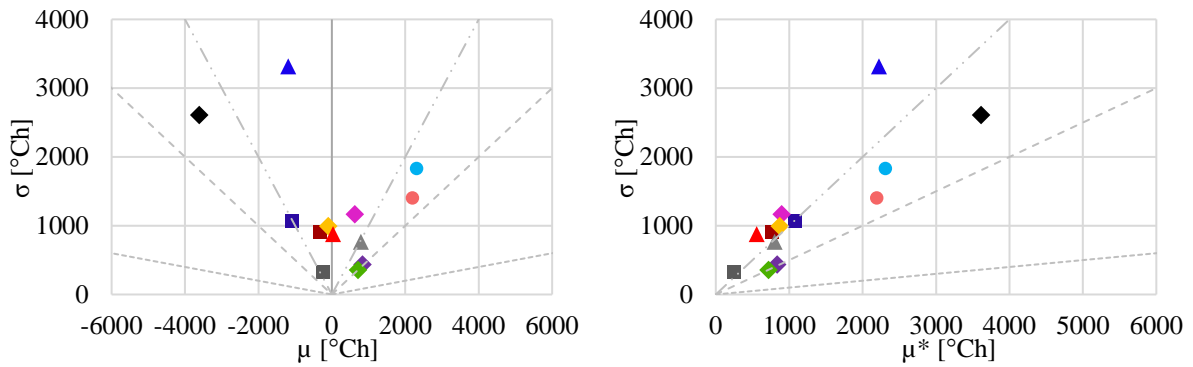
● acob ● apar ■ CTcob ■ CTpar ■ CTpis ◆ ecob ◆ Fvent ◆ FSvid ◆ OS ◆ tvenez ▲ Ucob ▲ Upar ▲ Upis
 - - - σ/μ ou $\sigma/\mu^* = 1$ - - - σ/μ ou $\sigma/\mu^* = 0,5$ - - - σ/μ ou $\sigma/\mu^* = 0,1$



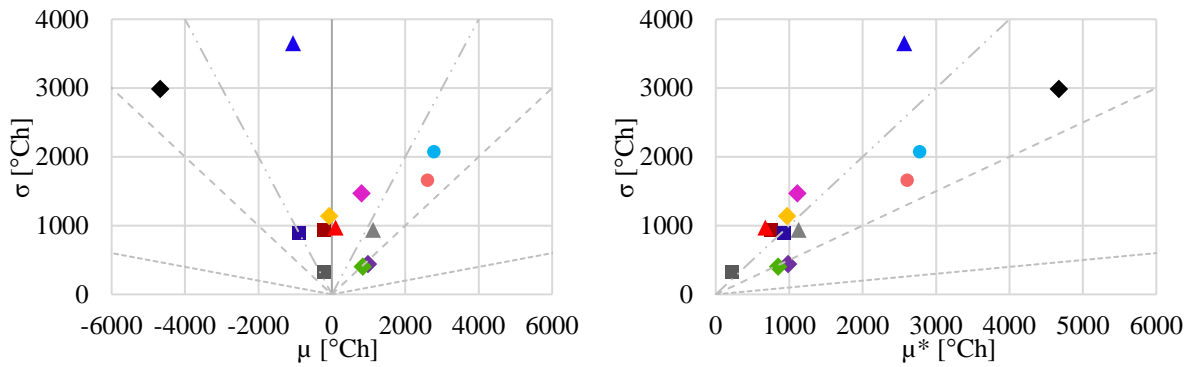
(a) TRY



(b) 2020



(c) 2050

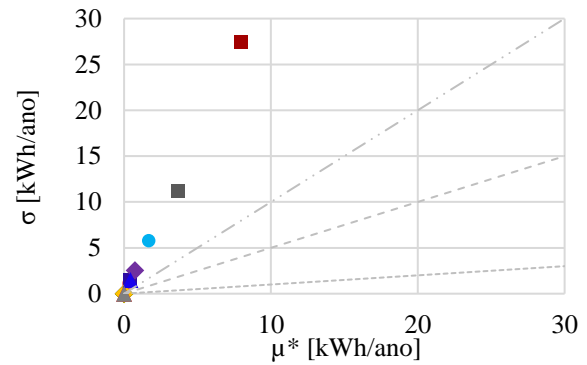
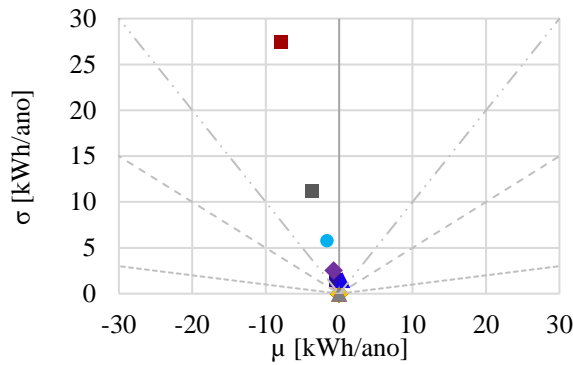


(d) 2080

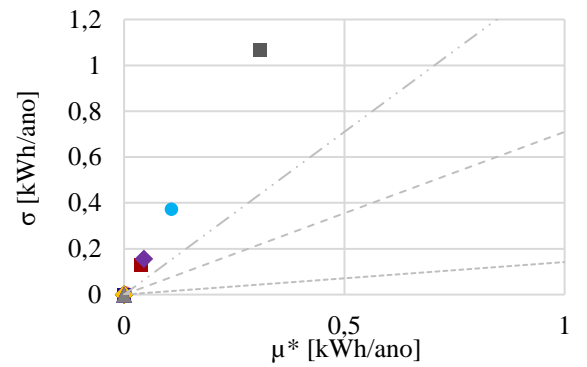
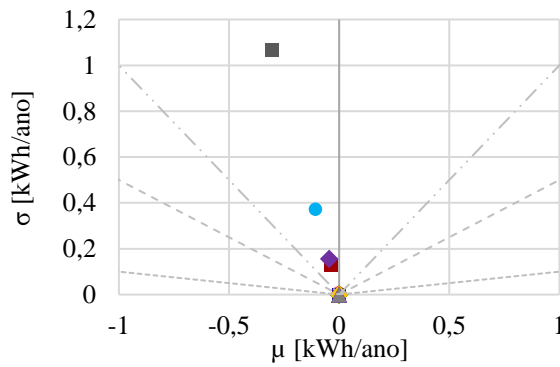
Fonte: o autor

Figura 49 – Índices de sensibilidade para o indicador CA, em cada período climático de Brasília

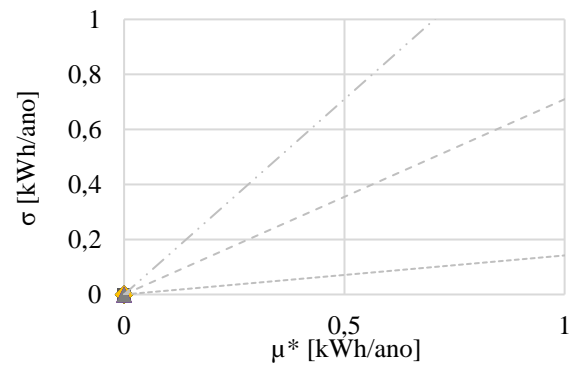
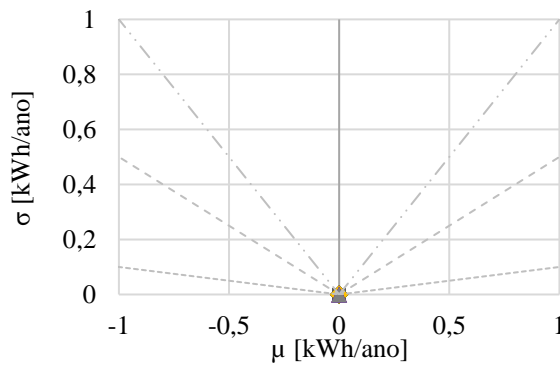
● acob ● apar ■ CTcob ■ CTpar ■ CTpis ◆ ecob ◆ Fvent ◆ FSvid ◆ OS ◆ tvenez ▲ Ucob ▲ Upar ▲ Upis
 - - - σ/μ ou $\sigma/\mu^* = 1$ - - - σ/μ ou $\sigma/\mu^* = 0,5$ - - - σ/μ ou $\sigma/\mu^* = 0,1$



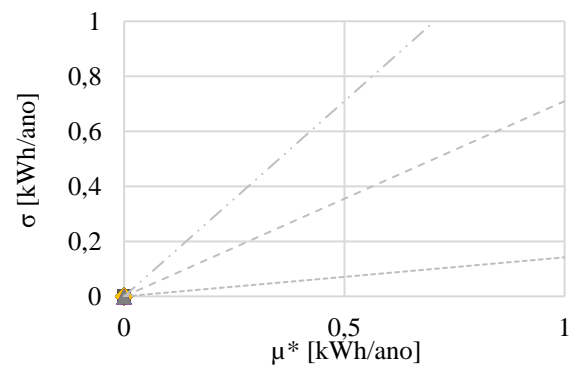
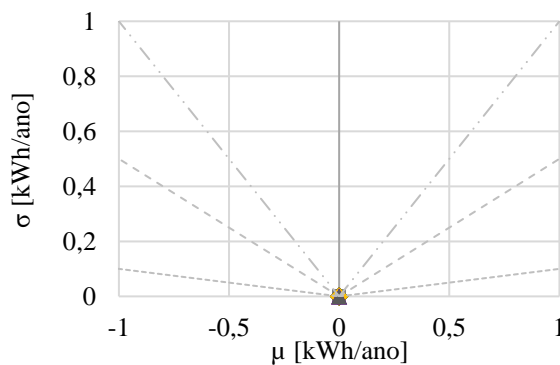
(a) TRY



(b) 2020



(c) 2050

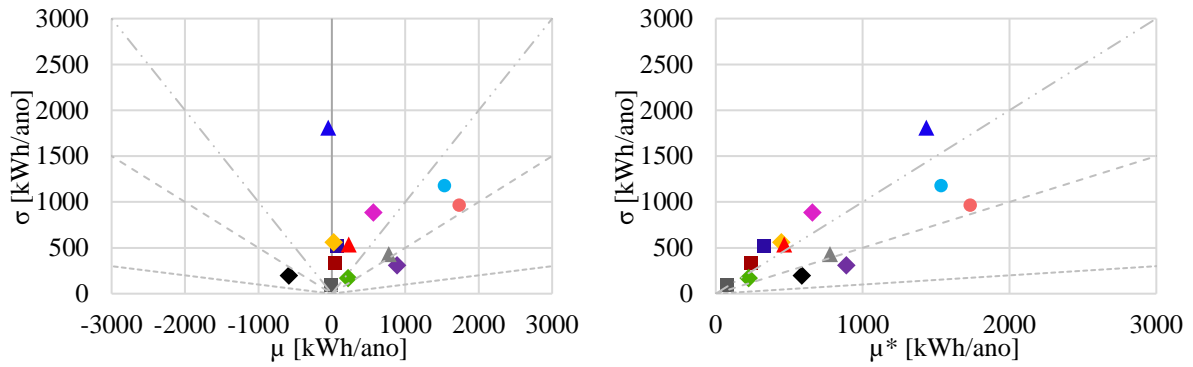


(d) 2080

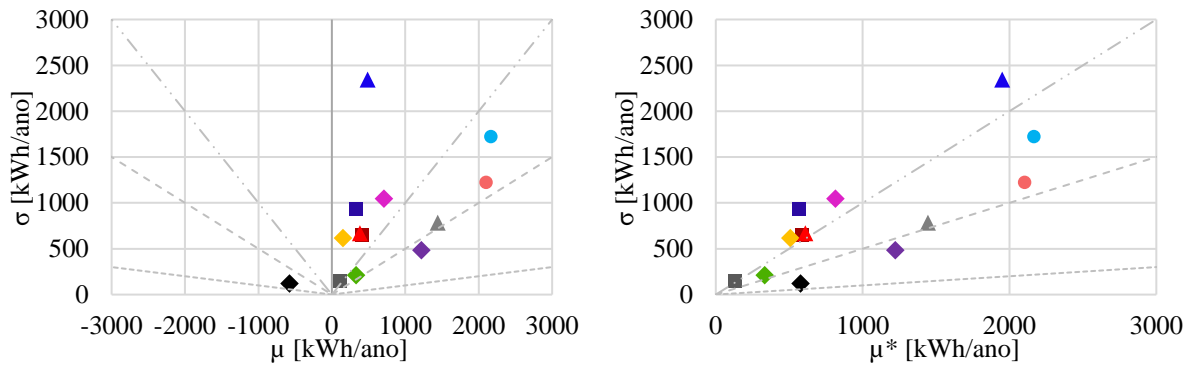
Fonte: o autor

Figura 50 – Índices de sensibilidade para o indicador CR, em cada período climático de Brasília

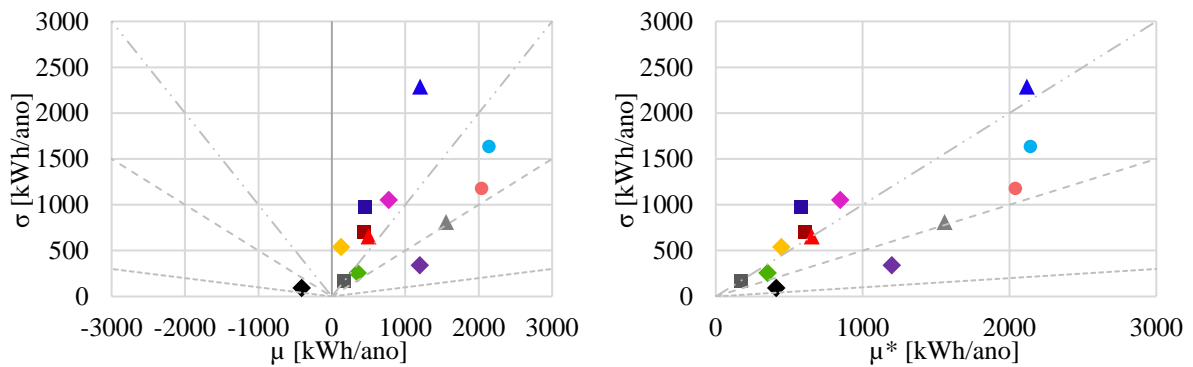
● acob ● apar ■ CTcob ■ CTpar ■ CTpis ◆ ecob ◆ FSvid ◆ OS ◆ tvenez ▲ Ucob ▲ Upar ▲ Upis
 - - - σ/μ ou $\sigma/\mu^* = 1$ - - - σ/μ ou $\sigma/\mu^* = 0,5$ - - - σ/μ ou $\sigma/\mu^* = 0,1$



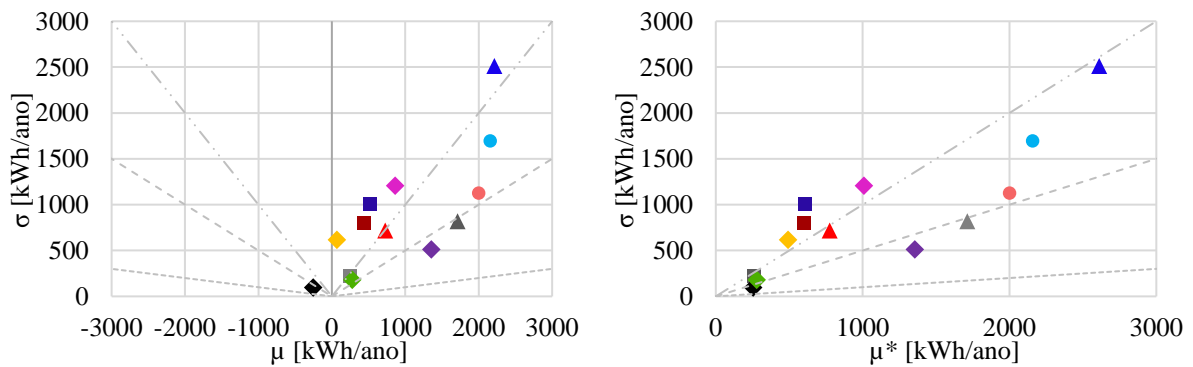
(a) TRY



(b) 2020



(c) 2050

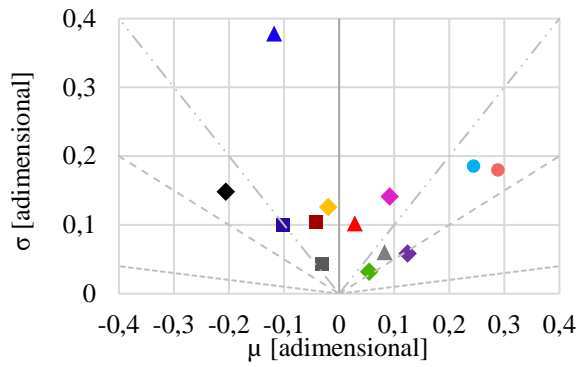


(d) 2080

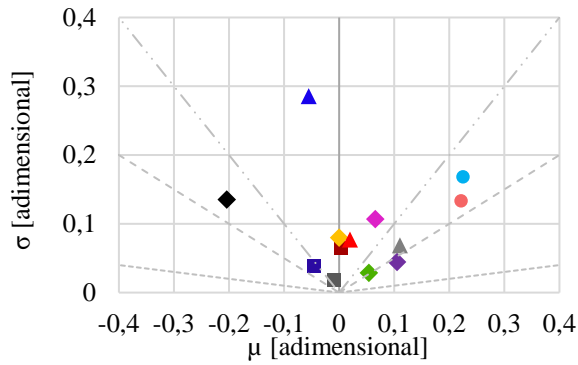
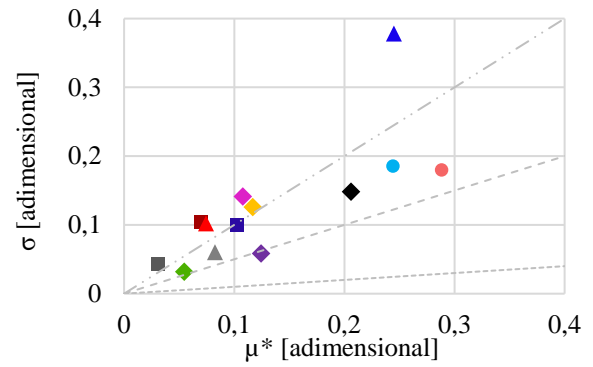
Fonte: o autor

Figura 51 – Índices de sensibilidade para o indicador I_{eq} , em cada período climático de Brasília

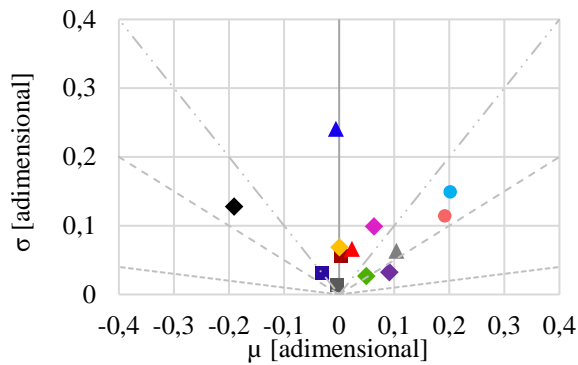
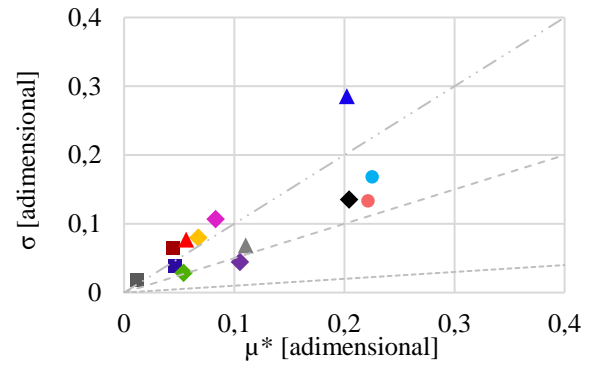
● acob ● apar ■ CTcob ■ CTpar ■ CTpis ◆ ecob ◆ Fvent ◆ FSvid ◆ OS ◆ tvenez ▲ Ucob ▲ Upar ▲ Upis
 - - - σ/μ ou $\sigma/\mu^* = 1$ - - - σ/μ ou $\sigma/\mu^* = 0,5$ - - - σ/μ ou $\sigma/\mu^* = 0,1$



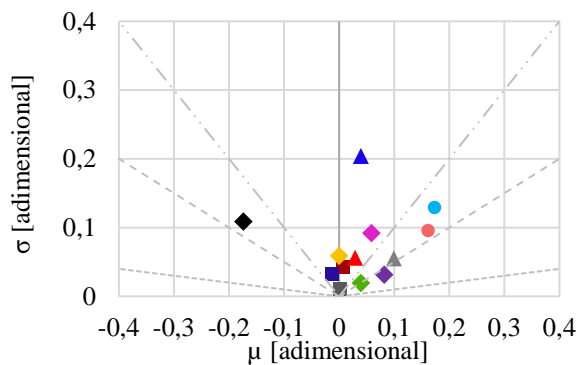
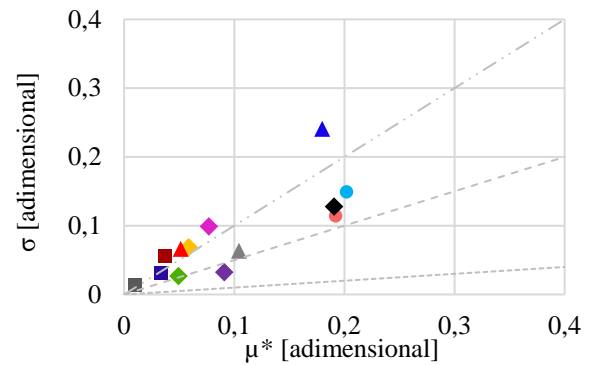
(a) TRY



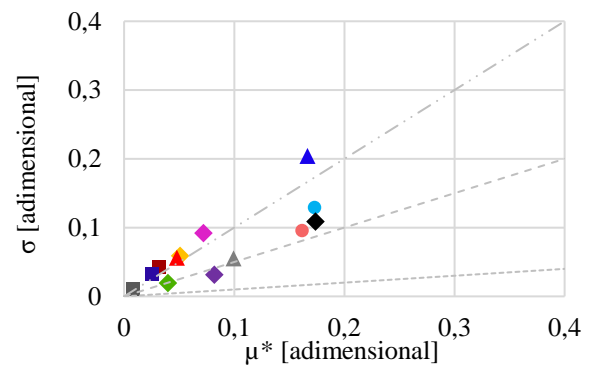
(b) 2020



(c) 2050



(d) 2080



Fonte: o autor

Quadro 7 – Média absoluta μ^* para as variáveis independentes em todas as variáveis dependentes, conforme análise de sensibilidade global de Morris, para cada período climático de Brasília

Par. termof.	GHA [°Ch]				GHR [°Ch]				CA [kWh/ano]				CR [kWh/ano]				Ieq [adimensional]			
	TRY	2020	2050	2080	TRY	2020	2050	2080	TRY	2020	2050	2080	TRY	2020	2050	2080	TRY	2020	2050	2080
acob	10,96	0,79	0,23	0,00	1293,63	2024,65	2192,67	2606,31	0,33	0,00	0,00	0,00	1732,94	2102,53	2039,20	1999,23	0,29	0,22	0,19	0,16
apar	20,53	7,34	2,54	0,10	1063,88	2041,83	2309,48	2777,33	1,67	0,11	0,00	0,00	1534,14	2166,17	2141,56	2156,40	0,24	0,23	0,20	0,17
CTcob	87,69	15,42	4,03	0,00	442,20	688,07	760,16	750,69	7,93	0,04	0,00	0,00	240,72	582,99	605,19	597,48	0,07	0,04	0,04	0,03
CTpar	79,18	1,69	0,11	0,00	818,82	1036,95	1084,34	931,52	0,42	0,00	0,00	0,00	331,19	568,00	580,03	609,92	0,10	0,05	0,03	0,03
CTpis	34,52	10,95	3,61	0,12	211,32	258,32	246,49	216,94	3,68	0,31	0,00	0,00	75,94	130,36	174,26	257,43	0,03	0,01	0,01	0,01
ecob	2,34	0,00	0,00	0,00	481,50	763,18	895,40	1109,35	0,00	0,00	0,00	0,00	656,48	814,24	846,69	1008,64	0,11	0,08	0,08	0,07
Fvent	0,07	0,00	0,00	0,00	1336,05	3014,21	3611,85	4671,73	0,00	0,00	0,00	0,00	586,37	575,96	411,08	254,84	0,21	0,20	0,19	0,17
FSvid	1,04	0,00	0,00	0,00	310,23	641,14	717,10	849,57	0,00	0,00	0,00	0,00	224,18	333,09	351,67	279,05	0,05	0,05	0,05	0,04
OS	4,94	0,00	0,00	0,00	681,68	796,63	871,28	972,28	0,00	0,00	0,00	0,00	446,52	507,51	446,76	491,77	0,12	0,07	0,06	0,05
tvnez	7,44	3,02	1,11	0,06	471,06	778,43	835,92	981,87	0,74	0,05	0,00	0,00	888,32	1220,94	1196,93	1355,42	0,12	0,11	0,09	0,08
Ucob	15,92	0,00	0,00	0,00	333,63	507,87	558,23	673,16	0,00	0,00	0,00	0,00	466,61	608,77	652,33	775,52	0,07	0,06	0,05	0,05
Upar	52,68	1,61	0,10	0,00	1412,98	2088,57	2222,45	2567,11	0,43	0,00	0,00	0,00	1434,34	1950,34	2117,73	2611,44	0,24	0,20	0,18	0,17
Upis	13,31	0,46	0,00	0,00	225,09	684,04	800,06	1126,40	0,00	0,00	0,00	0,00	776,62	1444,85	1557,68	1711,57	0,08	0,11	0,10	0,10

Fonte: o autor

Os resultados para o indicador GHA (Figura 47), indicam que ao longo dos períodos climáticos considerados, todos os parâmetros termofísicos são classificados como não lineares e/ou não monotônicos, sendo que os mais influentes na resposta do modelo se alternam entre a capacidade térmica da cobertura, paredes e piso, transmitância térmica das paredes e absorvância solar das paredes. Essas alterações são decorrentes das mudanças no clima, que, segundo as previsões, farão com que Brasília fique mais quente, acarretando redução no desconforto por frio ao longo do ano, conforme apontam os índices dos gráficos para o indicador GHA.

Em contrapartida, o aquecimento do clima fará com que o desconforto por calor na habitação aumente, causando indicadores GHR mais altos em Brasília, de acordo com as progressões. Nesse contexto, por meio dos gráficos com os índices de Morris para o indicador GHR (Figura 48), percebe-se que quando empregado o arquivo climático TRY nas simulações de desempenho, a transmitância térmica das paredes caracteriza o parâmetro termofísico mais importante, seguido pelo fator de ventilação e absorvância solar da cobertura e das paredes. Quando se consideram as progressões para 2020, 2050 e 2080, embora essas variáveis se mantenham como as quatro mais influente no desempenho, a ordem de importância muda, ao passo que o fator de ventilação passa a ser o principal parâmetro termofísico a causar variação na resposta do modelo, com comportamento quase monotônico.

Devido ao clima quente na maior parte do ano, o consumo com aquecimento é muito baixo e notado apenas nas simulações para o período TRY e 2020. Para 2050 e 2080 o consumo de energia com aquecimento é nulo. As análises para o arquivo climático TRY indicam que a capacidade térmica da cobertura é a variável mais influente para o indicador CA, enquanto as análises para o período 2020 indicam que a capacidade térmica do piso causa maior variação na resposta do modelo. Há que se destacar, porém, que os valores do indicador CA são praticamente insignificantes para Brasília.

Para o indicador CR (Figura 50), a absorvância solar da cobertura e das paredes e a transmitância térmica das paredes são os parâmetros com maior influência no resultado, com alteração na ordem de importância conforme os períodos climáticos simulados: para os dados TRY, a absorvância solar da cobertura é a variável mais importante; para os períodos 2020 e 2050, a absorvância solar das paredes é a variável mais importante; e para 2080, a transmitância térmica das paredes é a variável mais importante. A monotonicidade, sobretudo da absorvância solar evidenciam que valores mais baixos para esse parâmetro contribuem para a redução do consumo de energia com resfriamento.

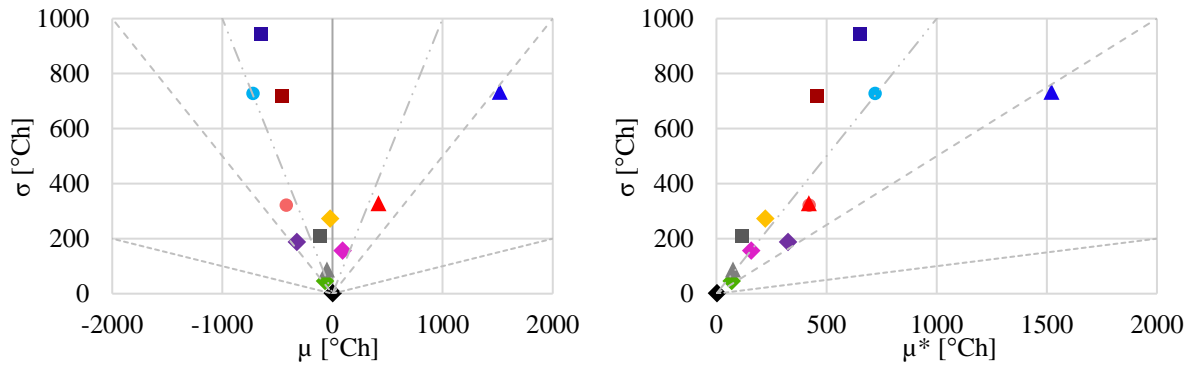
Por último, o indicador I_{eq} (Figura 51) mostra que os parâmetros termofísicos mais importantes para o desempenho agregado da habitação, ao longo dos períodos climáticos em Brasília, são a absorvância solar das paredes e da cobertura, o fator de ventilação e transmitância térmica das paredes. Assim sendo, percebe-se que a influência dos parâmetros é semelhante ao observado para Belém, o que se justifica pela predominância de clima quente em ambas as cidades.

4.3.1.3 Curitiba

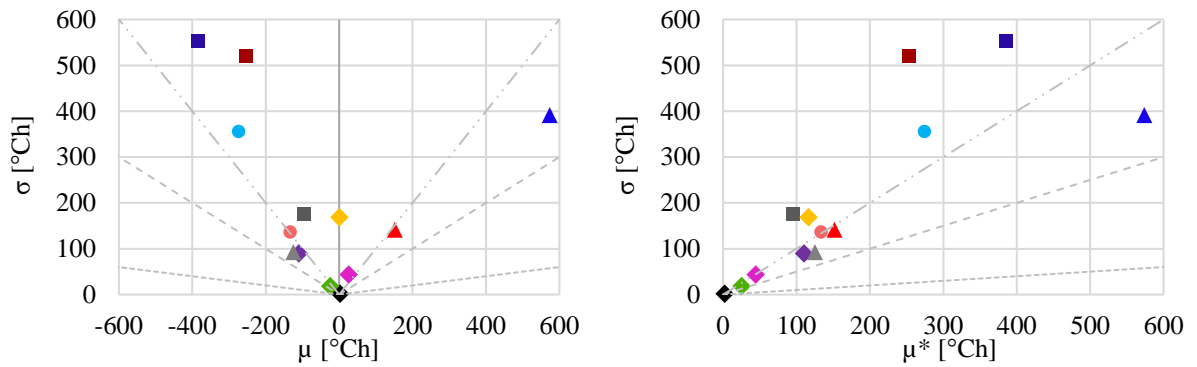
Nas Figuras 52 a 56, e no Quadro 8, apresentam-se os resultados das análises de sensibilidade para Curitiba.

Figura 52 – Índices de sensibilidade para o indicador GHA, em cada período climático de Curitiba

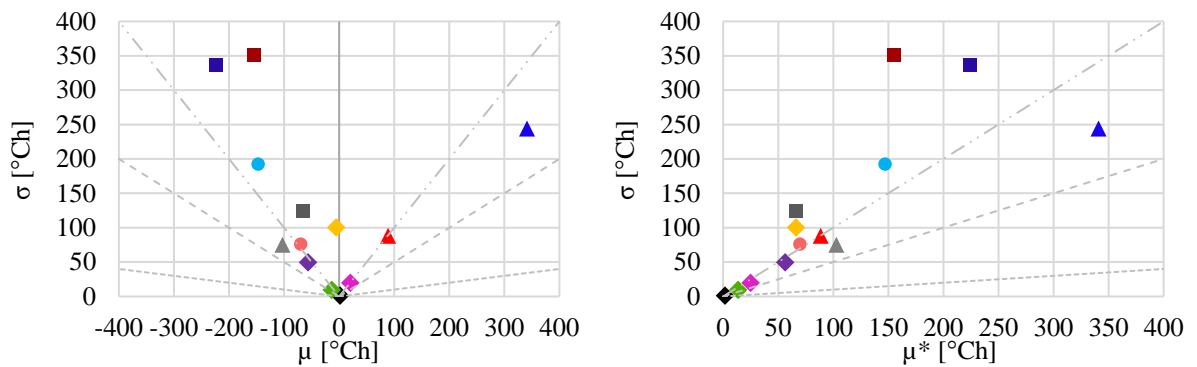
● acob ● apar ■ CTcob ■ CTpar ■ CTpis ◆ ecob ◆ Fvent ◆ FSvid ◆ OS ◆ tvenez ▲ Ucob ▲ Upar ▲ Upis
 - - - σ/μ ou $\sigma/\mu^* = 1$ - - - σ/μ ou $\sigma/\mu^* = 0,5$ - - - σ/μ ou $\sigma/\mu^* = 0,1$



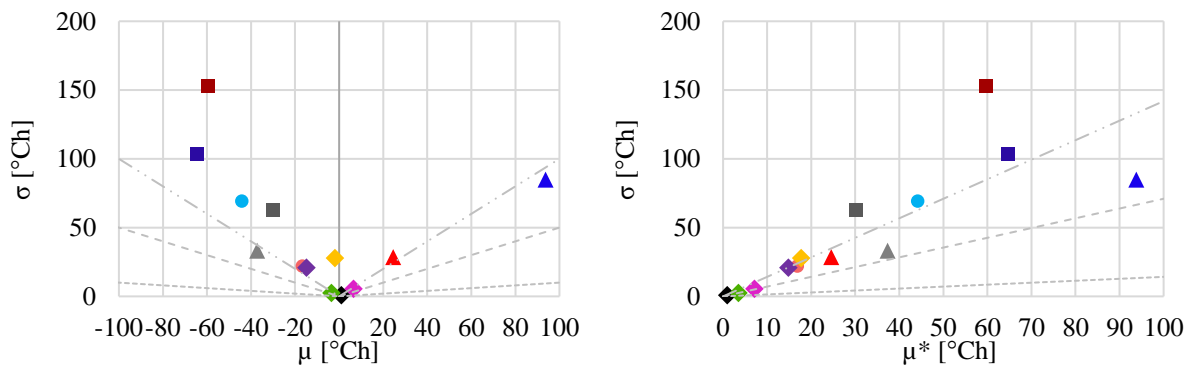
(a) TRY



(b) 2020



(c) 2050

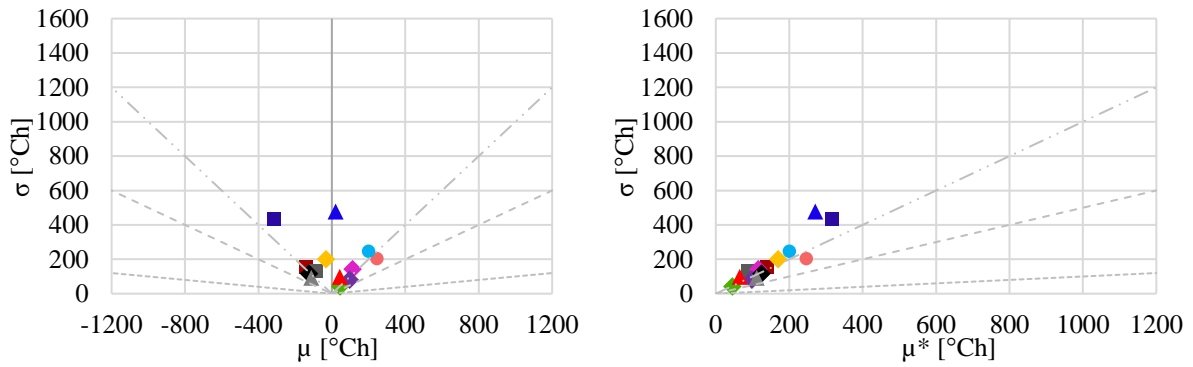


(d) 2080

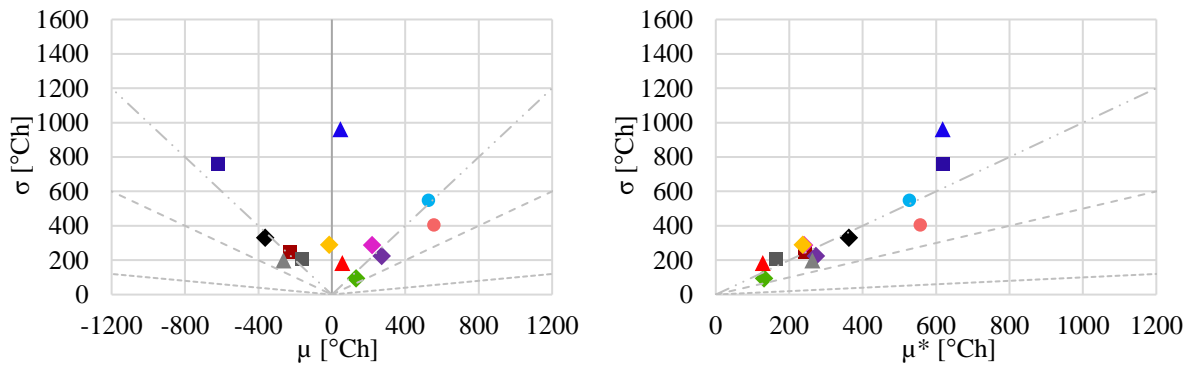
Fonte: o autor

Figura 53 – Índices de sensibilidade para o indicador GHR, em cada período climático de Curitiba

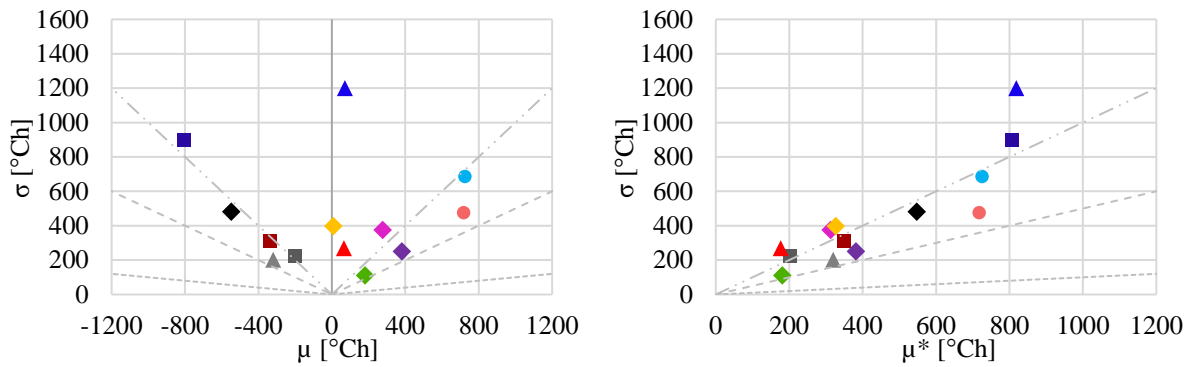
● acob ● apar ■ CTcob ■ CTpar ■ CTpis ◆ ecob ◆ Fvent ◆ FSvid ◆ OS ◆ tvenez ▲ Ucob ▲ Upar ▲ Upis
 - - - σ/μ ou $\sigma/\mu^* = 1$ - - - σ/μ ou $\sigma/\mu^* = 0,5$ - - - σ/μ ou $\sigma/\mu^* = 0,1$



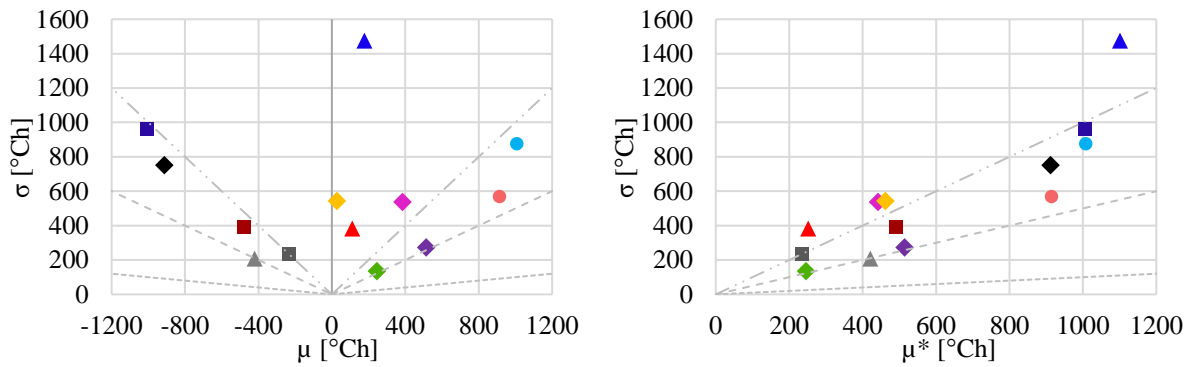
(a) TRY



(b) 2020



(c) 2050

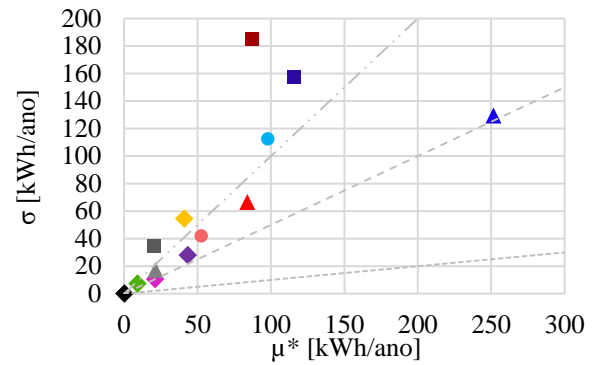
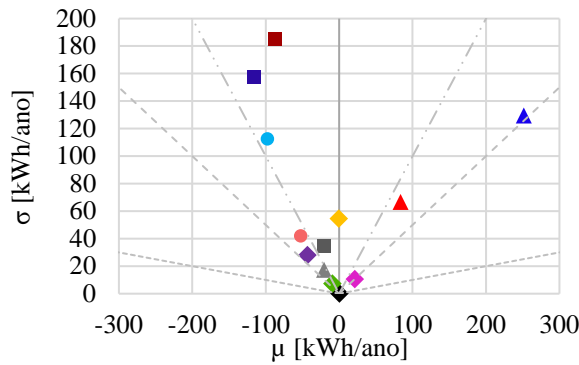


(d) 2080

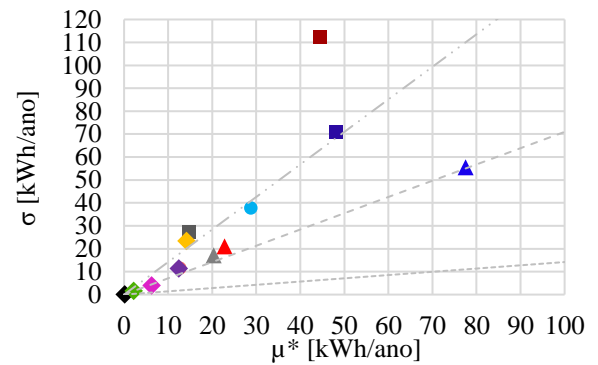
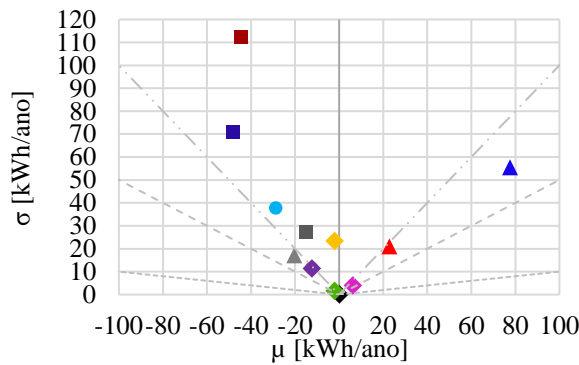
Fonte: o autor

Figura 54 – Índices de sensibilidade para o indicador CA, em cada período climático de Curitiba

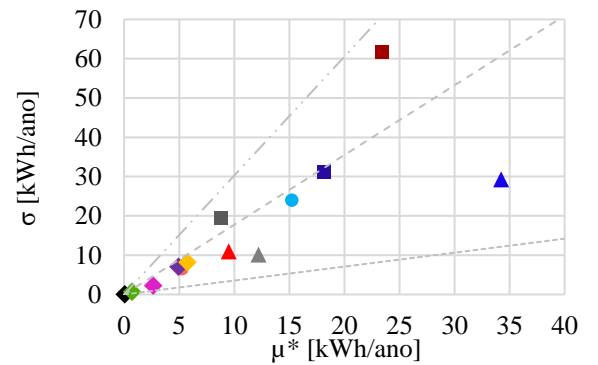
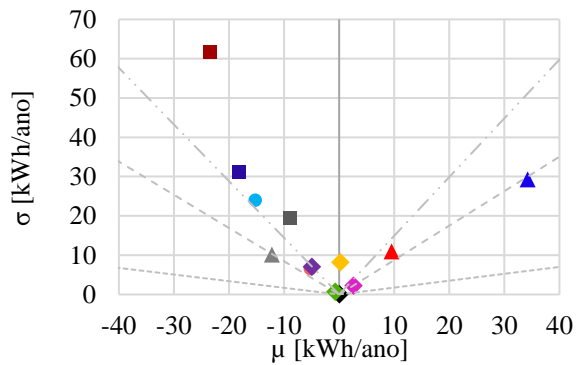
● acob ● apar ■ CTcob ■ CTpar ■ CTpis ◆ ecob ◆ Fvent ◆ FSvid ◆ OS ◆ tvenez ▲ Ucob ▲ Upar ▲ Upis
 - - - σ/μ ou $\sigma/\mu^* = 1$ - - - σ/μ ou $\sigma/\mu^* = 0,5$ - - - σ/μ ou $\sigma/\mu^* = 0,1$



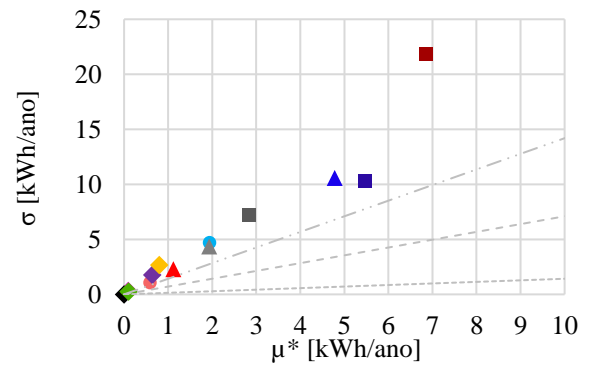
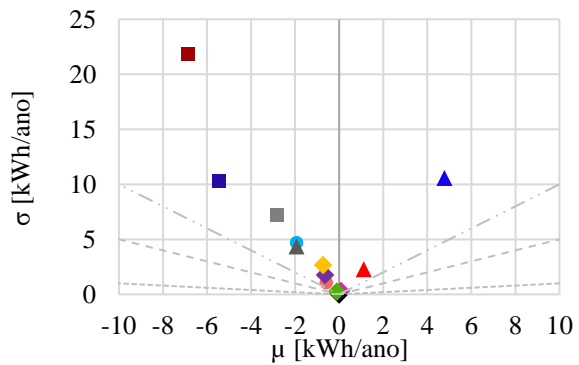
(a) TRY



(b) 2020



(c) 2050

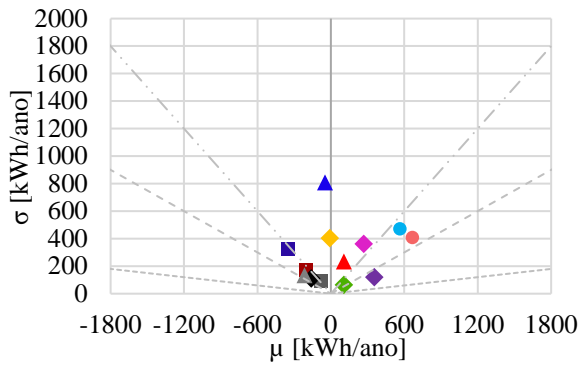


(d) 2080

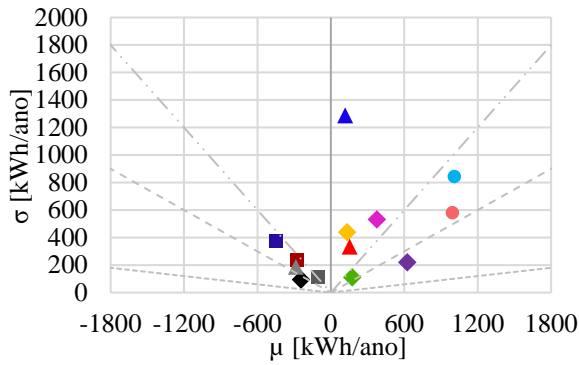
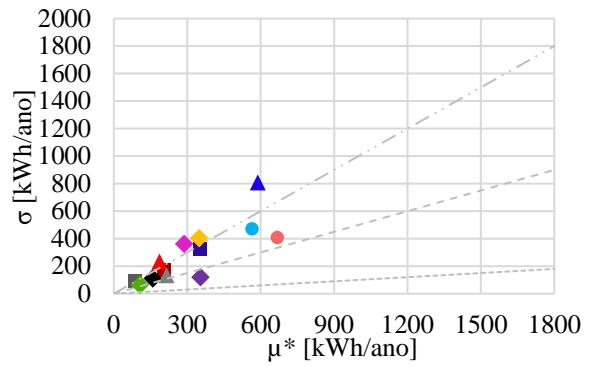
Fonte: o autor

Figura 55 – Índices de sensibilidade para o indicador CR, em cada período climático de Curitiba

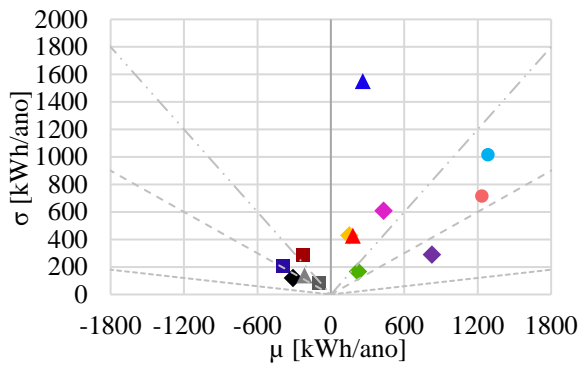
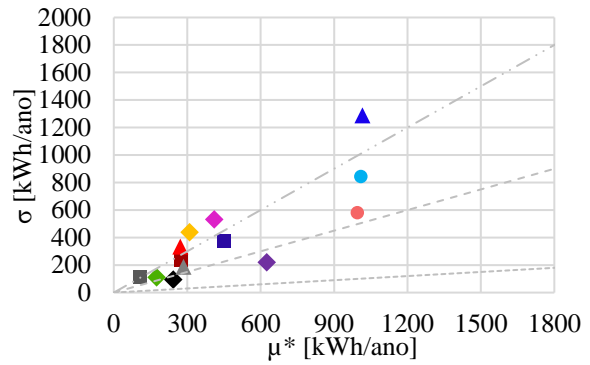
● acob ● apar ■ CTcob ■ CTpar ■ CTpis ◆ ecob ◆ Fvent ◆ FSvid ◆ OS ◆ tvenez ▲ Ucob ▲ Upar ▲ Upis
 - - - σ/μ ou $\sigma/\mu^* = 1$ - - - σ/μ ou $\sigma/\mu^* = 0,5$ - - - σ/μ ou $\sigma/\mu^* = 0,1$



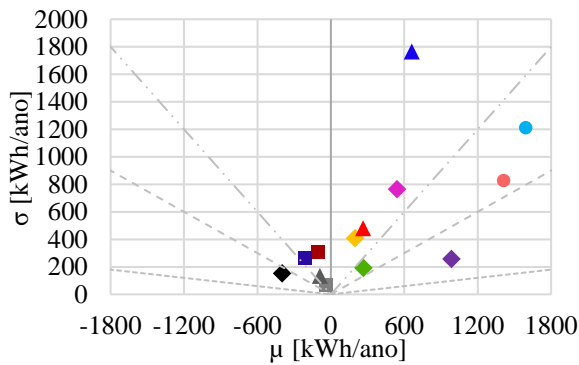
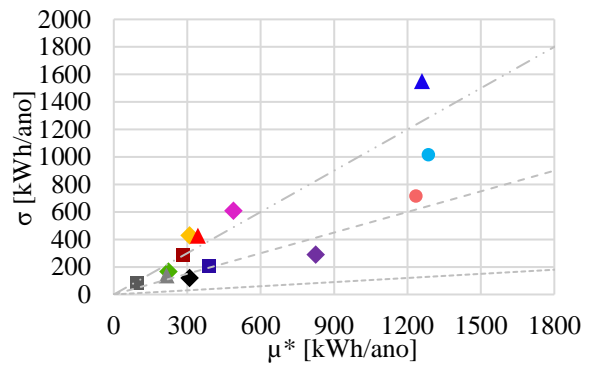
(a) TRY



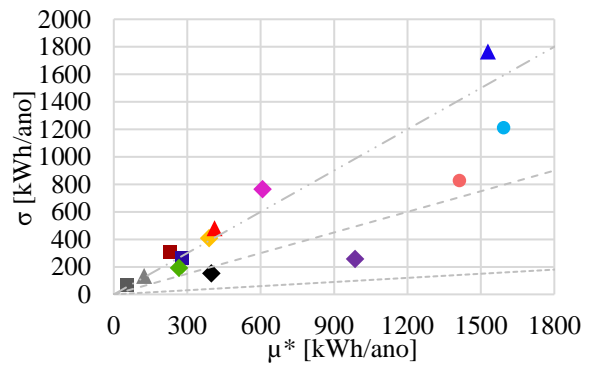
(b) 2020



(c) 2050



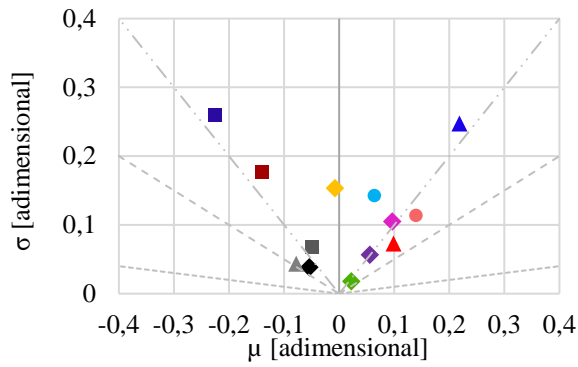
(d) 2080



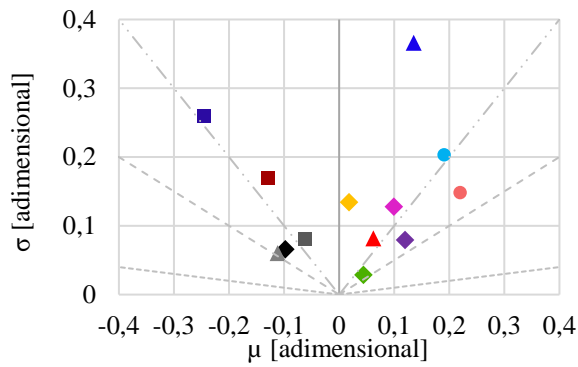
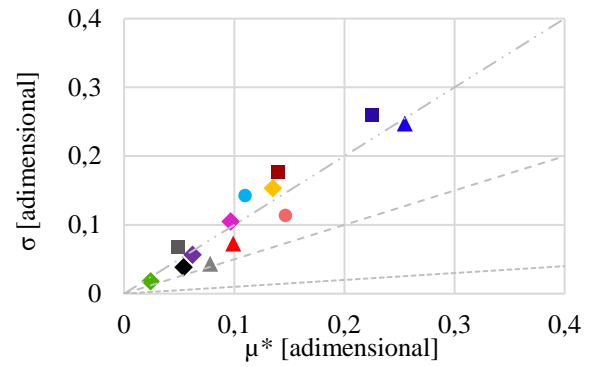
Fonte: o autor

Figura 56 – Índices de sensibilidade para o indicador I_{eq} , em cada período climático de Curitiba

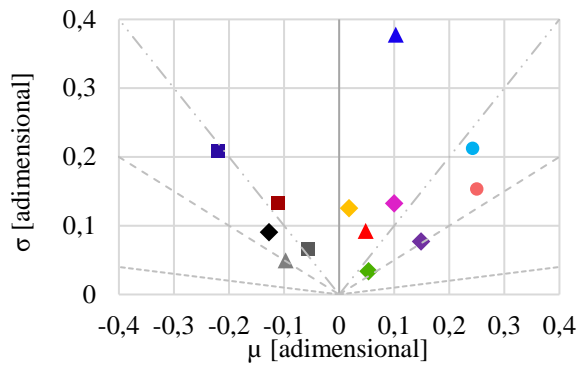
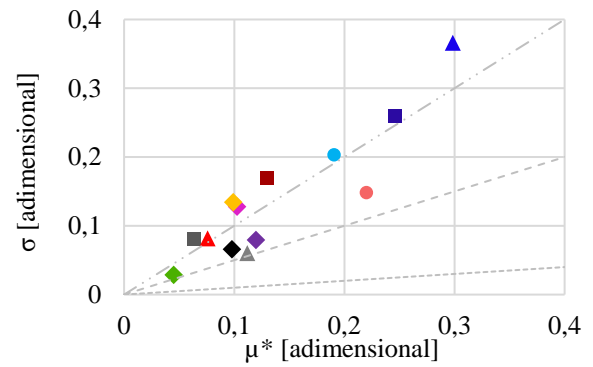
● acob ● apar ■ CTcob ■ CTpar ■ CTpis ◆ ecob ◆ Fvent ◆ FSvid ◆ OS ◆ tvenez ▲ Ucob ▲ Upar ▲ Upis
 - - - σ/μ ou $\sigma/\mu^* = 1$ - - - σ/μ ou $\sigma/\mu^* = 0,5$ - - - σ/μ ou $\sigma/\mu^* = 0,1$



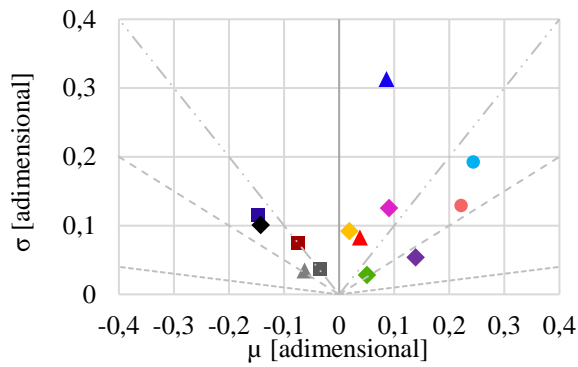
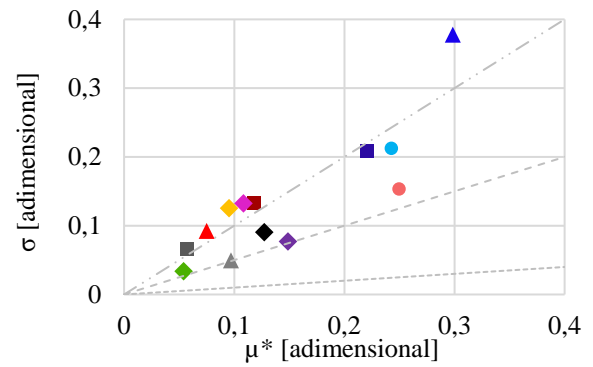
(a) TRY



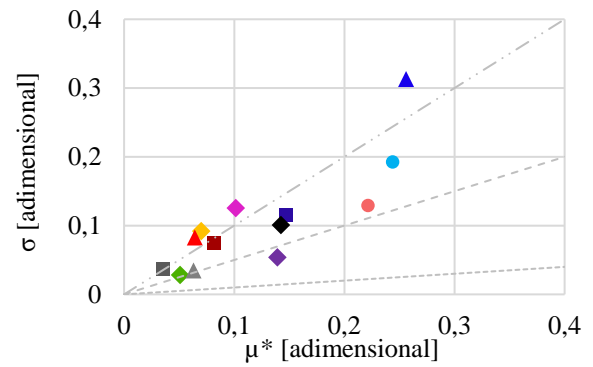
(b) 2020



(c) 2050



(d) 2080



Fonte: o autor

Quadro 8 – Média absoluta μ^* para as variáveis independentes em todas as variáveis dependentes, conforme análise de sensibilidade global de Morris, para cada período climático de Curitiba

Par. termof.	GHA [°Ch]				GHR [°Ch]				CA [kWh/ano]				CR [kWh/ano]				Ieq [adimensional]			
	TRY	2020	2050	2080	TRY	2020	2050	2080	TRY	2020	2050	2080	TRY	2020	2050	2080	TRY	2020	2050	2080
acob	420,32	133,12	69,56	16,79	246,67	556,47	717,54	914,39	52,33	12,58	5,25	0,58	667,92	995,12	1234,14	1411,36	0,15	0,22	0,25	0,22
apar	720,36	273,98	146,94	44,16	200,04	526,94	724,90	1007,83	97,74	28,77	15,22	1,94	564,13	1009,59	1285,44	1592,12	0,11	0,19	0,24	0,24
CTcob	458,77	253,24	155,30	59,54	137,92	243,36	349,55	490,21	87,15	44,35	23,39	6,85	205,08	274,34	280,75	231,33	0,14	0,13	0,12	0,08
CTpar	650,57	385,77	224,62	64,68	317,13	618,62	807,38	1005,17	115,72	48,05	18,19	5,46	354,21	449,76	388,45	277,53	0,23	0,25	0,22	0,15
CTpis	114,30	95,83	66,54	30,17	87,55	164,42	201,67	236,16	20,63	14,78	8,83	2,84	85,01	108,18	94,14	54,13	0,05	0,06	0,06	0,04
ecob	156,95	44,25	24,75	7,10	115,91	240,58	313,08	441,60	21,13	6,25	2,64	0,09	286,72	410,06	488,81	608,20	0,10	0,10	0,11	0,10
Fvent	2,39	2,12	1,71	0,93	124,62	362,65	546,87	911,25	0,19	0,11	0,04	0,00	158,73	242,11	309,96	398,90	0,05	0,10	0,13	0,14
FSvid	69,14	24,94	13,45	3,46	44,57	131,64	180,90	245,79	9,11	2,12	0,71	0,10	106,15	174,25	222,86	266,82	0,02	0,05	0,05	0,05
OS	221,79	116,08	66,04	17,72	169,42	237,00	326,18	461,37	40,88	14,15	5,74	0,79	348,18	309,48	309,73	389,33	0,14	0,10	0,10	0,07
tvenez	324,78	110,13	56,35	14,80	98,34	272,63	381,47	514,20	43,37	12,36	4,93	0,64	354,44	624,76	825,39	985,86	0,06	0,12	0,15	0,14
Ucob	418,95	151,39	88,60	24,55	65,00	127,66	176,62	251,97	83,84	22,76	9,50	1,11	186,14	272,15	343,13	411,40	0,10	0,08	0,07	0,06
Upar	1520,56	573,44	340,92	93,77	270,82	617,72	818,38	1101,04	251,43	77,53	34,21	4,78	588,02	1015,07	1259,62	1528,36	0,25	0,30	0,30	0,26
Upis	74,35	124,74	102,79	37,28	111,49	262,63	319,82	420,39	21,34	20,33	12,20	1,93	214,98	284,78	214,85	123,22	0,08	0,11	0,10	0,06

Fonte: o autor

Por meio dos gráficos para o indicador GHA (Figura 52), nota-se redução nos índices de sensibilidade, devido aos efeitos das mudanças no clima de Curitiba, detalhadas no Item 4.2.3. Embora haja reduções nos valores dos seus índices, os parâmetros termofísicos mais importantes para a resposta do modelo são os mesmos nos quatro períodos analisados: transmitância térmica das paredes, absorvância solar das paredes e capacidade térmica da cobertura e das paredes. A transmitância térmica das paredes é a variável mais influente em todos os períodos, enquanto a absorvância solar das paredes, que ocupa a segunda posição na ordem de importância na ocasião do período TRY, passa a ficar atrás da capacidade térmica das paredes e da cobertura nos alongamentos dos anos 2020, 2050 e 2080. Ademais, ao longo dos períodos, a transmitância térmica das paredes tem efeito quase monotônico (positivo) na resposta do modelo, ou seja, valores maiores causam aumento no indicador GHA, e a capacidade térmica da envoltória possui não linearidades e/ou efeitos de segunda ordem com variáveis como absorvância solar e transmitância térmica.

Para o indicador GHR (Figura 53), os parâmetros termofísicos mais importantes estão relacionados, basicamente, às paredes, sendo eles a capacidade térmica, transmitância térmica e absorvância solar. É interessante observar que, com a elevação das temperaturas, os graus-hora para resfriamento aumentarão, fazendo com que a importância do fator de ventilação também aumente ao longo dos anos, até 2100. Para as condições adotadas neste trabalho, os gráficos dos diferentes períodos indicam que maior capacidade térmica nas paredes e fator de ventilação e menor absorvância solar na envoltória serão importantes para promover conforto térmico na habitação sob o clima de Curitiba.

De modo análogo ao observado para o comportamento das variáveis independentes no indicador GHA, entre as variáveis mais importantes para o indicador CA (Figura 54) estão a transmitância térmica das paredes e capacidade térmica da cobertura e das paredes. Ao longo dos períodos climáticos, durante o alongamento de 2080, com a redução do consumo para aquecimento, a transmitância térmica das paredes deixa de ser o parâmetro termofísico mais importante e a capacidade térmica da cobertura passa a ser o parâmetro com maior influência nos resultados. Além disso, a capacidade térmica da cobertura possui o maior desvio padrão, ou seja, maior não linearidade e/ou interação com outras variáveis, em todos os períodos.

Para o indicador CR (Figura 55), a absorvância solar da cobertura e das paredes e a transmitância térmica das paredes são os parâmetros com maior influência no resultado, com alteração na ordem de importância conforme os períodos climáticos simulados: para as simulações com os dados TRY, a absorvância solar da cobertura é a variável mais importante;

para o período 2020, a transmitância térmica das paredes é a variável mais importante; e para os períodos 2050 e 2080, a absorptância solar das paredes é a variável mais importante. Adicionalmente, pode-se notar que, com as mudanças no clima, a transmitância solar e visível das janelas (que representa o sombreamento das aberturas) passa a se destacar como uma variável importante para o consumo de energia para resfriamento. Nesse âmbito, dentre as variáveis citadas, a transmitância solar e visível das janelas é monotônica, a absorptância solar da cobertura e das paredes são quase monotônicas, e a transmitância térmica das paredes é não linear.

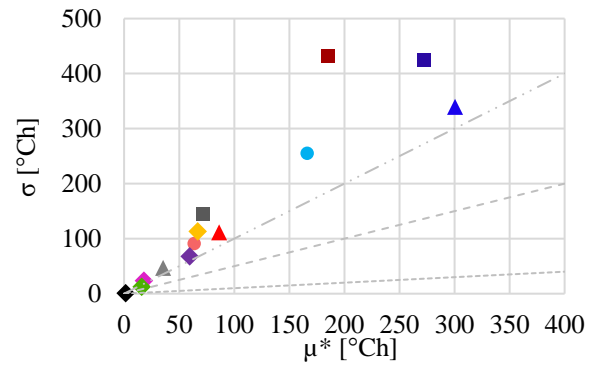
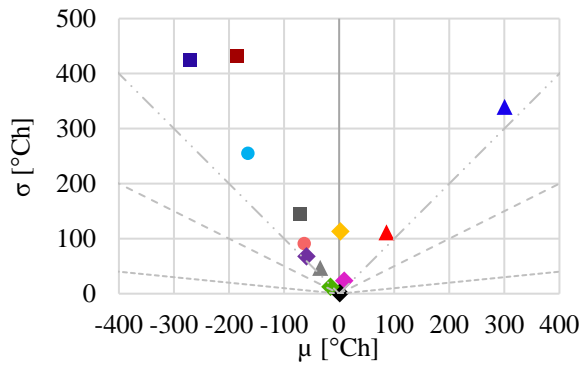
O indicador I_{eq} (Figura 56) sugere que a transmitância térmica das paredes é o parâmetro mais importante para o desempenho agregado da habitação em todos os períodos climáticos. Além disso, a capacidade térmica das paredes é a variável que possui a segunda maior influência nos resultados das simulações para os períodos TRY e 2020. Já nas simulações para os períodos 2050 e 2080, a absorptância solar da envoltória passa a ser mais importante do que a capacidade térmica das paredes, devido à maior incidência solar. Também é interessante notar o comportamento dos valores máximos da média do I_{eq} ao longo dos períodos climáticos: no período TRY, o valor agregado fica em torno de 0,25; nos períodos 2020 e 2050 chega a 0,30; e no período 2080 diminui para 0,26. Isso ocorre por causa do comportamento climático predominante local que impacta nos indicadores graus-hora e consumo para aquecimento. Na condição do TRY, predomina a condição para aquecimento; nas condições do cenário 2020 e 2050 a necessidade de aquecimento e resfriamento é mais equilibrada; e no período 2080 predomina a condição para resfriamento. Assim, evidencia-se que é mais difícil uma habitação apresentar bom desempenho em situações em que o clima varia mais entre calor e frio ao longo do ano, o que acarreta maiores números para o indicador de desempenho agregado.

4.3.1.4 São Paulo

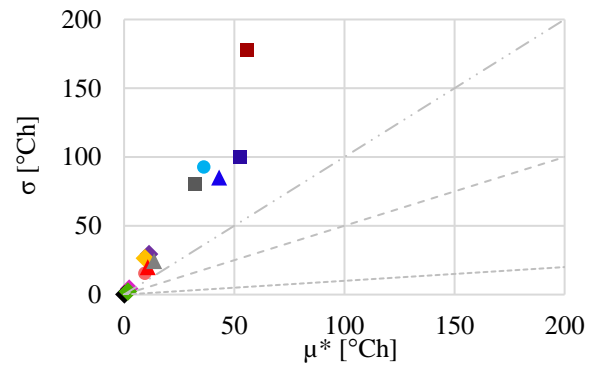
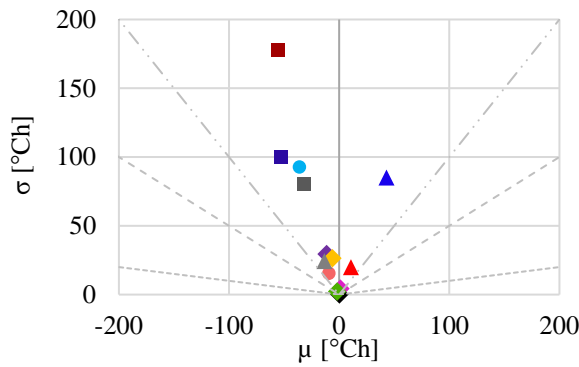
Nas Figuras 57 a 61, e no Quadro 9, apresentam-se os resultados das análises de sensibilidade para São Paulo.

Figura 57 – Índices de sensibilidade para o indicador GHA, em cada período climático de São Paulo

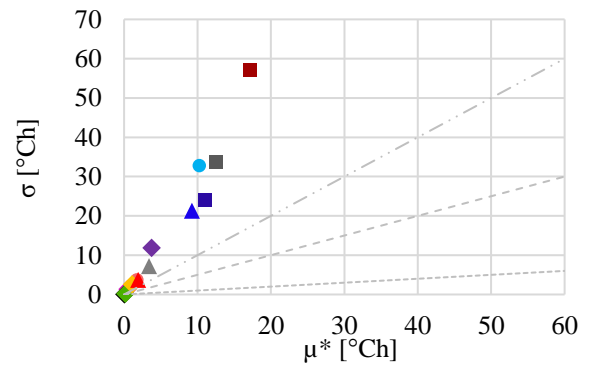
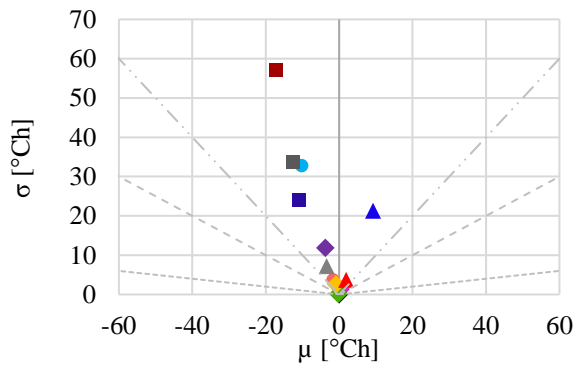
● acob ● apar ■ CTcob ■ CTpar ■ CTpis ◆ ecob ◆ Fvent ◆ FSvid ◆ OS ◆ tvenez ▲ Ucob ▲ Upar ▲ Upis
 - - - σ/μ ou $\sigma/\mu^* = 1$ - - - σ/μ ou $\sigma/\mu^* = 0,5$ - - - σ/μ ou $\sigma/\mu^* = 0,1$



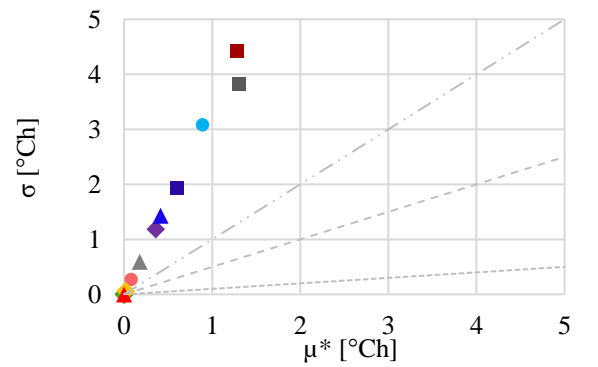
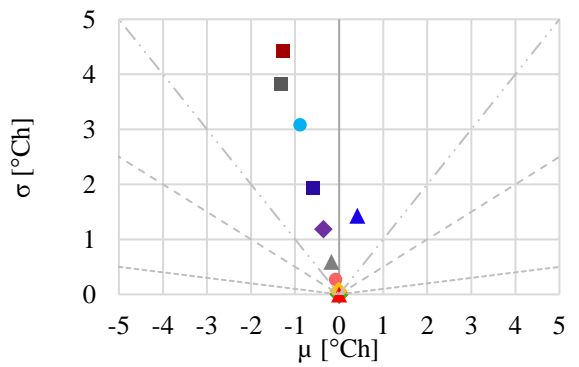
(a) TRY



(b) 2020



(c) 2050

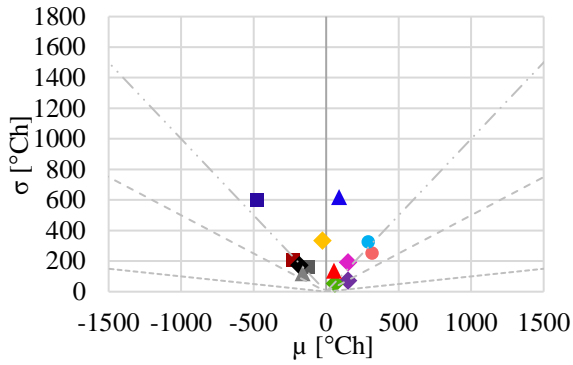


(d) 2080

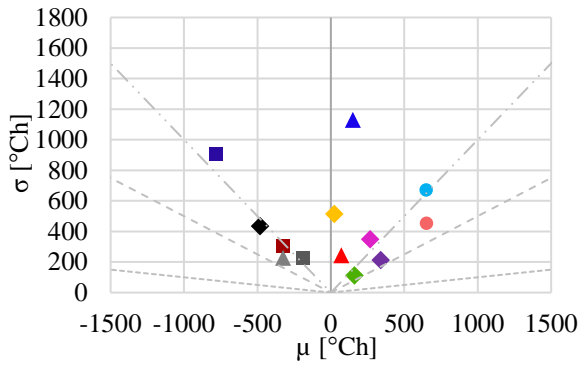
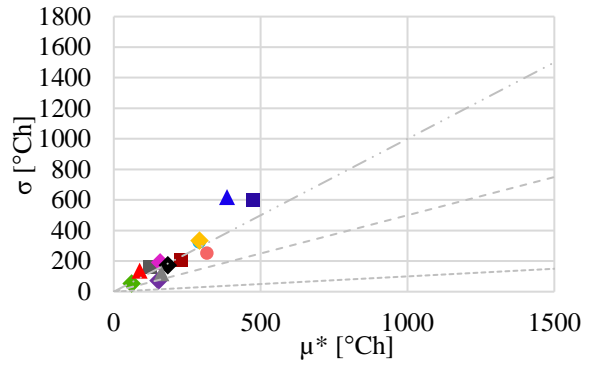
Fonte: o autor

Figura 58 – Índices de sensibilidade para o indicador GHR, em cada período climático de São Paulo

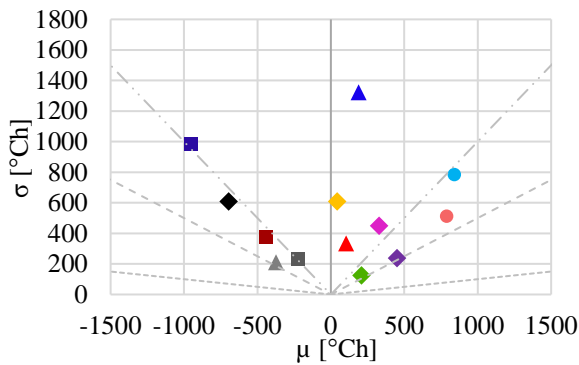
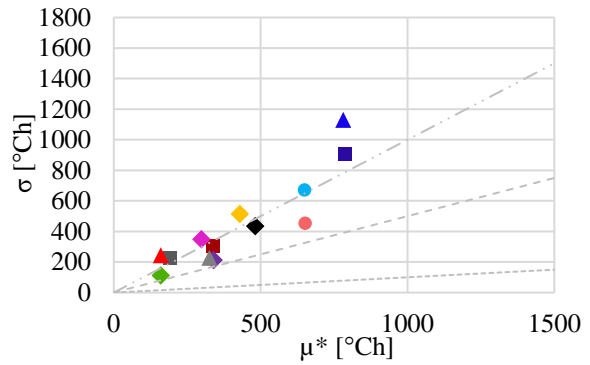
● acob ● apar ■ CTcob ■ CTpar ■ CTpis ◆ ecob ◆ Fvent ◆ FSvid ◆ OS ◆ tvenez ▲ Ucob ▲ Upar ▲ Upis
 - - - σ/μ ou $\sigma/\mu^* = 1$ - - - σ/μ ou $\sigma/\mu^* = 0,5$ - - - σ/μ ou $\sigma/\mu^* = 0,1$



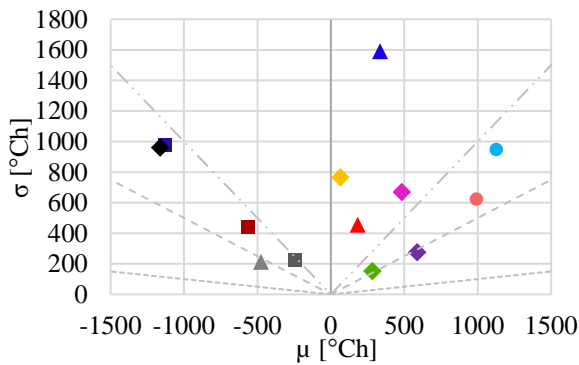
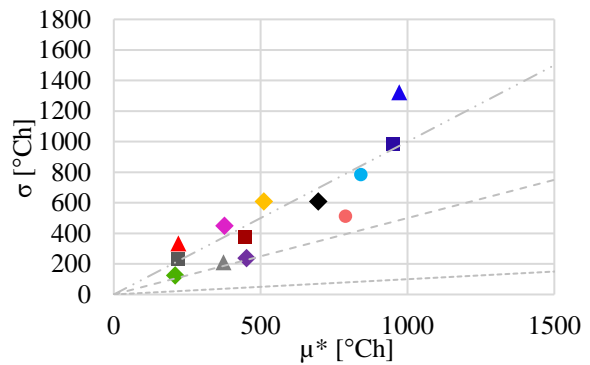
(a) TRY



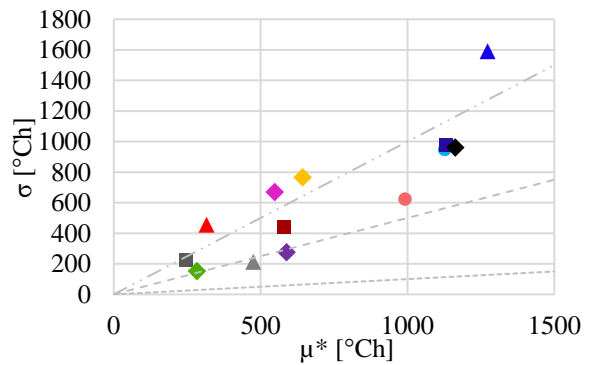
(b) 2020



(c) 2050



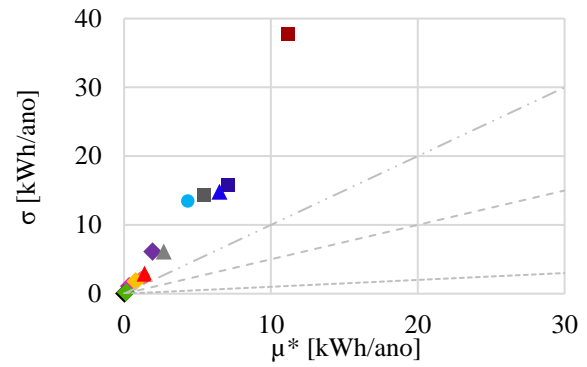
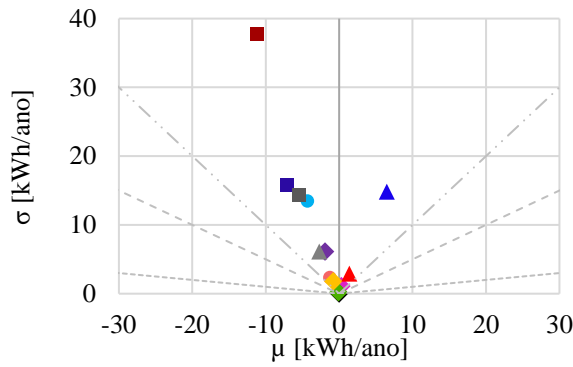
(d) 2080



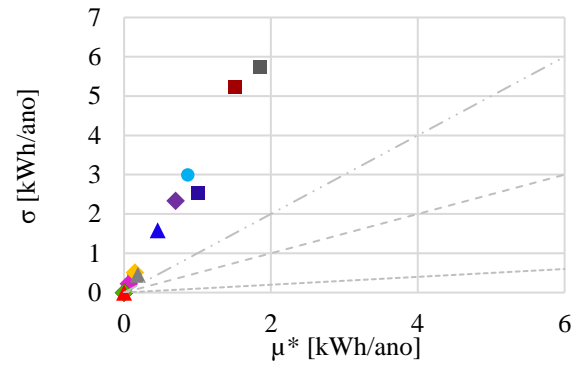
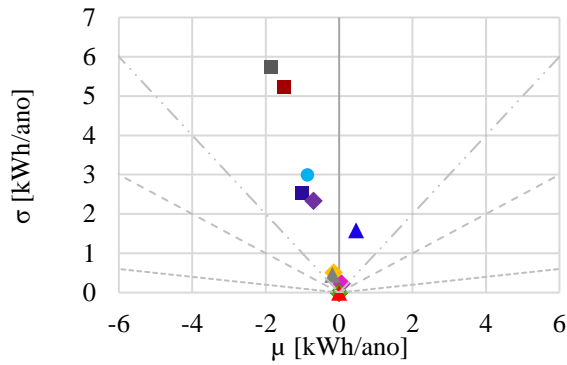
Fonte: o autor

Figura 59 – Índices de sensibilidade para o indicador CA, em cada período climático de São Paulo

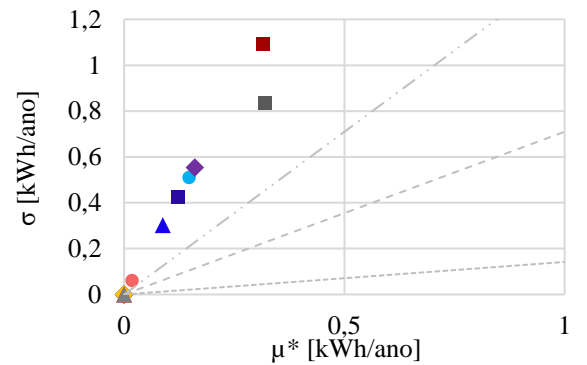
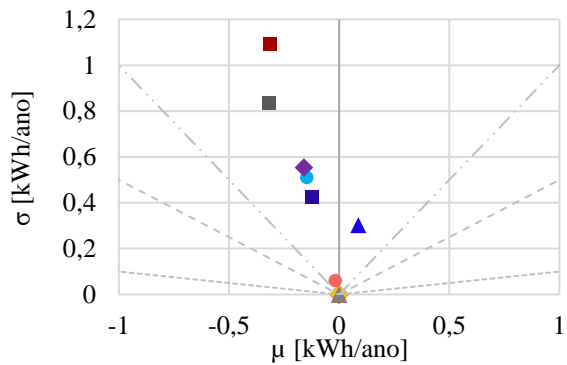
● acob ● apar ■ CTcob ■ CTpar ■ CTpis ◆ ecob ◆ Fvent ◆ FSvid ◆ OS ◆ tvenez ▲ Ucob ▲ Upar ▲ Upis
 - - - σ/μ ou $\sigma/\mu^* = 1$ - - - σ/μ ou $\sigma/\mu^* = 0,5$ - - - σ/μ ou $\sigma/\mu^* = 0,1$



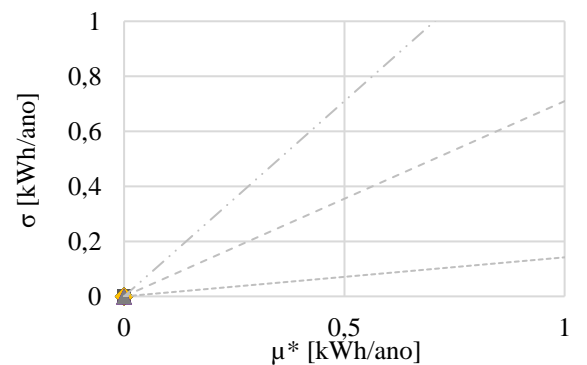
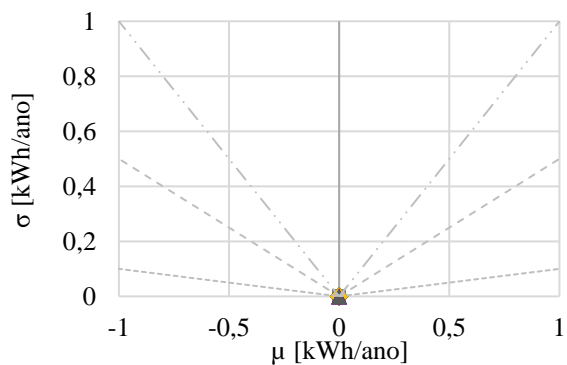
(a) TRY



(b) 2020



(c) 2050

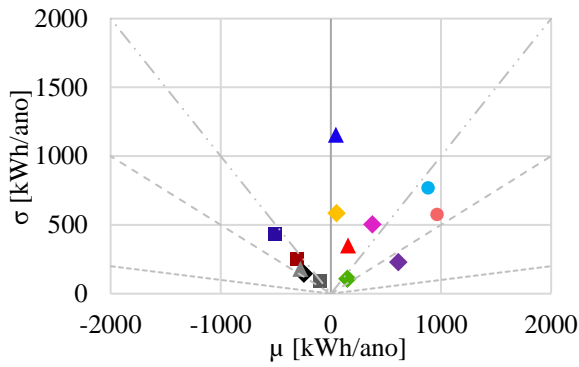


(d) 2080

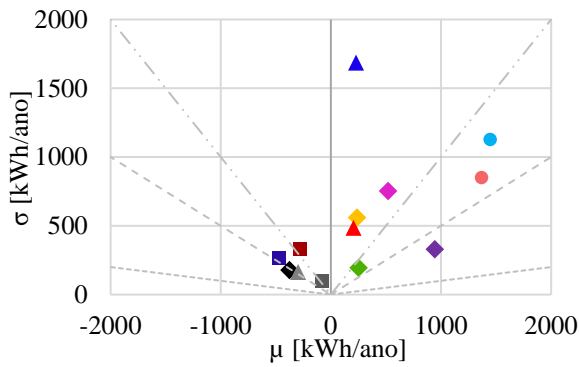
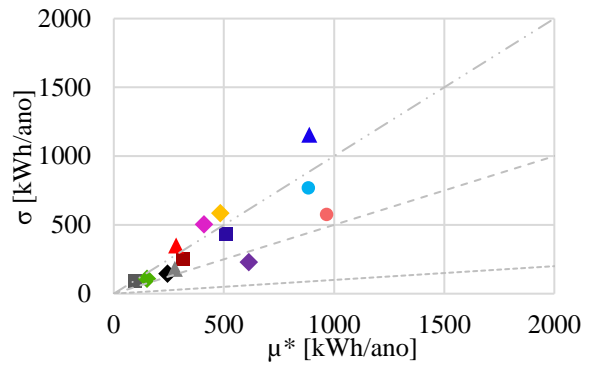
Fonte: o autor

Figura 60 – Índices de sensibilidade para o indicador CR, em cada período climático de São Paulo

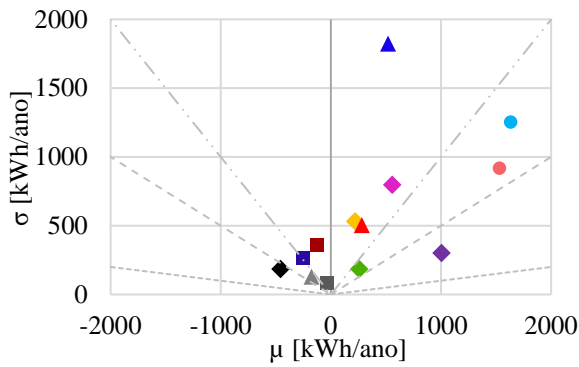
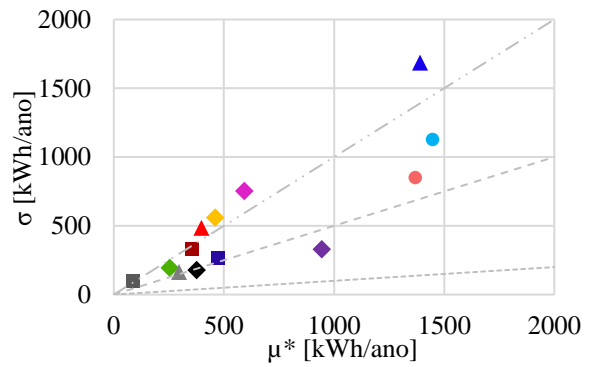
● acob ● apar ■ CTcob ■ CTpar ■ CTpis ◆ ecob ◆ Fvent ◆ FSvid ◆ OS ◆ tvenez ▲ Ucob ▲ Upar ▲ Upis
 - - - σ/μ ou $\sigma/\mu^* = 1$ - - - σ/μ ou $\sigma/\mu^* = 0,5$ - - - σ/μ ou $\sigma/\mu^* = 0,1$



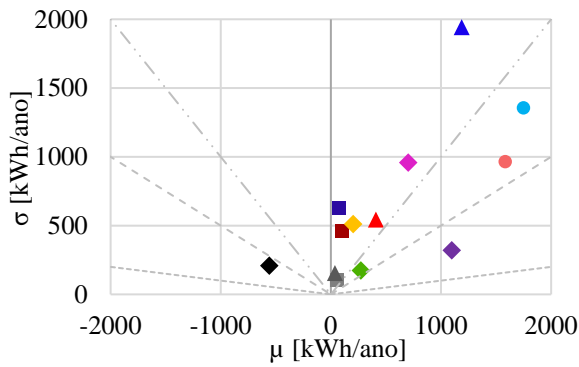
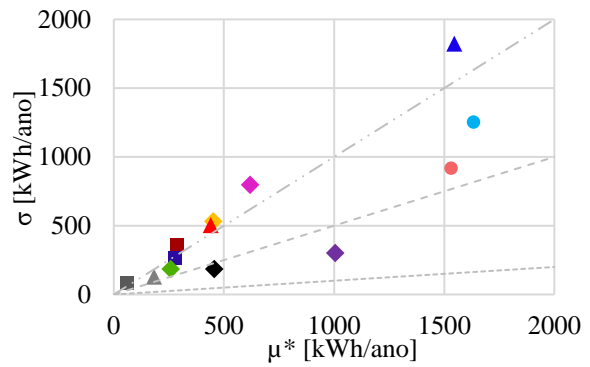
(a) TRY



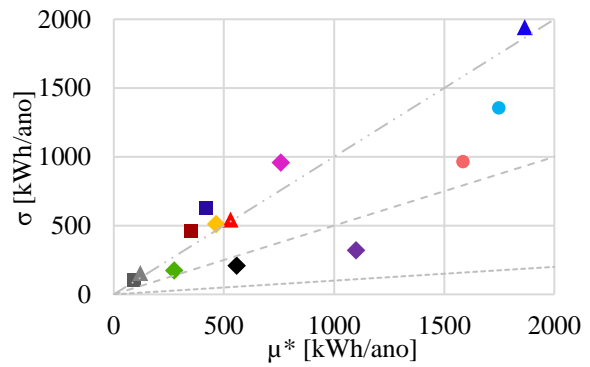
(b) 2020



(c) 2050



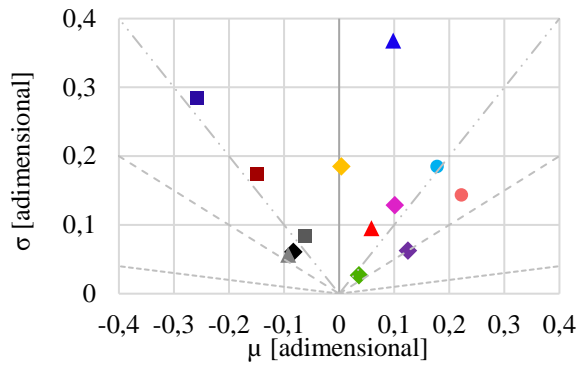
(d) 2080



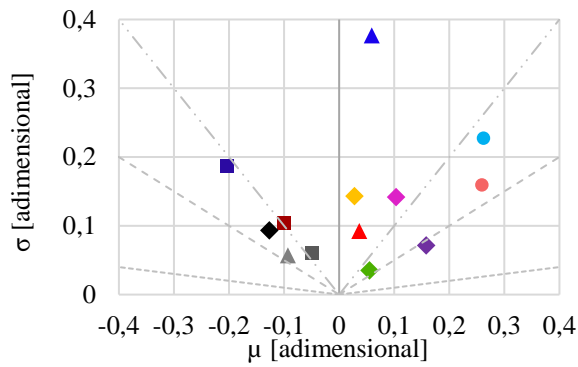
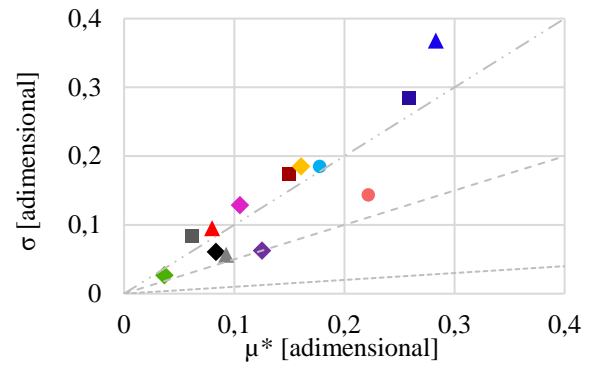
Fonte: o autor

Figura 61 – Índices de sensibilidade para o indicador I_{eq} , em cada período climático de São Paulo

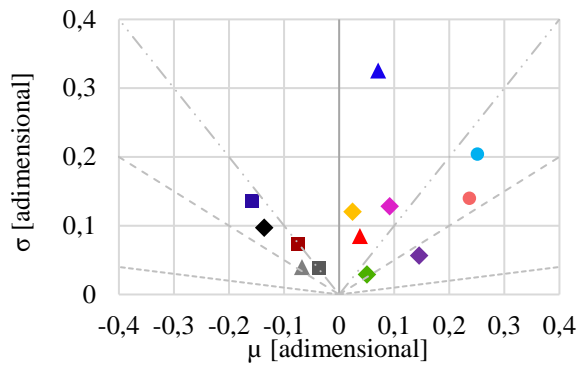
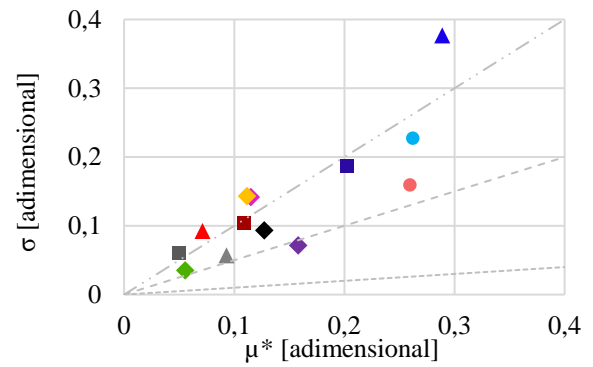
● acob ● apar ■ CTcob ■ CTpar ■ CTpis ◆ ecob ◆ Fvent ◆ FSvid ◆ OS ◆ tvenez ▲ Ucob ▲ Upar ▲ Upis
 - - - σ/μ ou $\sigma/\mu^* = 1$ - - - σ/μ ou $\sigma/\mu^* = 0,5$ - - - σ/μ ou $\sigma/\mu^* = 0,1$



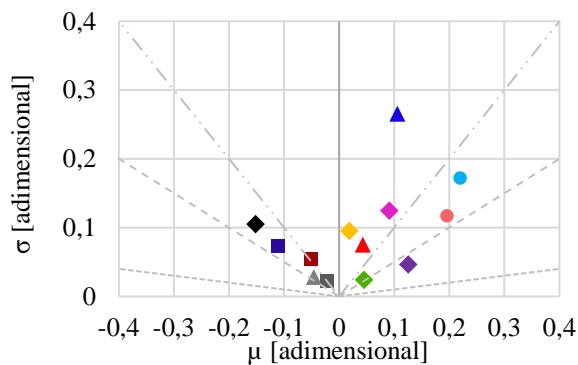
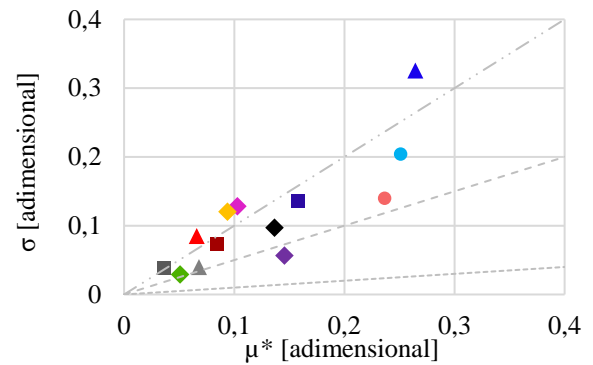
(a) TRY



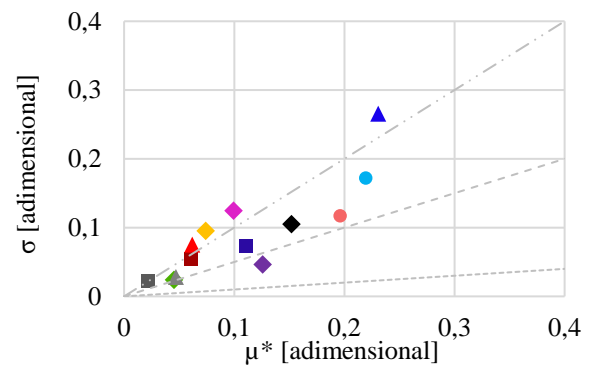
(b) 2020



(c) 2050



(d) 2080



Fonte: o autor

Quadro 9 – Média absoluta μ^* para as variáveis independentes em todas as variáveis dependentes, conforme análise de sensibilidade global de Morris, para cada período climático de São Paulo

Par. termof.	GHA [°Ch]				GHR [°Ch]				CA [kWh/ano]				CR [kWh/ano]				Ieq [adimensional]			
	TRY	2020	2050	2080	TRY	2020	2050	2080	TRY	2020	2050	2080	TRY	2020	2050	2080	TRY	2020	2050	2080
acob	63,50	9,34	1,71	0,08	317,09	651,70	788,13	991,41	1,29	0,13	0,02	0,00	965,29	1368,45	1530,65	1584,32	0,22	0,26	0,24	0,20
apar	165,97	36,05	10,24	0,89	290,31	649,06	840,60	1126,09	4,33	0,87	0,15	0,00	882,44	1446,14	1633,39	1748,15	0,18	0,26	0,25	0,22
CTcob	184,81	55,62	17,08	1,28	227,46	338,94	447,50	578,73	11,13	1,51	0,32	0,00	315,51	356,54	286,99	351,37	0,15	0,11	0,08	0,06
CTpar	271,80	52,69	10,97	0,60	472,42	785,37	951,20	1130,11	7,08	1,00	0,12	0,00	507,99	473,77	277,98	418,95	0,26	0,20	0,16	0,11
CTpis	71,26	32,24	12,44	1,31	122,80	192,77	219,31	247,14	5,45	1,86	0,32	0,00	95,39	84,56	60,27	88,97	0,06	0,05	0,04	0,02
ecob	18,01	2,25	0,46	0,00	158,00	297,78	376,84	547,41	0,33	0,07	0,00	0,00	409,02	591,84	618,47	757,90	0,11	0,12	0,10	0,10
Fvent	1,18	0,11	0,02	0,00	183,48	480,84	696,35	1162,03	0,01	0,00	0,00	0,00	243,91	376,16	456,39	557,67	0,08	0,13	0,14	0,15
FSvid	15,98	1,65	0,16	0,00	61,03	160,31	208,93	282,98	0,11	0,00	0,00	0,00	150,42	253,53	258,20	273,86	0,04	0,06	0,05	0,05
OS	66,67	9,39	1,06	0,02	291,94	428,71	510,47	642,80	0,78	0,15	0,00	0,00	484,02	460,33	451,63	463,82	0,16	0,11	0,09	0,07
tvnez	59,32	11,33	3,74	0,36	152,15	340,07	451,38	587,58	1,92	0,70	0,16	0,00	613,28	944,62	1005,60	1099,62	0,13	0,16	0,15	0,13
Ucob	86,18	10,65	1,89	0,00	88,06	159,96	219,57	315,97	1,40	0,00	0,00	0,00	282,21	398,29	439,52	530,19	0,08	0,07	0,07	0,06
Upar	300,30	43,05	9,23	0,41	385,74	780,95	971,43	1272,66	6,48	0,46	0,09	0,00	888,03	1389,47	1546,35	1864,91	0,28	0,29	0,26	0,23
Upis	35,45	13,52	3,38	0,18	161,57	325,29	373,31	474,84	2,70	0,19	0,00	0,00	276,90	296,21	182,27	119,41	0,09	0,09	0,07	0,05

Fonte: o autor

Para o indicador GHA (Figura 57), os parâmetros termofísicos mais importantes para a resposta do modelo mudam, conforme as mudanças no clima e a diminuição dos graus-hora para aquecimento. É possível observar que transmitância térmica das paredes é mais influente quando das simulações para o período TRY. Enquanto isso, nos períodos das progressões climáticas a capacidade térmica da envoltória e do piso passam a apresentar maior importância para o indicador GHA. Nota-se, ainda, que os parâmetros termofísicos investigados possuem comportamento não linear em todos os períodos considerado.

Por meio da Figura 58, percebe-se que, com a elevação da temperatura nos períodos futuros, e o conseqüente aumento dos graus-hora para aquecimento, o parâmetro termofísico mais importante para o indicador de desempenho GHR deixa de ser a capacidade térmica das paredes e passa a ser a transmitância térmica das paredes, que possui maior não linearidade em todos os períodos. Porém, destaca-se que a capacidade térmica das paredes está entre as três variáveis mais influentes nos resultados de todos os períodos simulados, junto à absorvância solar das paredes, aumentando sua monotonia ao longo dos anos. Também é interessante destacar o aumento da importância do fator de ventilação para o desempenho nos períodos futuros.

Com relação ao indicador CA (Figura 59), nota-se que os índices de consumo de energia com aquecimento reduzem muito ao longo dos anos, passando a ser nulo no alongamento dos anos 2080. Nas simulações para o período TRY, a capacidade térmica da cobertura apresenta-se como a variável mais importante para a resposta do modelo, seguida da capacidade e transmitância térmica das paredes; no período 2020, a capacidade térmica do piso é a variável mais importante; e no período 2050, a capacidade térmica da cobertura e do piso empatam como as variáveis mais importantes. Todas as variáveis são classificadas como não lineares nos três períodos climáticos que demandam consumo de energia para aquecimento.

Para o indicador CR (Figura 60), a absorvância solar da cobertura e das paredes e a transmitância térmica são as variáveis mais importantes para a resposta do modelo ao longo dos anos. Nas simulações para o período TRY, a mais importante é a absorvância solar da cobertura; para os períodos 2020 e 2050, a absorvância solar das paredes é mais importante; e para 2080, a transmitância térmica das paredes é mais importante. Os índices de importância destas variáveis são bem próximos, porém a transmitância térmica das paredes possui comportamento não linear e a absorvância solar da cobertura e das paredes possuem comportamento quase monotônico nos quatro períodos analisados. Além disso, embora não esteja nem entre os cinco

parâmetros mais influentes para o indicador CR, o fator de ventilação passa a se destacar nos cenários futuros, com comportamento monotônico (positivo).

Por último, os gráficos para o indicador I_{eq} (Figura 61), mostram que a transmitância térmica das paredes é o parâmetro mais importante para o desempenho agregado da habitação em todos os períodos climáticos, com comportamento não linear. Nas simulações para o arquivo TRY, a capacidade térmica das paredes é a variável que possui a segunda maior influência, porém, a partir do período 2020, a absorptância solar das paredes passa a ser mais importante para o indicador equivalente de desempenho, seguida da absorptância solar da cobertura. Também se percebe que o fator de ventilação passa a ser mais importante nas condições climáticas das progressões futuras, com comportamento quase monotônico, assim como a absorptância solar da envoltória.

4.3.2 Análises dos Índices de Sensibilidade

A seguir, analisam-se os índices de sensibilidade obtidos nesta dissertação, confrontando-os com resultados observados em trabalhos correlatos disponíveis na bibliografia. Destaca-se, contudo, que, além de serem raros os trabalhos focados em análises de sensibilidade de parâmetros construtivos na resposta termoenergética de edificações, não se encontraram trabalhos com esse nível de investigação, associando o desempenho de habitações brasileiras diante das mudanças climáticas.

De modo geral, observou-se que os índices de sensibilidade estão estreitamente associados ao clima e à ‘saída’ do modelo, ou seja, ao indicador de desempenho considerado, conforme notado na bibliografia (ALMEIDA, 2014; SILVA; GHISI, 2013; SILVA; ALMEIDA; GHISI, 2016; ZARA, 2019). Adicionalmente, como observado previamente no estudo de De Wilde e Tian (2010), a importância dos parâmetros termofísicos é muito sensível às mudanças climáticas no local em que a edificação está inserida, sobretudo quando acontecem mudanças radicais no padrão climático local, como em Curitiba.

Para condições climáticas mais quentes, como é o caso de Belém e Brasília, principalmente nos períodos futuros, os índices de sensibilidade mostraram que a absorptância solar da envoltória, a transmitância térmica das paredes e o fator de ventilação possuem maior importância para o desempenho termoenergético da habitação. Esses resultados estão razoavelmente alinhados com investigações de Zara (2019), que mostrou que, considerando indicadores GHR e CR para a mesma edificação deste trabalho, mas com as definições de

avaliação do RTQ-R (BRASIL, 2012) e utilizando análise de variância, a absorvância solar das paredes possui maior influência no desempenho termoenergético de habitações em sistemas construtivos leves, em Belém, usando o arquivo climático TRY. A autora, porém, não observou a mesma influência para a transmitância térmica das paredes, embora tenha percebido que a interação desta variável com a absorvância solar das paredes causa maiores variações na resposta do modelo; Zara (2019) não investigou a influência do fator de ventilação. Por sua vez, Silva, Almeida e Ghisi (2016) consideraram o fator de ventilação, além de outras 18 variáveis, em investigação sobre o desempenho termoenergético de habitações em Belém, por meio do arquivo climático TRY da cidade, também empregando o método de Morris para as análises de sensibilidade. Em seu estudo de caso, os autores concluíram que, na respectiva ordem, a absorvância solar da cobertura e das paredes, a transmitância térmica da cobertura e das paredes e o fator de ventilação foram os fatores mais influentes no cálculo do indicador GHR. Analogamente, a absorvância solar da cobertura, capacidade térmica das paredes, e absorvância solar das paredes foram mais influentes no indicador CR. Há que se destacar que existem várias diferenças na arquitetura e no padrão de uso, operação e ocupação da habitação desta pesquisa e a de Silva, Almeida e Ghisi (2016), que podem justificar o maior destaque para a importância da ventilação natural, no indicador GHR, e transmitância térmica das paredes, no indicador CR, observada na presente dissertação.

Em Curitiba e São Paulo, que apresentaram mudanças mais expressivas em suas características climáticas, os índices de sensibilidade mais importantes para os graus-hora, que representam o conforto térmico, incluem a capacidade e transmitância térmica das paredes. Devido às variações extremas de temperatura, por exemplo, a massa térmica configura uma característica importante, correlacionada ao conforto térmico (PEREIRA; GHISI, 2011), no sentido de equilibrar os ganhos e perdas de calor. A relevância dessas variáveis em cenários de mudanças climáticas em São Paulo, também é sugerida nas pesquisas de Nunes e Giglio (2020), Tateoka e Duarte (2015) e Triana, Lamberts e Sassi (2018). Adicionalmente, o aumento da importância do fator de ventilação em períodos futuros, principalmente para o indicador GHR no clima de São Paulo, corrobora os resultados de Tateoka e Duarte (2015), que também perceberam a importância da ventilação natural em cenários de mudanças climáticas na capital paulista.

Ainda a partir dos índices de sensibilidade, de acordo com o exposto na bibliografia, como em Invidiata e Ghisi (2016) e Triana, Lamberts e Sassi (2018), percebeu-se que os indicadores de consumo de energia para aquecimento de edificações brasileiras em climas

amenos, como Curitiba e São Paulo, tendem a diminuir muito nos períodos futuros, enquanto os indicadores de consumo de energia para resfriamento tendem a aumentar.

Em cenários que ainda demandam consumo de energia para aquecimento, os índices de sensibilidade mostraram que a transmitância térmica das paredes e a capacidade térmica da cobertura foram mais importantes. No trabalho de Silva e Ghisi (2013), em estudo para o clima de Florianópolis, mesma zona bioclimática que São Paulo, a emissividade da cobertura e a transmitância térmica das paredes e da cobertura foram mais importantes para o indicador CA, seguindo-se o método do RTQ-R (BRASIL, 2012) e Coeficientes de Regressão Padronizados e Coeficientes de Correlação Parcial para a análise de sensibilidade. Por sua vez, para Florianópolis e Curitiba, Silva, Almeida e Ghisi (2016) indicaram a transmitância térmica da cobertura e das paredes como mais importantes para o CA, conforme análise de Morris. Almeida (2014), a partir do RTQ-R (BRASIL, 2012) e por meio de análise de variância, notou que a transmitância térmica das paredes e o contato da cobertura com o exterior foram mais importantes para o CA em Florianópolis. Com método similar ao de Almeida (2014), todavia, especificamente para São Paulo e, também, Curitiba, Zara (2019) concluiu que a transmitância térmica das paredes e o contato do piso com o solo foram mais importantes para o CA. Ressalta-se que todos esses trabalhos citados foram desenvolvidos com arquivos climáticos do passado, não considerando cenários de mudanças climáticas.

Com relação ao aumento no consumo de energia para resfriamento, os índices de sensibilidade mostraram que, em todas as cidades, os parâmetros mais importantes incluem a transmitância térmica das paredes e a absorvância solar da envoltória – principalmente das paredes. Nesse sentido, o isolamento térmico influencia no consumo com ar-condicionado, visto que está diretamente relacionado com as trocas de calor do ambiente com o exterior, principalmente durante o uso do equipamento. Além disso, segundo Dornelles e Roriz (2007), a relação entre a transmitância térmica e absorvância solar ocorre porque o fluxo térmico que atravessa um elemento é proporcional à absorvância solar. Analisando-se a bibliografia que também investigou variáveis influentes no indicador CR de habitações nos climas deste trabalho – sem considerar cenários futuros –, percebe-se que os resultados divergem. Para Silva e Ghisi (2013), a emissividade, capacidade térmica e absorvância solar da cobertura foram mais importantes em Florianópolis. Também em Florianópolis, Almeida (2014), notou que, assim como nesta dissertação, a absorvância solar e a transmitância térmica das paredes foram mais importantes para o CR. Silva, Almeida e Ghisi (2016) concluíram que, em Florianópolis, a absorvância solar e a capacidade térmica da cobertura e das paredes foram mais importantes, e,

em Curitiba, a capacidade e transmitância térmica e absorvância solar das paredes foram mais influentes. Por último, Zara (2019) concluiu que, no clima de São Paulo e Curitiba, o contato com o solo e a absorvância solar e transmitância térmica das paredes foram mais influentes. Apesar das divergências, devido, principalmente, às considerações metodológicas diferentes nos trabalhos mencionados, notam-se relações entre a influência das propriedades termofísicas das paredes no indicador CR. Outra vez, destaca-se que os trabalhos citados não consideraram projeções climáticas.

5 CONCLUSÕES

Tendo em vista a necessidade e relevância de estudos referentes ao comportamento termoenergético de habitações brasileiras, considerando-se os efeitos das mudanças climáticas, este trabalho contribuiu com resultados para três tópicos principais, conforme as etapas da dissertação: ao validar a ferramenta de progressão de arquivos climáticos *CCWorldWeatherGen*, levando em conta as mudanças climáticas em São Paulo; ao apresentar progressões climáticas para Belém, Brasília, Curitiba e São Paulo, a partir dos arquivos TRY de cada cidade e considerando o cenário SRES-A2 do IPCC; e ao determinar a importância de parâmetros termofísicos, por meio de índices de sensibilidade global, no comportamento termoenergético de edificações residenciais brasileiras, diante das mudanças climáticas.

Primeiramente, com relação à validação da ferramenta *CCWorldWeatherGen*, concluiu-se que sua aplicação é confiável, no sentido de se desenvolver progressões de arquivos climáticos para análises de desempenho de edificações frente às mudanças climáticas, a depender da qualidade dos dados do arquivo climático TRY utilizado como base. Sabe-se que o clima é um evento caótico e de difícil previsibilidade, porém, dentro das limitações e inconsistências do arquivo climático TRY de São Paulo e das medições realizadas pelo IAG-USP, seja por causa da localização geográfica da estação ou precisão de equipamentos, observou-se confiança na progressão gerada por meio do *CCWorldWeatherGen*. Na comparação entre as variáveis climáticas – sobretudo a temperatura de bulbo seco e umidade relativa do ar, que possuem grande influência nas simulações computacionais e importância nas mudanças climáticas – das medições na estação meteorológica entre 2011 e 2019, e do arquivo climático para o período 2020, percebeu-se maior fidelidade entre os dados, face à comparação das medições e do arquivo climático TRY. Além do mais, é importante destacar a praticidade do *CCWorldWeatherGen* para gerar arquivos climáticos futuros completos, de forma livre. Em contrapartida, a aplicabilidade do *CCWorldWeatherGen* está condicionada à um arquivo climático baseado em dados meteorológicos de 1961 a 1990.

As progressões de variáveis climáticas de Belém, Brasília, Curitiba e São Paulo conduzem conclusões importantes – e preocupantes – a respeito de alterações no clima ao qual edificações brasileiras estarão sujeitas nos próximos anos, durante sua vida útil. Em relação aos dados meteorológicos do ano climático de referência de Belém, Brasília, Curitiba e São Paulo, estima-se que, no período atual, 2020 (2011–2040), a temperatura do ar destas cidades, em média anual, é superior em 1,33 °C, 1,14 °C, 1,08 °C e 0,91 °C, e, até 2100, será superior em

5,06 °C, 4,60 °C, 4,65 °C e 4,23 °C, respectivamente. Uma vez que o desempenho térmico e energético de edificações está diretamente associado ao clima local, essas elevações na temperatura do ar, por exemplo, afetarão o conforto térmico dos usuários e, conseqüentemente, o consumo de energia com condicionamento artificial. Portanto, o projeto de edificações deve, necessariamente, considerar mudanças climáticas, de modo que o ambiente construído possua resiliência em seu desempenho. Por meio das análises das variáveis climáticas, percebeu-se a relevância de se considerar os efeitos das alterações no clima e de se dispor de dados meteorológicos atualizados, adequados à vida útil do ambiente construído, para a realização de simulações. Adicionalmente, pondera-se que os arquivos climáticos TRY não são mais adequados para análises de desempenho de edificações, visto que seus dados meteorológicos estão defasados, não representando as condições climáticas atuais. Embora a ciência climática envolva diversas incertezas, é evidente que as condições do clima vêm mudando, e, assim sendo, a utilização de informações meteorológicas do passado não caracterizam uma técnica razoável para estudos de desempenho de edificações.

Os resultados das análises de sensibilidade global comprovaram que as mudanças climáticas, especialmente em Brasília, Curitiba e São Paulo, influenciam na importância de parâmetros termofísicos que refletem o desempenho térmico e energético de edificações. No clima de Belém, ao longo dos períodos climáticos, não se observaram mudanças relevantes na ordenação da importância das variáveis na resposta do modelo. O fator de ventilação, a absorvância solar da envoltória e a transmitância térmica das paredes se destacaram. Em Brasília, semelhantemente à Belém, o indicador de desempenho agregado mostrou que os parâmetros termofísicos mais importantes, alternando ligeiramente ao longo dos períodos climáticos, são a absorvância solar das paredes e da cobertura, o fator de ventilação e transmitância térmica das paredes. Por sua vez, em Curitiba e em São Paulo, que passarão por alterações climáticas determinantes, os parâmetros termofísicos mais importantes para o desempenho agregado são a transmitância e capacidade térmica das paredes e absorvância solar da envoltória. De modo geral, percebeu-se que os parâmetros que mais se destacaram nas análises de sensibilidade foram a absorvância solar da envoltória, o fator de ventilação, e a transmitância e capacidade térmica das paredes.

Este trabalho não pretendeu determinar especificamente quais estratégias resultam em melhor desempenho de habitações em períodos futuros, porém, por meio dos índices de sensibilidade, pode-se concluir a relevância da ventilação natural como estratégia de aumento de desempenho térmico, diante de temperaturas mais elevadas no futuro. Adicionalmente, a

baixa absorvância solar e sua interação com a transmitância térmica, mostram-se como características fundamentais a serem consideradas em definições de projeto de habitações. Uma vez que existe dificuldade de se estabelecer estratégias que satisfaçam todos os indicadores de desempenho térmico e energético, o projetista deve priorizar soluções que atendam à condição real de uso e operação da habitação. Nesse aspecto, também se conclui que a análise de sensibilidade é uma ferramenta valiosa para soluções de desempenho de edificações e deveria ser empregada em projetos do setor.

Finalmente, entende-se que os resultados apresentados enriquecem a bibliografia, contribuindo, principalmente, com informações acerca de desempenho térmico e energético de habitações, em diferentes períodos climáticos das cidades consideradas neste trabalho. As informações estão alinhadas com recomendações apontadas por pesquisadores, visto que o trabalho focou em aspectos passivos da construção, ou seja, mais viáveis e eficientes, diante da incerteza de avanços tecnológicos em equipamentos. Os resultados também cooperam para que as mudanças climáticas sejam mitigadas, uma vez que a adaptação às alterações no clima possibilita, por exemplo, a redução das emissões de poluentes, por meio da concepção de edificações projetadas para maior conforto térmico aos usuários, com um condicionamento ambiental energeticamente eficiente. Mais estudos são importantes para o avanço nas discussões abordadas nesta dissertação. Quanto maior o conhecimento sobre o tema, maior a resiliência às mudanças, que deve ocorrer por meio de informação e preparação para eventos climáticos extremos, de amplitude socioeconômica e socioambiental.

5.1 LIMITAÇÕES DO TRABALHO

Algumas limitações deste trabalho devem ser apontadas:

- A validação da ferramenta *CCWorldWeatherGen* é complexa e muito relativa, dependendo de limitações e inconsistências nos dados medidos no passado e atualmente, sendo que o próprio método de análise de acurácia adotado pode influenciar nos resultados obtidos. Assim, este trabalho visou apenas conferir, modestamente, e dentro das possibilidades encontradas, se as progressões não resultariam em dados demasiadamente imponderados. Além disso, deve-se considerar que a técnica foi comprovada em outros trabalhos, e, também por isso, já é bem consolidada na bibliografia;

- As progressões climáticas consideraram o cenário SRES-A2 de emissões, segundo o IPCC. Nesse sentido, há que se entender que as estimativas futuras de emissões de poluentes e previsões climáticas possuem muitas incertezas. Ademais, ao passo que as progressões são baseadas em arquivos climáticos anteriores, possíveis inconsistências nas variáveis desses arquivos podem prejudicar as previsões geradas por meio da ferramenta *CCWorldWeatherGen*;
- Os resultados de comportamento térmico e energético são válidos para as características de uma tipologia residencial específica, segundo as considerações adotadas de arquitetura, uso, ocupação e operação, situada sob as condições climáticas descritas de Belém, Brasília, Curitiba e São Paulo. Nesse âmbito, além das limitações de modelagem e de algoritmos de simulação, deve-se observar que não se considerou a evolução da eficiência, ou outros avanços tecnológicos, de equipamentos;
- As agregações para o cálculo do I_{eq} podem ocasionar algumas “distorções” à avaliação de desempenho por meio deste indicador. Portanto, para melhores soluções, o projetista, por exemplo, deveria priorizar as análises dos resultados específicos para os indicadores de graus-hora ou de consumo de energia, de acordo com suas necessidades específicas de avaliação de desempenho;
- Este trabalho considerou apenas algumas variáveis que contemplam o projeto de edificações. Logo, outras variáveis que são abrangidas pelas simulações, poderiam ser incluídas em outras análises, de acordo com a finalidade delas, e, possivelmente, resultar em resultados diferentes;
- Embora tenham sido identificados os parâmetros termofísicos mais importantes para o desempenho da habitação em diversas regiões do Brasil e em diferentes períodos climáticos, a finalidade do trabalho não foi, a partir desses parâmetros, definir quais deveriam ser as estratégias exatas para uma habitação eficiente em diferentes condições ambientais. O objetivo da investigação foi justamente analisar se e como possíveis alterações no clima local poderão afetar a resposta térmica e energética das habitações, identificando a importância de parâmetros termofísicos; a partir disso, estudos complementares poderiam considerar os efeitos das mudanças climáticas para a concepção de habitações eficientes em toda sua vida útil.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS

Algumas recomendações de trabalhos, tendo em vista as limitações e a relevância do tema desta pesquisa, são as seguintes:

- Considerar outros cenários climáticos, bem como outros períodos e, ainda, diferentes tipologias de edificações, buscando entender se e como essas variações metodológicas afetariam a importância dos parâmetros termofísicos relatada nesta dissertação;
- Analisar medidas e estratégias de eficiência energética em edificações, como a arquitetura bioclimática, tendo em vista a vida útil das construções e possíveis condições ambientais futuras;
- Investigar se possíveis avanços tecnológicos de equipamentos poderiam impactar no desempenho termoenergético do ambiente construído e, conseqüentemente, nos seus índices de sensibilidade.

REFERÊNCIAS

- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15220: Desempenho Térmico de Edificações**. Rio de Janeiro, 2005.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15575: Edificações habitacionais - Desempenho**. Rio de Janeiro, 2013.
- ABNT/CB-055. Associação Brasileira de Normas Técnicas; Comitê Brasileiro de Refrigeração, Ar-Condicionado, Ventilação e Aquecimento. **NBR 16401-2: Instalações de ar-condicionado – Sistemas centrais e unitários. Parte 2: Parâmetros de conforto térmico**. 3º projeto de revisão (novembro de 2017). São Paulo, 2017. Disponível em: <http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/disciplinas/140624%20REVISA%CC%83O%20ABNT%20NBR%2016401_2_versao%202017.pdf>. Acesso em: 18 março 2020.
- ADELARD, L.; BOYER, H.; GARDE, F.; GATINA, J. C. A detailed weather data generator for building simulations. **Energy and Buildings**, v. 31 (1), p. 75–88, 2000.
- ALMEIDA, L. S. S. **Influência de parâmetros físicos e geométricos no desempenho termoenergético de habitações unifamiliares**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2014.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.
- ALVES, C. A. **Resiliência das edificações às mudanças climáticas na região metropolitana de São Paulo**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade de São Paulo. São Paulo, 2014.
- ALVES, C. A.; DUARTE, D. H. S.; GONÇALVES, F. L. T. Residential buildings thermal performance and comfort for the elderly under climate changes context in the city of São Paulo, Brazil. **Energy and Buildings**, v. 114, p. 62–71, 2016.
- ANDOLSUN, S.; CULP, C. H.; HABERL, J. S.; WITTE, M. J. EnergyPlus vs DOE-2.1e: the effect of ground coupling on cooling/heating energy requirements of slab-on-grade code houses in four climates of the US. **Energy and Buildings**, v. 52, p. 189–206, 2012.
- ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Variabilidade, anomalia e mudança climática**. Notas de aula. Departamento de Ciências Exatas, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2007.
- ASDRUBALI, F.; FERRACUTI, B.; LOMBARDI, L.; GUATTARI, C.; EVANGELISTI, L.; GRAZIESCHI, G. A review of structural, thermo-physical, acoustical, and environmental properties of wooden materials for building applications. **Building and Environment**, v. 114, p. 307–332, 2017.
- ASHRAE. American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers. **Fundamentals**. Atlanta, GA, 2005.

- ASHRAE. American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers. **Energy-Efficient Design of Low-Rise Residential Buildings (ASHRAE Standard 90.2-2004)**. Atlanta, GA, 2007.
- ASHRAE. American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers. **Standard 55 - Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy**. Atlanta, GA, 2017a.
- ASHRAE. American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers. **Fundamentals (SI Edition)**. Atlanta, GA, 2017b.
- ASSAF, S.; NOUR, M. Potential of energy and water efficiency improvement in Abu Dhabi's building sector – Analysis of Estidama pearl rating system. **Renewable Energy**, v. 82, p. 100–107, 2015.
- BARBIRATO, G. M.; SOUZA, L. C. L.; TORRES, S. C. **Clima e cidade: a abordagem climática como subsídios para estudos urbanos**. Maceió: EDUFAL, 2007.
- BARRIOS, G.; HUELSZ, G.; ROJAS, J.; OCHOA, J. M.; MARINCIC, I. Envelope wall/roof thermal performance parameters for non air-conditioned buildings. **Energy and Buildings**, v. 50, p. 120–127, 2012.
- BATISTA, N. N.; LA ROVERE, E. L.; AGUIAR, J. C. R. Energy efficiency labeling of buildings: An assessment of the Brazilian case, **Energy and Buildings**, v. 43, p. 1179–1188, 2011.
- BECKER, R.; PACIUK, M. Thermal comfort in residential buildings - Failure to predict by Standard model. **Building and Environment**, v. 44 (5), p. 948–960, 2009.
- BELCHER, S. E; HACKER, J. N.; POWELL, D. S. Constructing design weather data for future climates, **Building Services Engineering Research and Technology**, v. 26, p. 49–61, 2005.
- BELZER, D. B.; SCOTT, M. J.; SANDS, R. D. Climate Change Impacts on U.S. Commercial Building Energy Consumption: An Analysis Using Sample Survey Data. **Energy Sources**, v. 18 (2), p. 177–201, 1996.
- BERNHEIMER, A. **Timber in the City**. ORO Editions, 2015.
- BODACH, S.; HAMHABER, J. Energy efficiency in social housing: Opportunities and barriers from a case study in Brazil. **Energy Policy**, v. 38(12), p. 7898–7910, 2010.
- BRANGER, F.; GIRAUDET, L. G.; GUIVARCH, C.; QUIRION, P. Global sensitivity analysis of an energy-economy model of the residential building sector. **Environmental Modelling & Software**, 70, p. 45–54, 2015.
- BRASIL. **Balanco Energético Nacional**. Ministério de Minas e Energia: Brasília, 2020.
- BRASIL. **Demanda de Energia 2050**. Ministério de Minas e Energia: Brasília, 2016.
- BRASIL. **Diretriz para Avaliação Técnica de Produtos – Diretriz SINAT N° 005 Sistemas construtivos estruturados em peças de madeira maciça serrada, com**

fechamentos em chapas delgadas (Sistemas leves tipo “Light Wood Framing”). Ministério das Cidades. Programa Brasileiro da Qualidade e Produtividade do Habitat – PBQP-H. Brasília, 2011b.

BRASIL. **Diretriz para Avaliação Técnica de Produtos – Diretriz SINAT N° 014 b Sistema construtivo a seco Saint-Gobain – Light Steel Framing.** Ministério das Cidades. Programa Brasileiro da Qualidade e Produtividade do Habitat – PBQP-H. São Paulo, 2018.

BRASIL. **Plano Nacional de Eficiência Energética: Premissas e Diretrizes Básicas.** Ministério de Minas e Energia: Brasília, 2011a.

BRASIL. **Portaria n.º 50, de 01 de fevereiro de 2013.** Anexo geral V – Catálogo de propriedades térmicas de paredes, coberturas e vidros Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia – INMETRO. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior: Rio de Janeiro, 2013.

BRASIL. **Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais – RTQ-R.** Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia – INMETRO. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior: Rio de Janeiro, 2012a.

BRASIL. **Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas – RTQ-C.** Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia – INMETRO. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior: Rio de Janeiro, 2012b.

BRE, F.; SILVA, A. S.; GHISI, E.; FACHINOTTI, V. D. Residential building design optimisation using sensitivity analysis and genetic algorithm, Brazil. **Energy and Buildings**, v. 133, p. 853–866, 2016.

BROCK, F. V.; NICOLAIDIS, C. E. **Instructor’s Handbook on Meteorological Instrumentation.** Atmospheric Technology Division, National Center for Atmospheric Research. Boulder, Colorado, 1984.

BUTLER, J. H.; MONTZKA, S. A. **The NOAA Annual Greenhouse Gas Index (AGGI),** National Oceanic & Atmospheric Administration. Boulder: NOAA, 2019. Disponível em: <<https://www.esrl.noaa.gov/gmd/aggi/aggi.html>>. Acesso em: 07 fevereiro 2020.

CAMPOLONGO, F.; CARIBONI, J.; SALTELLI, A. An effective screening design for sensitivity analysis of large models. **Environmental Modelling & Software**, v. 22 (10), p. 1509–1518, 2007.

CAMPOLONGO, F.; SALTELLI, A. Sensitivity analysis of an environmental model; an application of different analysis methods. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 57 (1), p. 49–69, 1997.

CAMPOLONGO, F.; TARANTOLA, S.; SALTELLI, A. Tackling quantitatively large dimensionality problems. **Computer Physics Communications**, v. 117, p. 75–85, 1999.

CANEPPELE, L. B. **Proposta de alterações das estratégias bioclimáticas sob a ótica da avaliação do desempenho térmico e eficiência energética.** Estudo de Caso em Unidade

Habitacional de Cuiabá - MT. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Ambiental) – Universidade Federal de Mato Grosso. Cuiabá, 2014.

CARLO, J. C.; LAMBERTS, R. **Processamento de Arquivos Climáticos para Simulação do Desempenho Energético de Edificações**. Eletrobrás/PROCEL, AET N 02/04, Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

CARLUCCI, S.; PAGLIANO, L. A review of indices for the long-term evaluation of the general thermal comfort conditions in buildings. **Energy and Buildings**, v. 53, p. 194–205, 2012.

CASAGRANDE, B. G. **Cenários climáticos futuros: diagnóstico prospectivo do desempenho termoenergético de edifícios comerciais no Brasil para o século XXI**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 2013.

CASAGRANDE, B. G.; ALVAREZ, C. E. Preparação de arquivos climáticos futuros para avaliação dos impactos das mudanças climáticas no desempenho termoenergético de edificações. **Ambiente Construído**, v. 13, n. 4, p. 173–187, 2013.

CB3E. Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações. **Proposta de Instrução Normativa Inmetro para a Classe de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (versão 02, 25 de setembro de 2018)**. Florianópolis, 2018. Disponível em: <<http://cb3e.ufsc.br/etiquetagem/desenvolvimento/atividades-2012-2016/trabalho-1/pesquisas>>. Acesso em: 18 março 2020.

CB3E. Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações. **Proposta de método para a avaliação da eficiência energética com base em energia primária de edificações comerciais, de serviços e públicas (versão 03, Agosto de 2017)**. Florianópolis, 2017. Disponível em: <<http://cb3e.ufsc.br/etiquetagem/desenvolvimento/atividades-2012-2016/trabalho-1/pesquisas>>. Acesso em: 18 março 2020.

CGEE. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. **Estudos relativos às mudanças climáticas e recursos hídricos para embasar o plano nacional de adaptação às mudanças climáticas**. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação: Brasília, 2014.

CHAN, A. L. S. Developing future hourly weather files for studying the impact of climate change on building energy performance in Hong Kong. **Energy and Buildings**, v. 43 (10), p. 2860–2868, 2011.

CHITALE, J.; KHARE, Y. P.; MUÑOZ-CARPENA, R.; DULIKRAVICH, G. S.; MARTINEZ, C. J. An effective parameter screening strategy for high dimensional models. In: Proceedings of the ASME 2017 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. **Proceedings...** Tampa, 2017.

CHOW, D.; LEVERMORE, G.; JONES, P.; LISTER, D.; LAYCOCK, P.; PAGE, J. Extreme and near-extreme climate change data in relation to building and plant design, **Building Services Engineering Research and Technology**. v.23, p. 233–242, 2002.

CIB; UNEP-IETC. International Council for Research and Innovation in Building and Construction; United Nations Environment Programme–International Environmental Technology Centre. **Agenda 21 for sustainable construction in developing countries**. Disponível em: <<https://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB3150.pdf>>. CSIR Building and Construction Technology, Pretoria, 2002.

CIBSE. Chartered Institution of Building Services Engineers. **Guide J - Weather, solar and illuminance data**. The Chartered Institution of Building Services Engineers, London, 2002.

CORBELLA, O.; CORNER, V. **Manual de arquitetura bioclimática tropical: para a redução de consumo energético**. Rio de Janeiro: Revan, 2011.

CORRADO, V.; MECHRI, H. E. Uncertainty and Sensitivity Analysis for Building Energy Rating. **Journal of Building Physics**, v. 33 (2). p. 125–156, 2009.

CRAWFORD, T. M.; DUCHON, C. E. An improved parameterization for estimating effective atmospheric emissivity for use in calculating daytime downwelling longwave radiation. **Journal of Applied Meteorology**, 38 (4), p. 474–480, 1999.

CRESESB. Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito. Centro de Pesquisas de Energia Elétrica. **Solarimetria e Instrumentos de Medição**. Rio de Janeiro: CRESESB, 2014. Disponível em: http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&lang=pt&cid=311. Acesso em: 24 ago. 2019.

DALLACORT, R.; RICIERI, R. P.; SILVA, S. L.; FREITAS, S. L.; SILVA, F. S. Análises do comportamento de um actinógrafo bimetálico (R. Fuess-Berlin-Steglitz) em diferentes tipos de cobertura do céu. **Acta Scientiarum**, v. 26, n. 4, p. 413–419, 2004.

DASCALAKI, E. G.; DROUTSA, K. G.; BALARAS, C. A.; KONTOYIANNIDIS, S. Building typologies as a tool for assessing the energy performance of residential buildings – A case study for the Hellenic building stock. **Energy and Buildings**, v. 43, n. 12, p. 3400–3409, 2011.

DE DEAR, R. J.; BRAGER, G. Developing an adaptive model of thermal comfort and preference. **ASHRAE Transactions**, v. 104 (1), p.145–167, 1998.

DE VECCHI, R. **Condições de conforto térmico e aceitabilidade da velocidade do ar em salas de aula com ventiladores de teto para o clima de Florianópolis/SC**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2011.

DE VECCHI, R.; SORGATO, M. J.; PACHECO, M.; CÂNDIDO, C.; LAMBERTS, R. Application of the adaptive model proposed by ASHRAE 55 in the Brazilian climate context: raising some issues. In: 8th Windsor Conference. **Proceedings...** London, 2014.

DE WILDE, P. DE; TIAN, W. Identification of key factors for uncertainty in the prediction of the thermal performance of an office building under climate change. **Building Simulation**, v. 2 (3), p. 157–174, 2009.

DE WILDE, P.; COLEY, D. The implications of a changing climate for buildings. **Building and Environment**, v. 55, p. 1–7, 2012.

DE WILDE, P.; TIAN, W. Predicting the performance of an office under climate change: A study of metrics, sensitivity and zonal resolution. **Energy and Buildings**, v. 42 (10), p. 1674–1684, 2010.

DOE. U.S. Department of Energy. **EnergyPlus version 9.3.0**. 2020. Disponível em: <<https://energyplus.net/downloads>>. Acesso em: 09 maio 2020.

DOE. U.S. Department of Energy. **Input Output Reference**. 2015. Disponível em: <https://energyplus.net/sites/default/files/pdfs/pdfs_v8.3.0/InputOutputReference.pdf>. Acesso em: 18 março 2020.

DOE. U.S. Department of Energy. **Weather data**. Disponível em: <<https://energyplus.net/weather>>. Acesso em: 29 fevereiro 2020.

DORNELLES, K. A.; RORIZ, M. Métodos alternativos para identificar a absorptância solar de superfícies opacas. **Ambiente Construído**, v. 7, n. 3, p. 109–127, 2007.

EICKER, U. **Energy efficient buildings with solar and geothermal resources**. John Wiley & Sons Ltd., 2014.

FANGER, P. O. **Thermal Comfort: Analysis and applications in environmental engineering**. McGraw-Hill: New York, 1972.

FARAH, S.; WHALEY, D.; SAMAN, W.; BOLAND, J. Integrating climate change into meteorological weather data for building energy simulation. **Energy and Buildings**, v. 183, p. 749–760, 2019.

FERREIRA, R. MCMV de madeira. **Revista Construção Mercado**. São Paulo: Pini, 2013.

FRIEDLINGSTEIN, P.; O'SULLIVAN, M.; JONES, M. W.; ANDREW, R. M.; HAUCK, J.; OLSEN, A.; PETERS, G. P.; PETERS, W.; PONGRATZ, J.; SITCH, S.; LE QUÉRÉ, C.; CANADELL, J. G.; CIAIS, P.; JACKSON, R. B.; ALIN, S.; ARAGÃO, L. E. O. C.; ARNETH, A.; ARORA, V.; BATES, N. R.; BECKER, M.; BENOIT-CATTIN, A.; BITTIG, H. C.; BOPP, L.; BULTAN, S.; CHANDRA, N.; CHEVALLIER, F.; CHINI, L. P.; EVANS, W.; FLORENTIE, L.; FORSTER, P. M.; GASSER, T.; GEHLEN, M.; GILFILLAN, D.; GKRTZALIS, T.; GREGOR, L.; GRUBER, N.; HARRIS, I.; HARTUNG, K.; HAVERD, V.; HOUGHTON, R. A.; ILYINA, T.; JAIN, A. K.; JOETZJER, E.; KADONO, K.; KATO, E.; KITIDIS, V.; KORSBAKKEN, J. I.; LANDSCHÜTZER, P.; LEFÈVRE, N.; LENTON, A.; LIENERT, S.; LIU, Z.; LOMBARDOZZI, D.; MARLAND, G.; METZL, N.; MUNRO, D. R.; NABEL, J. E. M. S.; NAKAOKA, S.-I.; NIWA, Y.; O'BRIEN, K.; ONO, T.; PALMER, P. I.; PIERROT, D.; POULTER, B.; RESPLANDY, L.; ROBERTSON, E.; RÖDENBECK, C.; SCHWINGER, J.; SÉFÉRIAN, R.; SKJELVAN, I.; SMITH, A. J. P.; SUTTON, A. J.; TANHUA, T.; TANS, P. P.; TIAN, H.; TILBROOK, B.; VAN DER WERF, G.; VUICHARD, N.; WALKER, A. P.; WANNINKHOF, R.; WATSON, A. J.; WILLIS, D.; WILTSHIRE, A. J.; YUAN, W.; YUE, X.; ZAEHLE, S. Global Carbon Budget 2020. **Earth System Science Data**, v. 12, n. 4, p. 3269–3340, 2020.

FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. R. **Manual do conforto térmico**. 6 ed. São Paulo: Studio Nobel, 2003.

GLAAS, E.; NESET, T. S.; KJELLSTRÖM, E.; ALM ÅS, A. J. Increasing house owners adaptive capacity: Compliance between climate change risks and adaptation guidelines in Scandinavia. **Urban Climate**, v. 14, p. 41–51, 2015.

GONÇALVES, S.; RODRIGUES, T. P.; CHAGAS, A. L. S. The impact of wind power on the Brazilian labor market. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 128, 109887, 2020.

GOOGLE MAPS. **Estação meteorológica IAG-USP**. 2020b. Consultado em: <<http://www.estacao.iag.usp.br/contatos.php>>. Acesso em: 02 março 2020.

GOOGLE MAPS. **Situação da estação IAG-USP, na cidade de São Paulo**. 2020a. Consultado em:

<<https://www.google.com/maps/place/23%C2%B039'04.4%22S+46%C2%B037'20.7%22W/@-23.6454699,-46.6465025,4946m/data=!3m1!1e3!4m6!3m5!1s0x0:0x0!7e2!8m2!3d-23.6512194!4d-46.6224186>>. Acesso em: 02 março 2020.

GOULART, S.; LAMBERTS, R.; FIRMINO, S. **Dados climáticos para projeto e avaliação energética de edificações para 14 cidades brasileiras**. Florianópolis: Núcleo de Pesquisa em Construção/UFSC, 1998

GRIEGO, D.; KRARTI, M.; HERNÁNDEZ-GUERRERO, A. Optimization of energy efficiency and thermal comfort measures for residential buildings in Salamanca, Mexico. **Energy and Buildings**, v. 54, p. 540–549, 2012.

GUAN, L. Preparation of future weather data to study the impact of climate change on buildings. **Building and Environment**, v. 44, n. 4, p. 793–800, 2009.

GUARDA, E. L. A.; DOMINGOS, R. M. A.; JORGE, S. H. M.; DURANTE, L. C.; SANCHES, J. C. M.; LEÃO, M.; CALLEJAS, I. J. The influence of climate change on renewable energy systems designed to achieve zero energy buildings in the present: A case study in the Brazilian Savannah. **Sustainable Cities and Society**, v. 52, 101843, 2020.

GUPTA, R.; GREGG, M. Using UK climate change projections to adapt existing English homes for a warming climate. **Building and Environment**, v. 55, p. 20–42, 2012.

HANSEN, J.; SATO, M.; RUEDY, R. **Science Briefs**, Goddard Institute for Space Studies. NASA, 2012. Disponível em: <https://www.giss.nasa.gov/research/briefs/hansen_17/>. Acesso em: 09 fevereiro 2020.

HAWKINS, E.; ORTEGA, P.; SUCKLING, E.; SCHURER, A.; HEGERL, G.; JONES, P.; JOSHI, M.; OSBORN, T. J.; MASSON-DELMOTTE, V.; MIGNOT, J.; THORNE, P.; VAN OLDENBORGH, G. J. Estimating changes in global temperature since the Preindustrial period. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 98, p. 1841–1856, 2017.

HAWKINS, E.; SUTTON, R. Connecting climate model projections of global temperature change with the real world. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 97, p. 963–980, 2016.

HEISELBERG, P.; BROHUS, H.; HESSELHOLT, A.; RASMUSSEN, H.; SEINRE, E.; THOMAS, S. Application of sensitivity analysis in design of sustainable buildings. **Renewable Energy**, v. 34 (9), p. 2030–2036, 2009.

HEWAWASAM, V.; MATSUI, K. Historical development of climate change policies and the Climate Change Secretariat in Sri Lanka. **Environmental Science and Policy**, v. 101, p. 255–261, 2019.

HUGHES, M.; PALMER, J.; CHENG, V.; SHIPWORTH, D. Global sensitivity analysis of England's housing energy model. **Journal of Building Performance Simulation**, v. 8, n. 5, p. 283–294, 2015.

HURMEKOSKI, E.; JONSSON, R.; NORD, T. Context, drivers, and future potential for wood-frame multi-story construction in Europe. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 99, p. 181–196, 2015.

IEA. International Energy Agency. **Energy Efficiency 2018: Analysis and outlooks to 2040**. Paris, 2018.

IEA; UNEP. International Energy Agency and United Nations Environment Programme. **2018 Global Status Report: Towards a zero-emission, efficient and resilient buildings and construction sector**. 2018.

IFBQ. Instituto Falcão Bauer da Qualidade. Documento de Avaliação Técnica. **DA Tec n.20**. Sistema construtivo leve em madeira. 2013.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. **Valores Extremos Registrados em 30 de setembro de 2020**. 2020. Disponível em:
<<https://tempo.inmet.gov.br/CondicoesRegistradas>>. Acesso em 24 dezembro 2020.

INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Estimativa de desmatamento por corte raso na Amazônia Legal para 2020 é de 11.088 km²**. 2020. Disponível em:
<http://www.inpe.br/noticias/noticia.php?Cod_Noticia=5615>. Acesso em: 21 janeiro 2021.

INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Programa de Cálculo do Desflorestamento da Amazônia**. 2021a. Disponível em:
<<http://www.obt.inpe.br/OBT/assuntos/programas/amazonia/prodes>>. Acesso em: 21 janeiro 2021.

INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Programa Queimadas**. 2021b. Disponível em: <http://queimadas.dgi.inpe.br/queimadas/portal-static/estatisticas_paises/>. Acesso em: 21 janeiro 2021.

IAG-USP. Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo. **Boletim Climatológico Anual da Estação Meteorológica do IAG-USP**. Seção Técnica do Serviço Meteorológico, v. 12. São Paulo: IAG-USP, 2008.

IAG-USP. Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo. **Dados meteorológicos medidos de 01/01/2011 a 31/12/2019: temperatura do ar externo; umidade relativa; radiação solar global**. São Paulo: IAG-USP, 2019. Solicitado em: http://www.estacao.iag.usp.br/sol_dados.php. Acesso em: 31 abril 2020.

INVIDIATA, A.; GHISI, E. Impact of climate change on heating and cooling energy demand in houses in Brazil. **Energy and Buildings**, v. 130, p. 20–32, 2016.

IOOSS, B.; VEIGA, S.; JANON, A.; PUJOL, G.; BROTO, B.; BOUMHAOUT, K.; DELAGE, T.; EL AMRI, R.; FRUTH, J.; GILQUIN, L.; GUILLAUME, J.; LE GRATIET, L.; LEMAITRE, P.; MARREL, A.; MEYNAOUI, A.; NELSON, B. L.; MONARI, F.; OOMEN, R.; RAKOVEC, O.; RAMOS, B.; ROUSTANT, O.; SONG, E.; STAUM, J.; SUEUR, R.; TOUATI, T.; WEBER, F. **R Package ‘sensitivity’**. Global Sensitivity Analysis of Model Outputs. Version 1.20.0. CRAN. Disponível em: <<https://cran.r-project.org/package=sensitivity>>. Acesso em 02 junho 2020.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2001: The Scientific Basis**. 2001. Cambridge University Press, Cambridge; New York, 2001.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Geneva, 2007.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Geneva, 2014.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. **Global Warming of 1.5°C: Summary for policymakers**. Geneva, 2018.

IRENA. International Renewable Energy Agency. **Global Energy Transformation: A Roadmap to 2050**. 2018. Abu Dhabi, 2018.

JENTSCH, M. F. **Climate Change Weather File Generators: Technical reference manual for the CCWeatherGen and CCWorldWeatherGen tools**. Version 1.2. Southampton: University of Southampton, 2012.

JENTSCH, M. F.; BAHAJ, A. S.; JAMES, P. A. B. Climate change future proofing of buildings — Generation and assessment of building simulation weather files. **Energy and Buildings**, 40 (12), p. 2148–2168, 2008.

JENTSCH, M. F.; BAHAJ, A. S.; JAMES, P. A. B. **Manual CCWorldWeatherGen**. Climate change world weather file generator. Version 1.6. Southampton: University of Southampton, 2012.

JENTSCH, M. F.; JAMES, P. A. B.; BOURIKAS, L.; BAHAJ, A. S. Transforming existing weather data for worldwide locations to enable energy and building performance simulation under future climates. **Renewable Energy**, v. 55, p. 514–524, 2013.

JUBB, I.; CANADELL, P.; DIX, M. **Representative Concentration Pathways (RCPs)**. Australian Climate Change Science Program, 2016. Disponível em: <https://www.cawcr.gov.au/projects/Climatechange/wp-content/uploads/2016/11/ACCSP_RCP.pdf>. Acesso em: 09 fevereiro 2020.

KASTEN, F.; YOUNG, A. T. Revised optical air mass tables and approximation formula. **Applied Optics**, v. 28 (22), p. 4735–4738, 1989.

KELLONG, W. W.; SCHWARTZ, R. **Climate Change and Society Consequences of Increasing Atmospheric Carbon Dioxide**. Boulder: Westview Press, 1981.

KERSHAW, T.; EAMES, M.; COLEY, D. Assessing the risk of climate change for buildings: A comparison between multi-year and probabilistic reference year simulations. **Building and Environment**, v. 46, n. 6, p. 1303–1308, 2011.

KHARE, Y.; MUÑOZ-CARPENA, R. **Global Sensitivity Analysis: Elementary Effects Method of Morris using Sampling for Uniformity (SU) MatLab code manual**. Department of Agricultural & Biological Engineering, University of Florida. Gainesville, 2014.

KIRIMTAT, A.; KOYUNBABA, B. K.; CHATZIKONSTANTINOU, I.; SARIYILDIZ, S. Review of simulation modeling for shading devices in buildings. **Renewable Sustainable Energy Reviews**, v. 53, p. 23–49, 2016.

KLEIJNEN, J. P. C. Sensitivity analysis and related analyses: A review of some statistical techniques. **Journal of Statistical Computation and Simulation**, v. 57, n. 1(4), p. 111–142, 1997.

KRUG, T.; OMETTO, J.; ARAGÃO, L.; VINHAS, L. **O Brasil e as Mudanças Climáticas**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2019.

KUSUDA, T.; ACHENBACH, P. R. Earth Temperatures and Thermal Diffusivity at Selected Stations in the United States, **ASHRAE Transactions**, v. 71(1), p. 61–75, 1965.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência energética na arquitetura**. 3ª ed. Rio de Janeiro, 2014.

LAWRIE, L. K. EnergyPlus Weather Converter. **Subroutine for ground temperature calculation: CalcGroundTemps.**, Fortran code, 2003.

LEHMANN, S. Low carbon construction systems using prefabricated engineered solid wood panels for urban infill to significantly reduce greenhouse gas emissions. **Sustainable Cities and Society**, v. 6, p. 57–67, 2013.

LEVY, P. E.; CANNELL, M. G. R.; FRIEND, A. D. Modelling the impact of future changes in climate, CO₂ concentration and land use on natural ecosystems and the terrestrial carbon sink. **Global Environmental Change**, v. 14 (1), p. 21–30, 2004.

LOPES, G. C.; ROMEU, V.; AZENHA, M. FERREIRA, T. M. A systematic review of Prefabricated Enclosure Wall Panel Systems: focus on technology driven for performance requirements. **Construction and Building Materials**, v. 40, p. 688–703, 2018.

LÓPEZ, G.; BATLES, F. J. Evaluation of broadband turbidity algorithms for estimating the Ångström turbidity coefficient. **Óptica Pura y Aplicada**, v. 37 (3), p. 3127–3130, 2004.

LUCENA, A. F. P.; HEJAZI M.; VASQUEZ-ARROYO, E.; TURNER, S.; KOBERLE, A. C.; DAENZER, K. et al. Interactions between climate change mitigation and adaptation: the case of hydropower in Brazil. **Energy**, v. 164, p. 1161–1177, 2018.

LUCENA, A. F.; SZKLO, A. S.; SCHAEFFER, R.; DUTRA, R. M. The vulnerability of wind power to climate change in Brazil. **Renewable Energy**, v. 35, p. 904–912, 2010.

- MALM, W. C.; WALTHER, E. G. **A Review of Instrument-Measuring Visibility-Related Variable**. Environmental Protection Agency. Las Vegas, 1980.
- MANZANO-AGUGLIARO, F.; MONTOYA, F. G.; SABIO-ORTEGA, A.; GARCÍACRUZ, A. Review of bioclimatic architecture strategies for achieving thermal comfort. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 49, p. 736–755, 2015.
- MARA, T. A.; TARANTOLA, S. Application of global sensitivity analysis of model output to building thermal simulations. **Building Simulation**, v. 1 (4), p. 290–302, 2008.
- MARAFON, C.; LACO, M.; SANCHES, J. C. M.; LEÃO, M.; BORGES LEÃO, E. F. T. Estratégias bioclimáticas em avaliação de desempenho térmico nas habitações de interesse social em Sinop/MT. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental – REGET**, v. 18(3), p. 1008–1021, 2014.
- MARENCO, J. A. **Mudanças Climáticas Globais e seus Efeitos sobre a Biodiversidade: Caracterização do Clima Atual e Definição das Aletrações Climáticas para o Território Brasileiro ao longo do Século XXI**. Ministério do Meio Ambiente: Brasília, 2006.
- MARINOSKI, D. Notas de aula. **Alvenarias: conceitos, alvenaria de vedação, processo construtivo**. Departamento de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2011.
- MAURO, G. M.; HAMDY, M.; VANOLI, G. P.; BIANCO, N.; HENSEN, J. L. M. A new methodology for investigating the cost-optimality of energy retrofitting a building category. **Energy and Buildings**, v. 107, p. 456–478, 2015.
- MCFALL-JOHNSEN, M. **Heat waves and floods shattered records. Fires ravaged the Arctic and the Amazon. This was the climate crisis in 2019**. 2019. Disponível em: <<https://www.businessinsider.com/recording-breaking-weather-linked-to-climate-change-2019-11>>. Acesso em: 05 fevereiro 2020.
- MCKINSEY & COMPANY. **Pathways to a Low-Carbon Economy for Brazil**. 2009b.
- MCKINSEY & COMPANY. **Pathways to a Low-Carbon Economy**. 2009a.
- MCLEOD, R. S.; HOPFE, C. J.; KWAN, A. An investigation into future performance and overheating risks in Passivhaus dwellings. **Building and Environment**, v. 70, p. 189–209, 2013.
- MECHRI, H. E.; CAPOZZOLI, A.; CORRADO, V. Use of the ANOVA approach for sensitive building energy design. **Applied Energy**, v. 87 (10), p. 3073–3083, 2010.
- MENBERG, K.; HEO, Y.; CHOUDHARY, R. Sensitivity analysis methods for building energy models: Comparing computational costs and extractable information. **Energy and Buildings**, v. 133, p. 433–445, 2016.
- MOLDOVAN, R.; DRAGOS, G. Increasing passive houses performances by using ecological structures. **Bulletin of the Transilvania University of Brasov**, v. 8, p. 383–388, 2015.
- MOLINA, J. C.; CALIL JÚNIOR, C. Sistema construtivo em wood frame para casas de madeira. **Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas**, v. 31(2), p. 143–156, 2010.

MOLINEAUX, B.; INEICHEN, P.; DELAUNAY, J. J. Direct luminous efficacy and atmospheric turbidity – Improving model performance. **Solar Energy**, v. 55 (2), p. 125–137, 1995.

MONTEIRO, H.; FREIRE, F. Life-cycle assessment of a house with alternative exterior walls: Comparison of three impact assessment methods. **Energy and Buildings**, v. 47, p. 572–583, 2012.

MONTES, M. A. T. **Abordagem integrada no ciclo de vida de habitação de interesse social considerando mudanças climáticas**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2016.

MORICE, C. P.; KENNEDY, J. J.; RAYNER, N. A.; JONES, P. D. Quantifying uncertainties in global and regional temperature change using an ensemble of observational estimates: The HadCRUT4 data set. **Journal of Geophysical Research**, v. 117, D08101, 2012.

MORRIS, M. D. Factorial Sampling Plans for Preliminary Computational Experiments. **Technometrics**, v. 33, n. 2, p. 161–173, 1991.

NAKICENOVIC, N.; SWART, R. **Special report on emissions scenarios**. A special report of working group III of the intergovernmental panel on climate change, Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2000.

NASA. National Aeronautics and Space Administration. **Carbon Dioxide**. 2021c. Disponível em: <<https://climate.nasa.gov/vital-signs/carbon-dioxide/>>. Acesso em: 21 janeiro 2021.

NASA. National Aeronautics and Space Administration. **Global Temperature**. 2021a. Disponível em: <<https://climate.nasa.gov/vital-signs/global-temperature/>>. Acesso em: 21 janeiro 2021.

NASA. National Aeronautics and Space Administration. **Global Temperature Anomalies from 1880 to 2020**. 2021b. Disponível em: <<https://svs.gsfc.nasa.gov/4882>>. Acesso em: 21 janeiro 2021.

NEMATCHOUAA, M. K.; OROSA, J. A.; REITERC, S. Climate change: Variabilities, vulnerabilities and adaptation analysis - A case of seven cities located in seven countries of Central Africa. **Urban Climate**, v. 29, 100486, 2019.

NEMBRINI, J.; SAMBERGER, S.; LABELLE, G. Parametric scripting for early design performance simulation. **Energy and Buildings**, v. 68, p. 786–798, 2014.

NICHELE, B. P. **Alvenaria estrutural de blocos cerâmicos: controle na execução para evitar manifestações patológicas**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2014.

NOAA. National Oceanic and Atmospheric Administration. **Anomalies vs. Temperature**. 2020. Disponível em: <<https://www.ncdc.noaa.gov/monitoring-references/dyk/anomalies-vs-temperature>>. Acesso em: 04 fevereiro 2020.

- NOAA. National Oceanic and Atmospheric Administration. **Global Surface Temperature Anomalies**. 2021. Disponível em: <https://www.ncdc.noaa.gov/cag/global/time-series/globe/land_ocean/ann/12/1880-2020>. Acesso em: 21 janeiro 2021.
- NUNES, G. H.; GIGLIO, T. G. F. Influência das mudanças climáticas no desempenho térmico de uma habitação com diferentes sistemas construtivos: análise do clima de São Paulo. **Revista Principia – Divulgação Científica e Tecnológica do IFPB**, n. 48, p. 46–61, 2020.
- NUNES, G.; MOURA, J. D. M.; GÜTHS, S.; ATEM, C.; GIGLIO, T. Thermo-energetic performance of wooden dwellings: Benefits of cross-laminated timber in Brazilian climates. **Journal of Building Engineering**, v. 32, 101468, 2020.
- NUNES, G. H.; SANCHES, G. V.; ZARA, R. B.; GIGLIO, T. G. F. Análise de métodos de cálculo para determinação da temperatura do solo em simulações computacionais. In: XV ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO; XI ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, p. 2169-2178. **Anais...** João Pessoa, 2019.
- OLINGER, M. S.; MAZZAFERO, L.; SILVA, R. M. M.; ELI, L. G.; MELO, A. P.; FOSSATI, M.; LAMBERTS, R. Definição de escalas de eficiência energética da envoltória em edificações residenciais: etiquetagem brasileira. **Revista Técnico Científica do CREA-PR**. Ed. Especial, 2019.
- OLONSCHECK, M.; HOLSTEN, A.; KROPP, J. P. Heating and cooling energy demand and related emissions of the German residential building stock under climate change, **Energy Policy**, v. 39, p. 4795–4806, 2011.
- PANÃO, M. J. N. Revisiting cooling energy requirements of residential buildings in Portugal in light of climate change. **Energy and Buildings**, v. 76, p. 354–362, 2014.
- PARRY, M. L. **Climate Change and World Agriculture**. Boulder: Westview Press, 1990.
- PBMC. Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. **Apresentação**. 2020. Disponível em: <<http://www.pbmc.coppe.ufrj.br/index.php/pt/>>. Acesso em: 12 fevereiro 2020.
- PBMC. Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. **Base científica das mudanças climáticas**. Primeiro Relatório de Avaliação Nacional. Rio de Janeiro, 2013.
- PBMC. Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. **Mudanças climáticas e cidades**. Relatório Especial do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. Rio de Janeiro, 2016.
- PEEL, M. C.; FINLAYSON, B. L.; MCMAHON, T. A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 11, p. 1633–1644, 2007.
- PEETERS, L.; DE DEAR, R.; HENSEN, J.; D’HAESELEER, W. Thermal comfort in residential buildings: Comfort values and scales for building energy simulation. **Applied Energy**, v.86 (5), p. 772–780, 2009.
- PEREIRA, C. D.; GHISI, E. The influence of the envelope on the thermal performance of ventilated and occupied houses. **Energy and Buildings**, v. 43, n. 12, p. 3391–3399.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; PES, M. P.; SEGUNDO, E. I. C.; LYRA, A. A. The impacts of global climate changes on the wind power density in Brazil. **Renewable Energy**, v. 49, p. 107–110, 2013.

PEREZ, R.; INEICHEN, P.; SEALS, R.; MICHALSKY, J.; STEWART, R. Modelling Daylight Availability and Irradiance Components from Direct and Global Irradiance. **Solar Energy**, v. 44 (5), p. 271–289, 1990.

PRESZNHUK, A. **Construções sustentáveis: alternativas para minimizar os impactos ambientais de uma edificação residencial**. 2005. 88f. Monografia (Especialização em Engenharia Ambiental) – Departamento Acadêmico de Mecânica, Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná. Curitiba, 2005.

QUEIROZ, A. R.; FARIA, V. A. D.; LIMA, L. M. M.; LIMA, J. W. M. Hydropower revenues under the threat of climate change in Brazil. **Renewable Energy**, v. 133, p. 873–882, 2019.

RADHI, H. Evaluating the potential impact of global warming on the UAE residential buildings a contribution to reduce the CO₂ emissions. **Building and Environment**, v. 44 (12), p. 2451–2462, 2009.

RAMAGE, M. H.; BURRIDGE, H.; BUSSE-WICHER, M.; FEREDAY, G.; REYNOLDS, T.; SHAH, D. U.; WU, G.; YU, L.; FLEMING, P.; DENSLEY-TINGLEY, D.; ALLWOOD, J.; DUPREE, P.; LINDEN, P. F.; SCHERMAN, O. The wood from the trees: The use of timber in construction. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 68, 333–359, 2017.

RIDLEY, B.; BOLAND, J.; LAURET, P. Modelling of diffuse solar fraction with multiple predictors, **Renewable Energy**, v. 35, p. 478–483, 2010.

RITCHIE, H.; ROSER, M. **CO₂ and Greenhouse Gas Emissions**. Our World in Data. 2019. Disponível em: <<https://ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions>>. Acesso em: 06 fevereiro 2020.

ROBERT, A.; KUMMERT, M. Designing net-zero energy buildings for the future climate, not for the past, **Building and Environment**, v. 55, p. 150–158, 2012.

ROSENTHAL, D. H., GRUENSPECHT, H. K., MORAN, E. A. Effects of global warming on energy use for space heating and cooling in the United States. **The Energy Journal**, v. 16, p. 77–96, 1995.

ROSENZWEIG, C.; SOLECKI, W. D.; HAMMER, S. A.; MEHROTRA, S. **Urban climate change in context**. In: Climate Change and Cities: First Assessment Report of the Urban Climate Change Research Network. Cambridge University Press, 2011.

R-PROJECT. **The R Project for Statistical Computing**. Disponível em: <<https://www.r-project.org/>>. Acesso em 22 março 2020.

SALTELLI, A. Sensitivity analysis: could better methods be used. **Journal of Geophysical Research**, v. 104, p. 3789–3793, 1999.

SALTELLI, A.; RATTO, M.; ANDRES, T.; CAMPOLONGO, F.; CARIBONI, J.; GATELLI, D.; SAISANA, M.; TARANTOLA, S. **Global Sensitivity Analysis: The Primer**. John Wiley and Sons Ltd., 2008.

SALTELLI, A.; TARANTOLA, S.; CAMPOLONGO, F. Sensitivity analysis as an ingredient of modelling. **Statistical Science**, v. 15 (4), p. 377–395, 2000.

SANCHEZ, D. G.; LACARRIÈRE, B.; MUSY, M.; BOURGES, B. Application of sensitivity analysis in building energy simulations: Combining first- and second-order elementary effects methods. **Energy and Buildings**, v. 68 (C), p. 741–750, 2014.

SCHOLES, R. J. Climate change and ecosystem services. **WIREs Climate Change**, v. 7, p. 537–550, 2016.

SCOTT, M. J.; WRENCH, L. E.; HADLEY, D. L. Effects of Climate Change on Commercial Building Energy Demand. **Energy Sources**, v. 16 (3), p. 317–332, 1994.

SETTER, L.; SMOORENBURG, E.; WIJESURIYA, S.; TABARES-VELASCO, P. C. Energy and hygrothermal performance of cross laminated timber single-family homes subjected to constant and variable electric rates. **Journal of Building Engineering**, v. 25, 100784, 2019

SILVA, A. S. **Desenvolvimento de um método para avaliação do desempenho térmico e energético de edificações aplicando análise de incertezas e sensibilidade**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2017.

SILVA, A. S.; ALMEIDA, L. S. S.; GHISI, E. Análise de incertezas físicas em simulação computacional de edificações residenciais. **Ambiente Construído**, v. 17 (1), p. 289–303, 2017.

SILVA, A. S.; ALMEIDA, L. S. S.; GHISI, E. Decision-making process for improving thermal and energy performance of residential buildings: A case study of constructive systems in Brazil. **Energy and Buildings**, v. 128, p. 270–286, 2016.

SILVA, A. S.; GHISI, E. Análise de sensibilidade global dos parâmetros termofísicos de uma edificação residencial de acordo com o método de simulação do RTQ-R. **Ambiente Construído**, v. 13 (4), p. 135–148, 2013.

SILVA, A. S.; GHISI, E. Estimating the sensitivity of design variables in the thermal and energy performance of buildings through a systematic procedure. **Journal of Cleaner Production**, v. 244, 118753, 2020.

SILVA, A. S.; GHISI, E.; LAMBERTS, R. Performance evaluation of longterm thermal comfort indices in building simulation according to ASHRAE Standard 55. **Building and Environment**, v. 102, p. 95–115, 2016.

SIMLAB. V2.2 Reference Manual. **Simulation environment for uncertainty and sensitivity analysis**. Joint Research Center of the European Commission. 2008. Disponível em: <<https://ec.europa.eu/jrc/en/samo/simlab>>. Acesso em: 22 fevereiro 2020.

SOLAUN, K.; CERDÁ, E. Climate change impacts on renewable energy generation. A review of quantitative projections, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 116, 109415, 2019.

SORGATO, M. J.; MELO, A. P.; MARINOSKI, D. L.; LAMBERTS, R. Análise do procedimento de simulação da NBR 15575 para avaliação do desempenho térmico de edificações residenciais. **Ambiente Construído**, v. 14 (4), p. 83–101, 2014.

SWAMI, M. V.; CHANDRA, S. Correlations for pressure distribution on buildings and calculation of natural-ventilation airflow. **ASHRAE Transactions**, v. 94 (1), p. 243–266, 1988.

TALEGHANI, M.; TENPIERIK, M.; VAN DEN DOBBELSTEEN, A.; DE DEAR, R. Energy use impact of and thermal comfort in different urban block types in the Netherlands. **Energy and Buildings**, v. 67, p. 166–175, 2013.

TATEOKA, S. S.; DUARTE, D. H. Adaptação às mudanças climáticas: desafios para requalificação de edifícios existentes em São Paulo. In: XIV ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO; X ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO. **Anais...** Balneário Camboriú, 2015.

TAYLOR, P. G.; FRANCOEUR, M.; TRUDEAU, N. Final energy use in IEA countries: the role of energy efficiency. **Energy Policy**, v. 38, n. 11, p. 6463–6474, 2011.

TECVERDE. **Projeto arquitetônico de edificação em wood frame**. 2013.

TIAN, W. A review of sensitivity analysis methods in building energy analysis. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 20, p. 411–419, 2013.

TIAN, W.; DE WILDE, P. Uncertainty and sensitivity analysis of building performance using probabilistic climate projections: A UK case study. **Automation in Construction**, v. 20 (8), p. 1096–1109, 2011.

TONIN, M. L. K. **Análise da eficiência energética de técnicas de arquitetura bioclimática: Simulação computacional em edificação escolar**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Universidade Estadual de Maringá. Maringá, 2016.

TRIANA, M. A.; LAMBERTS, R.; SASSI, P. Desempenho de habitações de interesse social frente às mudanças climáticas. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO. **Anais...** São Paulo, 2016.

TRIANA, M. A.; LAMBERTS, R.; SASSI, P. Should we consider climate change for Brazilian social housing? Assessment of energy efficiency adaptation measures. **Energy and Buildings**, v. 158, p. 1379–1392, 2018.

UN. United Nations. **The Paris Agreement**. 2015. Disponível em: <<https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>>. Acesso em: 11 fevereiro 2020.

UNFCCC. United Nations Framework Convention on Climate Change. **UN Climate Change Conference - December 2019**. 2019. Disponível em: <<https://unfccc.int/cop25>>. Acesso em 08 fevereiro 2020.

UNFCCC. United Nations Framework Convention on Climate Change. **UN Climate Change Annual Report 2018**. Bonn, Alemanha, 2018.

UNIVERSITY OF SOUTHAMPTON. **CCWorldWeatherGen**. Disponível em: <<http://www.energy.soton.ac.uk/ccworldweathergen>>. Acesso em: 04 janeiro 2020.

UPTON, B.; MINER, R.; SPINNEY, M.; HEATH, L. S. The greenhouse gas and energy impacts of using wood instead of alternatives in residential construction in the United States. **Biomass & Bioenergy**, v. 32, p. 1–10, 2008.

VAN HOOFF, T.; BLOCKEN, B.; HENSEN, J. L. M.; TIMMERMANS, H. J. P. On the predicted effectiveness of climate adaptation measures for residential buildings. **Building and Environment**, v. 82, p. 300–316, 2014.

VAN PAASSEN, A. H. C.; LUO, Q. X. Weather data generator to study climate change on buildings. **Building Services Engineering Research and Technology**, v.23, p. 251–258, 2002.

VITAL, M. H. F. Aquecimento global: acordos internacionais, emissões de CO₂ e o surgimento dos mercados de carbono no mundo. **BNDES Setorial**, v. 24, n. 48, p. 167–244, 2018.

WANG, L.; LIU, X.; BROWN, H. Prediction of the impacts of climate change on energy consumption for a medium-size office building with two climate models. **Energy and Buildings**, v. 157, p. 218–226, 2017.

WHITE, R. M. The World Climate Conference: Report by the Conference Chairman. **WMO Bulletin**, 28 (3), 177–178, 1979.

WILLIAMS, D. ELGHALI, L.; WHEELER, R.; FRANCE, C. Climate change influence on building life cycle greenhouse gas emissions: Case study of a UK mixed-use development. **Energy and Buildings**, v. 48, p. 112–126, 2012.

WMO. World Meteorological Organization. **Preliminary 2018 Edition of CIMO Guide (WMO-No.8)**. Commission for Instruments and Methods of Observation. Geneva: WMO, 2018. Disponível em: <https://www.wmo.int/pages/prog/www/IMOP/publications/CIMO-Guide/Prelim_2018_ed/Preliminary-2018-edition.html>. Acesso em: 29 fevereiro 2020.

WMO. World Meteorological Organization. The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2018. **WMO greenhouse gas bulletin**, v. 15, p. 1–8, 2019.

WRIGHT, A. J. Evidence for climate change relevant to building design in the UK, 1976 e 2000. **Bu. Serv. Eng. Res. Technol.** v. 23, p. 279–285, 2002.

YVON-DUROCHER, G.; ALLEN, A. P.; BASTVIKEN, D.; CONRAD, R.; GUDASZ, C.; ST-PIERRE, A.; THANH-DUC, N.; DEL GIORGIO, P. A. Methane fluxes show consistent temperature dependence across microbial to ecosystem scales. **Nature**, v. 507, p. 488–491, 2014.

ZARA, R. B. **Influência dos parâmetros termofísicos no desempenho térmico de edificações residenciais em sistemas construtivos leves**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Londrina. Londrina, 2019.

ZHU, L.; HURT, R; CORREIA, D. BOEHM, R. Detailed energy saving performance analyses on thermal mass walls demonstrated in a zero energy house. **Energy and Buildings**, v. 41, p. 303–310, 2009.

ZILLMAN, J. W. A History of Climate Activities. **WMO Bulletin**, v. 58 (3), 141–150, 2009.

APÊNDICE A – Descrição Técnica Do *CCWORLDWEATHERGEN*

Neste apêndice, apresenta-se a descrição técnica da ferramenta *CCWorldWeatherGen*, segundo o manual de referência (JENTSCH, 2012), com as rotinas de cálculo utilizadas para a geração de dados meteorológicos adaptados às mudanças climáticas para o mundo inteiro, de acordo com o modelo HadCM3. Os cálculos se baseiam em métodos bem estabelecidos na bibliografia, conforme as referências listadas no decorrer do texto.

A.1 TEMPERATURA DO SOLO

O cabeçalho do arquivo EPW, geralmente, contém informações sobre a temperatura média mensal do solo em um ou mais níveis de profundidade. A temperatura média do solo para um determinado dia do ano é derivada da temperatura de bulbo seco média anual prevista e da amplitude da temperatura de bulbo seco média mensal mais quente e mais fria, seguindo o método desenvolvido por Kusuda e Achenbach (1965). Os cálculos apresentados são baseados em rotinas desenvolvidas por Lawrie (2003) para o *EnergyPlus Weather Converter*. É necessário, primeiro, o cálculo das futuras temperaturas de bulbo seco horárias, usando as Equações (19) e (20). A futura temperatura média do solo, para um determinado dia do ano, pode então ser calculada pela Equação (18):

$$gt_d = dbt_a - dbt_{amp} \times \left[2 \times \left(\frac{\pi}{365} \right) \times d - (d_{shift} \times 0,017214 + 0,34178) - \tan^{-1}(z) \right] \times \sqrt{y} \quad \text{Equação (18)}$$

Em que:

$$z = \frac{1 - \exp(-x) \times [\cos(x) + \sin(x)]}{1 - \exp(-x) \times [\cos(x) - \sin(x)]},$$

$$y = \frac{\exp(-x)^2 - 2 \times \exp(-x) \times \cos(x) + 1}{2 \times x^2};$$

$$x = \sqrt{\frac{\pi}{D_s \times 365}} \times \text{depth};$$

gt_d é a futura temperatura média do solo para um determinado dia d do ano [°C];

dbt_a é a futura temperatura de bulbo seco média anual [°C];

dbt_{amp} é a amplitude decorrente da maior e menor temperatura de bulbo seco média mensal [°C];

$depth$ é a profundidade do solo [m];

D_s é a difusividade térmica do solo [m²/dia];

d é o dia do ano;

d_{shift} é o dia médio do mês contendo a temperatura mínima da superfície (dias: 15, 46, 74, 95, 135, 166, 196, 227, 258, 288, 288, 319, 349).

As profundidades de 0,5, 2 e 4 metros abaixo da superfície foram escolhidas para os futuros arquivos meteorológicos. Como não há informações específicas do local, para a difusividade térmica do solo, o valor padrão de 0,055741824 m²/dia, dado por Lawrie (2003), foi selecionado para os cálculos. Após executar a Equação (18) para cada dia do ano, as médias mensais da temperatura do solo podem ser facilmente calculadas pela ferramenta.

A.2 TEMPERATURA DE BULBO SECO

Os dados HadCM3 fornecem previsões de temperatura média, média diária máxima e mínima, proporcionando assim informações sobre mudanças mensais na temperatura média, bem como mudanças na faixa de temperatura diurna. A fim de contabilizar isto, os dados TRY são deslocados pelo valor médio da temperatura do modelo HadCM3 e estendidos pela mudança prevista na faixa de temperatura diurna, seguindo Belcher, Hacker e Powell (2005). O fator de escala para a função de alongamento é calculado da seguinte forma:

$$\alpha dbt_m = \frac{\Delta TMAX_m - \Delta TMIN_m}{\langle dbt_{0max} \rangle_m - \langle dbt_{0min} \rangle_m} \quad \text{Equação (19)}$$

Em que:

αdbt_m é o fator de escala para variação mensal da temperatura de bulbo seco [adimensional];

$\Delta TMAX_m$ é a mudança absoluta da temperatura média diária máxima de bulbo seco, prevista pelo HadCM3, para determinado mês [°C];

$\Delta TMIN_m$ é a mudança absoluta da temperatura média diária mínima de bulbo seco, prevista pelo HadCM3, para determinado mês [°C];

$\langle dbt_{0max} \rangle_m$ é a temperatura de bulbo seco média diária máxima dos dados TRY para o mês [°C];

$\langle dbt_{0min} \rangle_m$ é a temperatura de bulbo seco média diária mínima dos dados TRY para o mês [°C].

A futura temperatura de bulbo seco para uma determinada hora é calculada em uma função combinada de alongamento e deslocamento, por meio da Equação (20):

$$dbt = dbt_0 + \Delta TEMP_m + \alpha dbt_m \times (dbt_0 - \langle dbt_0 \rangle_m) \quad \text{Equação (20)}$$

Em que:

dbt é a futura temperatura de bulbo seco [°C];

dbt_0 é a temperatura de bulbo seco, conforme dados TRY [°C];

$\Delta TEMP_m$ é a mudança absoluta da temperatura de bulbo seco média mensal, prevista pelo HadCM3 [°C];

$\langle dbt_0 \rangle_m$ é a temperatura de bulbo seco média mensal, conforme dados TRY [°C].

A.3 TEMPERATURA DE PONTO DE ORVALHO

A futura pressão parcial de vapor d'água é derivada da umidade relativa futura calculada e da pressão de saturação de vapor d'água na futura temperatura seca do bulbo, usando a Equação (21):

$$p_w = \Phi \times p'_{ws} \Big|_{dbt, p_{at}} \quad \text{Equação (21)}$$

Em que:

p_w é a futura pressão parcial de vapor d'água [kPa];

Φ é a futura umidade relativa [%];

p'_{ws} é a pressão de saturação do vapor d'água, na ausência de ar, a uma determinada temperatura numericamente igual à temperatura de bulbo seco do ar que está sendo considerado [kPa]. Os valores são retirados da Tabela 3 fornecida no Capítulo 6 do manual da ASHRAE (2005);

$\Big|_{dbt, p_{at}}$ significa à uma determinada temperatura de bulbo seco e pressão atmosférica.

Uma vez calculada a futura pressão parcial do vapor d'água, as Equações (22) e (23), de acordo com a ASHRAE (2005), são aplicadas para determinar a futura temperatura de ponto de orvalho. Para pontos de orvalho entre 0 e 93 °C, é utilizada a Equação (22), e, para pontos de orvalho abaixo de 0 °C, é utilizada a Equação (23).

$$dpt = C_{14} + C_{15} \times \alpha + C_{16} \times \alpha^2 + C_{17} \times \alpha^3 + C_{18} \times (p_w)^{0,1984} \quad \text{Equação (22)}$$

$$dpt = 6,09 + 12,608 \times \alpha + 0,4959 \times \alpha^2 \quad \text{Equação (23)}$$

Em que:

dpt é a futura temperatura de ponto de orvalho [°C];

α corresponde ao $\ln p_w$;

C_{14} é uma constante: 6,54;

C_{15} é uma constante: 14,526;

C_{16} é uma constante: 0,7389;

C_{17} é uma constante: 0,09486;

C_{18} é uma constante: 0,4569.

A.4 UMIDADE RELATIVA

A umidade relativa é obtida por meio da Equação (24), conforme as previsões de mudança absoluta da umidade relativa média para o mês em questão, segundo o modelo HadCM3.

$$\Phi = \Phi_0 + \Delta RHUM_m \quad \text{Equação (24)}$$

Em que:

Φ é a futura umidade relativa [%];

Φ_0 é a umidade relativa do arquivo TRY [%];

$\Delta RHUM_m$ é a previsão HadCM3 de mudança absoluta da umidade relativa média em determinado mês [%].

A.5 PRESSÃO ATMOSFÉRICA

Os dados HadCM3 fornecem previsões para a mudança absoluta na pressão média do nível do mar em milibar (mbar), que, convertida em Pascal (Pa), é usada em uma função de deslocamento, de acordo com Belcher, Hacker e Powell (2005), para determinar a pressão atmosférica futura, como se apresenta na Equação (25).

$$P_{at} = P_{at0} + \Delta MSLP_m \quad \text{Equação (25)}$$

Em que:

P_{at} é a futura pressão atmosférica [Pa];

P_{at0} é a pressão atmosférica do arquivo TRY [Pa];

$\Delta RHUM_m$ é a previsão HadCM3 de mudança absoluta da pressão média do nível do mar em determinado mês [Pa] (convertida de mbar para Pa).

A.6 RADIAÇÃO EXTRATERRESTRE HORIZONTAL

A radiação horizontal extraterrestre para um determinado local e uma determinada hora do dia, é calculada baseada nas equações de geometria solar dadas no Guia J da Instituição Licenciada de Engenheiros de Serviços de Construção (CIBSE) (CIBSE, 2002). Requer-se o cálculo prévio do ângulo de altitude solar e da radiação normal direta extraterrestre, usando a Equação (34). Como as informações de tempo dados nos arquivos TMY2/EPW estão em ‘tempo padrão local’ e não em ‘tempo solar’, o cálculo do ângulo de altitude solar precisa considerar as diferenças entre os dois tempos para um determinado local, a fim de receber o verdadeiro ângulo de altitude solar no ‘tempo padrão local’. Esta conversão também precisa levar em conta as perturbações na rotação da Terra, uma vez que a distância entre a Terra e o Sol não é constante, o que afeta a velocidade de rotação da Terra em torno de seu eixo polar. Matematicamente, isto é contabilizado pela equação do tempo que, em um primeiro passo, requer o cálculo do ângulo do dia, para expressar o dia do ano em forma angular, conforme a Equação (26):

$$d' = d \times \frac{360}{365 \times 25} \quad \text{Equação (26)}$$

Em que:

d' é o ângulo do dia [graus];

d é o dia do ano.

A fim de contabilizar os anos bissextos, são utilizados 365,25 dias por ano, ao invés de 365. O ângulo do dia é utilizado na equação do tempo, da seguinte forma:

$$EOT = -0,128 \times \sin(d' - 2,8) - 0,165 \times \sin(2 \times d' + 19,7) \quad \text{Equação (27)}$$

Em que:

EOT é a equação de tempo [h];

d' é o ângulo do dia [graus];

Assim, o ‘tempo solar’ é calculado por meio da Equação (28):

$$SOT = LST + \frac{(\lambda - \lambda_R)}{15} + EOT \quad \text{Equação (28)}$$

Em que:

SOT é o tempo solar [h];

LST é o tempo padrão local [h] (calculada para cada minuto da hora);

λ é a longitude do local [graus] (valores positivos denotam o Leste);

λ_R é a longitude do fuso horário em que se encontra o local [graus] (valores positivos denotam o Leste);

EOT é resultado obtido por meio da equação de tempo [h].

Para um dado arquivo climático TRY, a radiação horizontal extraterrestre é calculada para cada minuto da hora e a radiação média derivada disso. A ‘hora solar local’ é usada para determinar o ângulo horário, que é o ângulo pelo qual a rotação da Terra passou desde o meio-dia solar, conforme a Equação (29).

$$\omega = \frac{360}{24} + (SOT - 12) \quad \text{Equação (29)}$$

Em que:

ω é o ângulo horário [graus];

SOT é o tempo solar [h].

Em um último passo, antes de poder determinar o ângulo de altitude solar, é necessário calcular, por meio da Equação (30), a declinação da Terra, que é o ângulo entre a direção do Sol e o plano equatorial:

$$\delta = \sin^{-1}\{0,3978 \times \sin[d' - 1,4 + 0,0355 \times \sin(d' - 0,0489)]\} \quad \text{Equação (30)}$$

Em que:

δ é o ângulo de declinação da Terra [graus];

d' é o ângulo do dia [graus];

O ângulo de altitude solar é dado pela Equação (31):

$$\sin \gamma_s = \sin \phi \times \sin \delta + \cos \phi \times \cos \delta \times \cos \omega \quad \text{Equação (31)}$$

Em que:

γ_s é o ângulo de altitude solar [graus];

ϕ é a latitude do local [graus];

δ é o ângulo de declinação da Terra [graus];

ω é o ângulo horário [graus];

Finalmente, a radiação extraterrestre horizontal é calculada pela Equação (32), usando a regra senoidal, a partir do ângulo de altitude solar e da radiação extraterrestre direta normal, determinados nas Equações (31) e (34).

$$I_{\text{exhor}} = \sin \gamma_s \times I_{\text{exnor}} \quad \text{Equação (32)}$$

Em que:

I_{exhor} é a radiação extraterrestre horizontal [W/m²];

γ_s é o ângulo de altitude solar [graus];

I_{exnor} é a radiação extraterrestre direta normal [W/m²].

Dessa forma, a radiação extraterrestre horizontal é dada em Wh/m², para cada hora do arquivo climático adaptado às mudanças climáticas, conforme as horas com radiação solar incidente.

A.7 RADIAÇÃO EXTRATERRESTRE DIRETA NORMAL

A radiação extraterrestre direta normal, está relacionada à constante solar, isto é, a irradiação extraterrestre normal ao feixe à distância solar média (CIBSE, 2002). A fim de permitir que a órbita da Terra seja elíptica, com uma distância variável ao Sol, um fator de correção é introduzido, seguindo o Guia J da CIBSE (CIBSE, 2002). Este fator de correção requer o ângulo do dia, determinado na Equação (26), e é calculado por meio da Equação (33):

$$\varepsilon_d = 1 + 0,03344 \times \cos(d' - 2,8) \quad \text{Equação (33)}$$

Em que:

ε_d é o fator de correção para a variação da distância solar para a Terra [adimensional];

d' é o ângulo do dia [graus].

A radiação extraterrestre direta normal é calculada por meio da Equação (34):

$$I_{\text{exnor}} = I_0 \times \varepsilon_d \quad \text{Equação (34)}$$

Em que:

I_{exnor} é a radiação extraterrestre direta normal [W/m²];

I_0 é a constante solar: 1367 [W/m²];

ε_d é o fator de correção para a variação da distância solar para a Terra [adimensional].

Dessa forma, a radiação extraterrestre direta normal é dada em Wh/m², para cada hora do arquivo climático adaptado às mudanças climáticas, conforme as horas com radiação solar incidente.

A.8 RADIAÇÃO INFRAVERMELHA HORIZONTAL

A radiação infravermelha horizontal do céu (radiação de onda longa descendente) pode ser calculada a partir dos valores futuros para a temperatura de bulbo seco, pressão parcial do vapor d'água e cobertura de nuvens, como determinado pelas Equações (20), (21) e (55), seguindo a metodologia de Crawford e Duchon (1999). Para estes cálculos, a temperatura de bulbo seco precisa ser transformada de °C para Kelvin.

Em uma primeira etapa, é necessário determinar a emissividade atmosférica do céu claro, por meio da Equação (35):

$$\varepsilon_c = 1,24 \times \left(\frac{p_w}{dbt} \right)^{1/7} \quad \text{Equação (35)}$$

Em que:

ε_c é a emissividade atmosférica do céu claro [adimensional];

p_w é a futura pressão parcial de vapor d'água [kPa];

dbt é a futura temperatura de bulbo seco [°C].

O valor para emissividade atmosférica do céu claro é usado com a fração da futura cobertura de nuvens, obtida por meio da Equação (55), para calcular a emissividade atmosférica real, a partir da Equação (36):

$$\varepsilon_{at} = \frac{cc}{10} + \left(1 - \frac{cc}{10} \right) \times \varepsilon_c \quad \text{Equação (36)}$$

Em que:

ε_{at} é a emissividade atmosférica [adimensional];

cc é a futura cobertura de nuvens [deca];

ε_c é a emissividade atmosférica do céu claro [adimensional].

Na sequência, a emissividade atmosférica é utilizada para determinar a radiação de onda longa descendente, por meio da Equação (37):

$$I_{dwlw} = \varepsilon_{at} \times \sigma \times dbt^4 \quad \text{Equação (37)}$$

Em que:

I_{dwlw} é a radiação de onda longa descendente [W/m^2];

ε_{at} é a emissividade atmosférica [adimensional];

σ é a constante de Stefan-Boltzmann: $5,67 \times 10^{-8}$ [$\text{WK}^{-4}\text{m}^{-2}$];

dbt é a futura temperatura de bulbo seco [$^{\circ}\text{C}$].

Dessa forma, a radiação infravermelha horizontal do céu (radiação de onda longa descendente) é dada em Wh/m^2 , para cada hora do arquivo climático adaptado às mudanças climáticas.

A.9 RADIAÇÃO GLOBAL HORIZONTAL

A futura radiação global horizontal é calculada a partir das previsões do modelo HadCM3 para as mudanças no fluxo médio mensal absoluto de onda curta na superfície terrestre, e os dados TRY para radiação horizontal global, de acordo com o método descrito por Belcher, Hacker e Powell (2005). Como uma função de deslocamento não seria apropriada para este cálculo, uma vez que se consideraria que o sol irradiaria à noite, um fator de escala é determinado a partir da mudança absoluta do modelo HadCM3 e da média mensal do clima de base observado (considerando os dados mensais do arquivo TRY), segundo a Equação (38).

$$\alpha I_m = 1 + \left(\frac{\Delta \text{DSWF}_m}{\langle I_{\text{glhor0}} \rangle_m} \right) \quad \text{Equação (38)}$$

Em que:

αI_m é o fator de escala para mudança mensal de fluxo de onda curta na superfície terrestre;

ΔDSWF_m é a previsão do modelo HadCM3 para a mudança no fluxo médio mensal absoluto de onda curta na superfície terrestre em determinado mês [W/m^2];

$\langle I_{\text{glhor0}} \rangle_m$ é a radiação global horizontal média dos dados TRY em determinado mês [W/m^2].

Depois, a futura radiação global horizontal para uma determinada hora é calculada, em uma função de alongamento:

$$I_{glhor} = \alpha I_m \times I_{glhor0} \quad \text{Equação (39)}$$

Em que:

I_{glhor} é a futura radiação global horizontal [Wh/m²];

αI_m é o fator de escala para mudança mensal de fluxo de onda curta na superfície terrestre;

I_{glhor0} é a radiação global horizontal dos dados TRY [Wh/m²].

A.10 RADIAÇÃO DIRETA NORMAL

A radiação direta normal pode ser calculada a partir do ângulo de altitude solar, da radiação global horizontal e da radiação difusa horizontal, determinadas pelas Equações (31), (39) e (44), utilizando a regra senoidal, como mostra-se na Equação (40):

$$I_{dnor} = \frac{I_{glhor} - I_{difhor}}{\sin \gamma_s} \quad \text{Equação (40)}$$

Em que:

I_{dnor} é a futura radiação direta normal [Wh/m²];

I_{glhor} é a futura radiação global horizontal horária [Wh/m²];

I_{difhor} é a futura radiação difusa horizontal horária [Wh/m²];

γ_s é o ângulo de altitude solar [graus].

A.11 RADIAÇÃO DIFUSA HORIZONTAL

O modelo desenvolvido por Ridley, Boland e Lauret (2010) é usado para calcular a futura radiação difusa horizontal. Em um primeiro passo, este método requer o cálculo do índice de clareza horária, que é derivado da futura radiação global horizontal e radiação extraterrestre horizontal, como se apresenta na Equação (41):

$$KT_h = \frac{I_{glhor}}{I_{exhor}} \quad \text{Equação (41)}$$

Em que:

- KT_h é o índice de claridade horária [adimensional];
 I_{glhor} é a futura radiação global horizontal [Wh/m²];
 I_{exhor} é a futura radiação extraterrestre horizontal [Wh/m²].

Além do índice de claridade horária, é necessário o índice de claridade diária, que é determinado a partir dos valores horários do respectivo dia, por meio da Equação (42).

$$KT_d = \frac{\sum_{h=1}^{24} I_{glhor}}{\sum_{h=1}^{24} I_{exhor}} \quad \text{Equação (42)}$$

Em que:

- KT_d é o índice de claridade diária [adimensional];
 I_{glhor} é a futura radiação global horizontal em cada hora [Wh/m²];
 I_{exhor} é a futura radiação extraterrestre horizontal em cada hora [Wh/m²].

A persistência, referente ao atraso e ao avanço do índice de clareza horária, é contabilizada da seguinte forma:

$$\psi = \begin{cases} \frac{KT_{h-1} + KT_{h+1}}{2} & \text{amanhecer} < h < \text{entardecer} \\ KT_{h+1} & h = \text{amanhecer} \\ KT_{h-1} & h = \text{entardecer} \end{cases} \quad \text{Equação (43)}$$

Em que:

- ψ é o índice de persistência de claridade [adimensional];
 KT_{h+1} é o índice de claridade na hora seguinte [adimensional];
 KT_{h-1} é o índice de claridade na hora anterior [adimensional];

Usando o tempo solar e o ângulo de altitude solar, calculados por meio das Equações (28) e (31)(32), a radiação difusa horizontal é calculada com a Equação (44).

$$I_{difhor} = \frac{1}{1 + \exp(-5,38 + 6,63KT_h + 0,006SOT - 0,007\gamma_s + 1,75KT_d + 1,31\psi)} \quad \text{Equação (44)}$$

Em que:

I_{difhor} é a futura radiação difusa horizontal horária [Wh/m^2];

KT_h é o índice de claridade horária [adimensional];

SOT é o tempo solar [h];

γ_s é o ângulo de altitude solar [graus];

KT_d é o índice de claridade diária [adimensional];

ψ é o índice de persistência de claridade [adimensional].

A.12 ILUMINÂNCIA GLOBAL HORIZONTAL

A iluminância global horizontal é calculada a partir da futura radiação global horizontal, determinada pela Equação (39), com base em equações derivadas de dados empíricos de Perez et al. (1990). Entretanto, antes de poder calcular a iluminância global horizontal, é necessário determinar o ângulo zenital solar, a precipitação atmosférica de água e a luminosidade atmosférica. O ângulo zenital solar é determinado pela Equação (45), a partir do ângulo de altitude solar, calculado pela Equação (31).

$$\theta_s = 90 - \gamma_s \quad \text{Equação (45)}$$

Em que:

θ_s é o ângulo zenital solar [graus];

γ_s é o ângulo de altitude solar [graus].

A precipitação atmosférica de água é calculada da seguinte forma:

$$\text{PWC} = \exp(0,07 \times \text{dpt} - 0,075) \quad \text{Equação (46)}$$

Em que:

PWC é a quantidade de água precipitável [cm];

dpt é a futura temperatura de ponto de orvalho [$^{\circ}\text{C}$].

O brilho atmosférico ou do céu é dado por:

$$\Delta = I_{\text{difhor}} \times \frac{m}{I_{\text{exnor}}} \quad \text{Equação (47)}$$

Em que:

Δ é o futuro brilho atmosférico [adimensional];

I_{difhor} é a futura radiação difusa horizontal horária [Wh/m²];

m é a massa óptica relativa do ar [adimensional] (valores de m são obtidos na Tabela 2 de Kasten e Young (1989), a partir do ângulo de altitude solar dado);

I_{exnor} é a futura radiação extraterrestre direta normal [W/m²].

Além disso, a claridade atmosférica, também chamada de claridade do céu, precisa ser calculada. Os resultados deste cálculo são classificados em 8 categorias discretas de claridade do céu. O intervalo de dados de cada uma dessas 8 categorias é apresentado na Tabela 1 de Perez et al. (1990). A equação para o cálculo da claridade atmosférica é a seguinte:

$$\varepsilon_{\text{sc}} = \left[\frac{I_{\text{difhor}} + I_{\text{dnor}}}{I_{\text{difhor}} + 1,041 \times \theta_s^3} \right] / (1 + 1,041 \times \theta_s^3) \quad \text{Equação (48)}$$

Em que:

ε_{sc} é a futura claridade atmosférica [adimensional];

I_{difhor} é a futura radiação difusa horizontal horária [Wh/m²];

I_{dnor} é a futura radiação direta normal [Wh/m²];

θ_s é o ângulo zenital solar [radianos].

Deve-se notar que o ângulo zenital solar precisa estar em radianos na Equação (48) e nas equações seguintes relacionadas aos parâmetros de iluminância. As categorias discretas de claridade do céu, determinadas por meio da Equação (48), são requeridas para selecionar os coeficientes apropriados necessários para o cálculo da iluminação global horizontal. Estes coeficientes estão disponíveis na Tabela 4 de Perez et al. (1990). A iluminância global horizontal pode, então, ser determinada pela Equação (49):

$$i_{\text{glhor}} = I_{\text{glhor}} \times (a_i + b_i \times \text{PWC} + c_i \times \cos \theta_s + d_i \times \ln \Delta) \quad \text{Equação (49)}$$

Em que:

i_{glhor} é a futura iluminância global horizontal [lux];

- I_{glhor} é a futura radiação global horizontal horária [Wh/m²];
 a_i é o coeficiente dado na Tabela 4 de Perez et al. (1990);
 b_i é o coeficiente dado na Tabela 4 de Perez et al. (1990);
 c_i é o coeficiente dado na Tabela 4 de Perez et al. (1990);
 d_i é o coeficiente dado na Tabela 4 de Perez et al. (1990);
 PWC é a quantidade de água precipitável [cm];
 θ_s é o ângulo zenital solar [radianos];
 Δ é o futuro brilho atmosférico [adimensional].

A.13 ILUMINÂNCIA DIRETA NORMAL

A iluminância direta normal é calculada a partir da futura radiação direta normal, determinada pela Equação (40), baseada em equações derivadas de dados empíricos de Perez et al. (1990). Os valores para o ângulo zenital solar, a quantidade de água precipitável, e o brilho atmosférico, ou seja, os parâmetros da condição do céu calculados nas Equações (45), (46) e (47), são utilizados. Além disso, os coeficientes da Tabela 4 de Perez et al. (1990) são utilizados para o cálculo. Estes coeficientes, dependentes da categoria de claridade do céu, determinada com a Equação (48), são específicos para a cálculo da iluminação direta normal. A iluminação normal direta é calculada da seguinte forma:

$$i_{dnor} = \max\{0, I_{dnor} \times [a_i + b_i \times PWC + c_i \times \exp(5,73 \times \theta_s - 5) + d_i \times \Delta]\} \quad \text{Equação (50)}$$

Em que:

- i_{dnor} é a futura iluminância direta normal [lux];
 I_{dnor} é a futura radiação global direta normal horária [Wh/m²];
 a_i é o coeficiente dado na Tabela 4 de Perez et al. (1990);
 b_i é o coeficiente dado na Tabela 4 de Perez et al. (1990);
 c_i é o coeficiente dado na Tabela 4 de Perez et al. (1990);
 d_i é o coeficiente dado na Tabela 4 de Perez et al. (1990);
 PWC é a quantidade de água precipitável [cm];
 θ_s é o ângulo zenital solar [radianos];
 Δ é o futuro brilho atmosférico [adimensional].

A.14 ILUMINÂNCIA DIFUSA HORIZONTAL

A iluminância difusa horizontal é calculada a partir da futura radiação difusa horizontal, determinada pela Equação (44), de acordo com equações derivadas de dados empíricos de Perez et al. (1990). Os valores dos parâmetros da condição do céu, calculados por meio das equações (45), (46) e (47), são utilizados, bem como os coeficientes apropriados indicados na Tabela 4 de Perez et al. (1990). Estes coeficientes, que dependem da categoria de claridade do céu, determinada pela Equação (48), são específicos para o cálculo da iluminação difusa horizontal. A iluminação difusa horizontal é calculada da seguinte forma:

$$i_{\text{difhor}} = I_{\text{difhor}} \times (a_i + b_i \times \text{PWC} + c_i \times \cos \theta_s + d_i \times \ln \Delta) \quad \text{Equação (51)}$$

Em que:

i_{difhor} é a futura iluminância difusa horizontal [lux];

I_{difhor} é a futura radiação difusa horizontal horária [Wh/m²];

a_i é o coeficiente dado na Tabela 4 de Perez et al. (1990);

b_i é o coeficiente dado na Tabela 4 de Perez et al. (1990);

c_i é o coeficiente dado na Tabela 4 de Perez et al. (1990);

d_i é o coeficiente dado na Tabela 4 de Perez et al. (1990);

PWC é a quantidade de água precipitável [cm];

θ_s é o ângulo zenital solar [radianos];

Δ é o futuro brilho atmosférico [adimensional].

A.15 ILUMINÂNCIA ZENITAL

A iluminância zenital é calculada a partir da futura radiação difusa horizontal, determinada pela Equação (44), e os parâmetros da condição do céu, calculados pelas Equações (45) e (47), seguindo o método desenvolvido por Perez et al. (1990), conforme Equação (52). Novamente, um conjunto de coeficientes específicos para esta equação é necessário. Estes coeficientes estão disponíveis na Tabela 4 do trabalho de Perez et al. (1990), e estão relacionados com as categorias de claridade do céu, calculadas pela Equação (48).

$$L_{\text{vz}} = I_{\text{difhor}} \times [a_i + c_i \times \cos \theta_s + c_i' \times \exp(-3 \times \theta_s) + d_i \times \Delta] \quad \text{Equação (52)}$$

Em que:

L_{vz} é a futura iluminância zenital [Cd/m^2];

I_{difhor} é a futura radiação difusa horizontal horária [Wh/m^2];

a_i é o coeficiente dado na Tabela 4 de Perez et al. (1990);

b_i é o coeficiente dado na Tabela 4 de Perez et al. (1990);

c_i é o coeficiente dado na Tabela 4 de Perez et al. (1990);

c_i' é o coeficiente dado na Tabela 4 de Perez et al. (1990);

d_i é o coeficiente dado na Tabela 4 de Perez et al. (1990);

θ_s é o ângulo zenital solar [radianos];

Δ é o futuro brilho atmosférico [adimensional].

A.16 DIREÇÃO DO VENTO

As previsões climáticas do modelo HadCM3 não contêm informações sobre possíveis mudanças, em termos de frequência ou distribuição, da direção do vento para um determinado local. Portanto, de acordo com Belcher, Hacker e Powell (2005), presume-se que a direção do vento do arquivo TRY permanecerá inalterada e, assim, as informações são transferidas para o arquivo climático futuro.

A.17 VELOCIDADE DO VENTO

Os dados HadCM3 fornecem a velocidade do vento como uma mudança relativa ao clima de base. Portanto, como proposto por Belcher, Hacker e Powell (2005), uma função de alongamento é usada para gerar dados futuros sobre a velocidade do vento. O fator de escala é calculado a partir da Equação (53).

$$\alpha_{ws_m} = 1 + \frac{WIND_m}{100} \quad \text{Equação (53)}$$

Em que:

α_{ws_m} é o fator de escala para a mudança da velocidade do vento em determinado mês [adimensional];

$WIND_m$ é a previsão de mudança relativa da velocidade do vento em determinado mês, segundo o modelo HadCM3 [%].

A futura velocidade do vento para uma determinada hora, é calculada em uma função de alongamento, como se apresenta na Equação (54).

$$ws = \alpha ws_m \times ws_0 \quad \text{Equação (54)}$$

Em que:

ws é a futura velocidade do vento horária [m/s];

αws_m é o fator de escala para a mudança da velocidade do vento em determinado mês [adimensional];

ws_0 é a velocidade do vento horária do arquivo TRY [m/s].

A.18 COBERTURA TOTAL DO CÉU

A cobertura total do céu denota décimos da cúpula do céu coberta (deca) e é dada como valores inteiros de 0 a 10. Os dados HadCM3 dão a previsão da mudança da cobertura total do céu como valores absolutos em pontos percentuais. Portanto, uma função de mudança é usada para gerar séries temporais futuras, como sugerido por Belcher, Hacker e Powell (2005). A equação para gerar a futura cobertura de nuvens é a seguinte.

$$cc = \max\{0, \min[10, cc_0 + \Delta TCLW_m]\} \quad \text{Equação (55)}$$

Em que:

cc é a futura cobertura total do céu [deca];

cc_0 é a cobertura total do céu, conforme dados TRY [deca];

$\Delta TCLW_m$ é a previsão de mudança absoluta do total médio de nuvens na radiação de ondas longas em determinado mês, segundo o modelo HadCM3 [deca].

O resultado da Equação (55) é arredondado para o número inteiro mais próximo. Caso o valor seja inferior a 0 ou superior a 10, é ajustado para igual a 0 ou 10, respectivamente.

A.19 COBERTURA OPACA DO CÉU

A cobertura opaca do céu denota a quantidade da cúpula coberta por nuvens, que não permitem observar o céu em níveis mais altos, e é dada em décimos da cúpula do céu coberta

(deca). Assume-se que a relação entre a cobertura total do céu e a cobertura opaca do céu permanece a mesma sob um clima modificado. Portanto, a equação para gerar a futura cobertura opaca do céu é a seguinte:

$$occ = \frac{cc \times occ_0}{cc_0} \quad \text{Equação (56)}$$

Em que:

occ é a futura cobertura opaca do céu [deca];

cc é a futura cobertura total do céu [deca];

occ₀ é a cobertura opaca do céu, conforme dados TRY [deca];

cc₀ é a cobertura total do céu, conforme dados TRY [deca].

A.20 VISIBILIDADE

A visibilidade não é relevante para a simulação de desempenho de edificações e, portanto, não foi considerada. Além disso, nenhuma rotina de cálculo apropriada pôde ser identificada para obter estes parâmetros a partir de dados conhecidos.

A.21 ALTURA LIMITE

A altura limite não é relevante para a simulação de desempenho de edificações e, portanto, não foi considerada. Além disso, nenhuma rotina de cálculo apropriada pôde ser identificada para obter estes parâmetros a partir de dados conhecidos.

A.22 OBSERVAÇÃO DO TEMPO

A observação do tempo denota particularidades da observação física, como neve, neblina ou tipo de chuva. Como os dados meteorológicos adaptados às mudanças climáticas são baseados dados calculados, tais informações não podem ser fornecidas. Portanto, os campos são classificados como dados ausentes.

A.23 CÓDIGO DO TEMPO

O código do tempo denota particularidades da observação física, como neve, neblina ou tipo de chuva. Como os dados meteorológicos adaptados às mudanças climáticas são baseados dados calculados, tais informações não podem ser fornecidas. Portanto, os campos são classificados como dados ausentes.

A.24 PRECIPITAÇÃO

Os dados HadCM3 fornecem a precipitação como uma mudança relativa ao clima de base. Portanto, como proposto por Belcher, Hacker e Powell (2005), uma função de alongamento é usada para gerar dados futuros de precipitação. O fator de escala para este alongamento é calculado da seguinte forma:

$$\alpha_{rr_m} = 1 + \frac{PREC_m}{100} \quad \text{Equação (57)}$$

Em que:

α_{rr_m} é o fator de escala para a mudança da precipitação em determinado mês [adimensional];

$PREC_m$ é a previsão de mudança relativa da precipitação em determinado mês, segundo o modelo HadCM3 [%].

A futura precipitação para uma determinada hora é calculada pela Equação (58).

$$rr = \alpha_{rr_m} \times rr_0 \quad \text{Equação (58)}$$

Em que:

rr é a futura precipitação horária [mm];

α_{rr_m} é o fator de escala para a mudança da precipitação em determinado mês [adimensional];

rr_0 é a precipitação, conforme dados TRY [mm].

A.25 PROFUNDIDADE ÓPTICA DOS AEROSSÓIS

A profundidade óptica dos aerossóis está relacionada à transparência da atmosfera, tendo em vista os aerossóis presentes no ar. Embora haja uma gama de abordagens de cálculo para determinar a profundidade óptica dos aerossóis (LÓPEZ; BATLES, 2004; MOLINEAUX; INEICHEN; DELAUNAY, 1995), estas são complexas, e muitas vezes exigem informações não disponíveis prontamente, ou se relacionam com condições específicas do céu. Portanto, de acordo com o pacote de geração de arquivo climático comercial Meteonorm, as informações são classificadas como dados ausentes.

A.26 PROFUNDIDADE DA NEVE

Como não há informações sobre neve disponíveis nos arquivos climáticos “atuais”, a profundidade da neve não pode ser especificada, e, portanto, os dados são classificados como ausentes. Além disso, essa informação não é relevante para a maioria das aplicações de simulação de desempenho de edificações.

A.27 QUANTIDADE DE DIAS DESDE O ÚLTIMO DIA QUE NEVOU

Como não há informações sobre neve disponíveis nos arquivos climáticos “atuais”, a quantidade de dias desde o último dia que nevou não pode ser especificada, e, portanto, os dados são classificados como ausentes. Além disso, essa informação não é relevante para a maioria das aplicações de simulação de desempenho de edificações.

APÊNDICE B – Explicação Dos Parâmetros Termofísicos

Neste apêndice, descrevem-se as definições das variáveis independentes (parâmetros de ‘entrada’ do modelo) que foram consideradas neste trabalho.

A explicação dos parâmetros termofísicos, apresentados no Quadro 5, é a seguinte:

- Absortância solar** é a fração de radiação solar incidente que é absorvida por uma superfície opaca. Esta propriedade, vinculada à cor da superfície, rege os ganhos de calor proveniente da radiação solar direta ou difusa;
- Capacidade térmica** é a razão entre a quantidade de calor recebida e a variação de temperatura de um material. A capacidade térmica determina a característica de um elemento construtivo reter calor;
- Emissividade** é a relação entre a capacidade de emissão do material comparado com um componente ideal, conhecido como corpo negro. A emissividade controla o fenômeno de transferência de calor por radiação de ondas longas, sendo que a capacidade do material emitir calor (irradiar energia) depende da temperatura e acabamento da superfície;
- Fator de ventilação** é a fração de ventilação natural incidente através das janelas. Este parâmetro foi considerado por meio da proporção da área de janela que permite a ventilação natural no ambiente, em relação à área da abertura;
- Fator solar dos vidros** é a razão entre a quantidade de radiação solar que atravessa o vidro pelo que nele incide. Esta propriedade é característica de cada tipo de vidro e varia com o ângulo de incidência da radiação solar;
- Orientação solar** é a variável que determina a forma como a luz do sol incide sobre as construções, conforme a região, os horários e os períodos do ano. Neste trabalho, a referência inicial de orientação 0° é quando as janelas dos dois dormitórios (ver Figura 12) estão voltadas para o norte;

Transmitância solar e visível das venezianas das janelas (sombreamento) é a propriedade que representa a fração de radiação solar que incide no ambiente. Este parâmetro caracteriza o fator de sombreamento (capacidade de proteção) à radiação solar incidente nas janelas;

Transmitância térmica é a propriedade de um componente construtivo de transmitir calor.

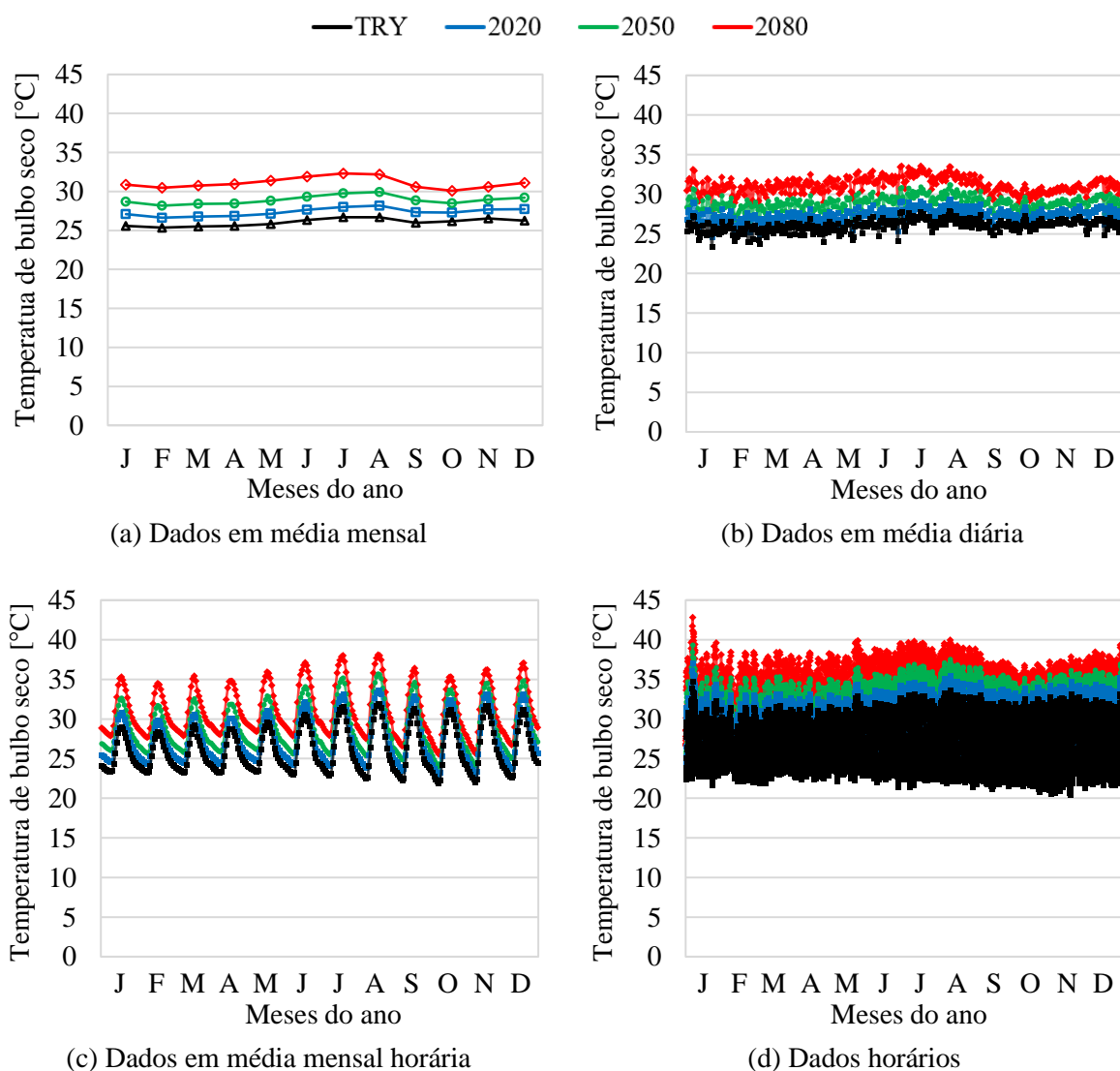
APÊNDICE C – Dados Dos Arquivos Climáticos

Neste apêndice, detalham-se os dados de temperatura de bulbo seco, umidade relativa do ar, radiação solar global (desconsiderando-se os horários noturnos) e velocidade do vento de Belém, Brasília, Curitiba e São Paulo, em médias mensais, médias diárias, médias mensais horárias, e valores horários para o ano todo, conforme os períodos climáticos estudados.

C.1 BELÉM

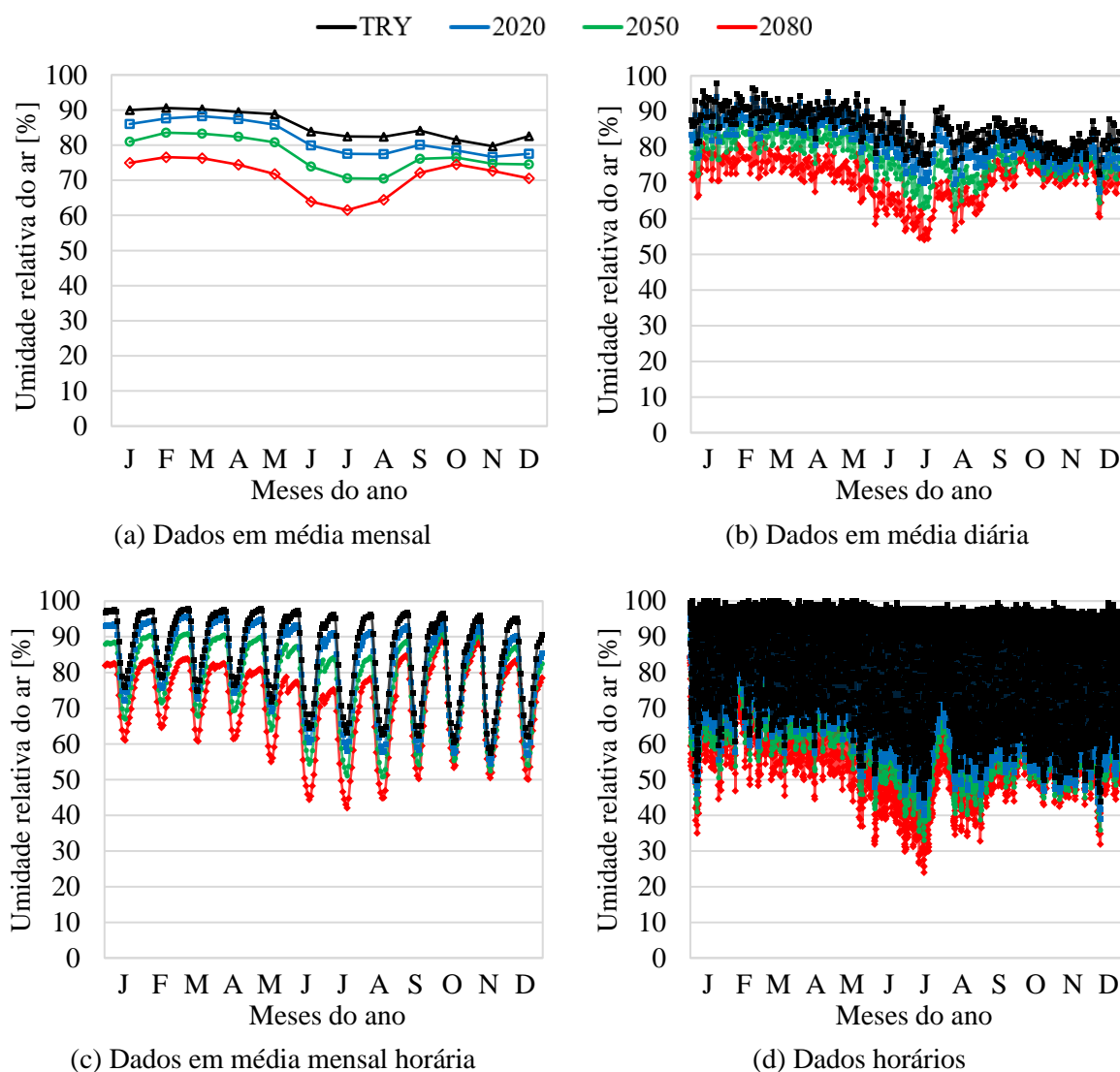
Nas Figuras 62 a 65, e nos Quadros 10 a 13, apresentam-se informações complementares sobre as progressões climáticas para Belém, descritas no Item 4.2.1.

Figura 62 – Temperatura de bulbo seco de Belém, conforme os períodos climáticos



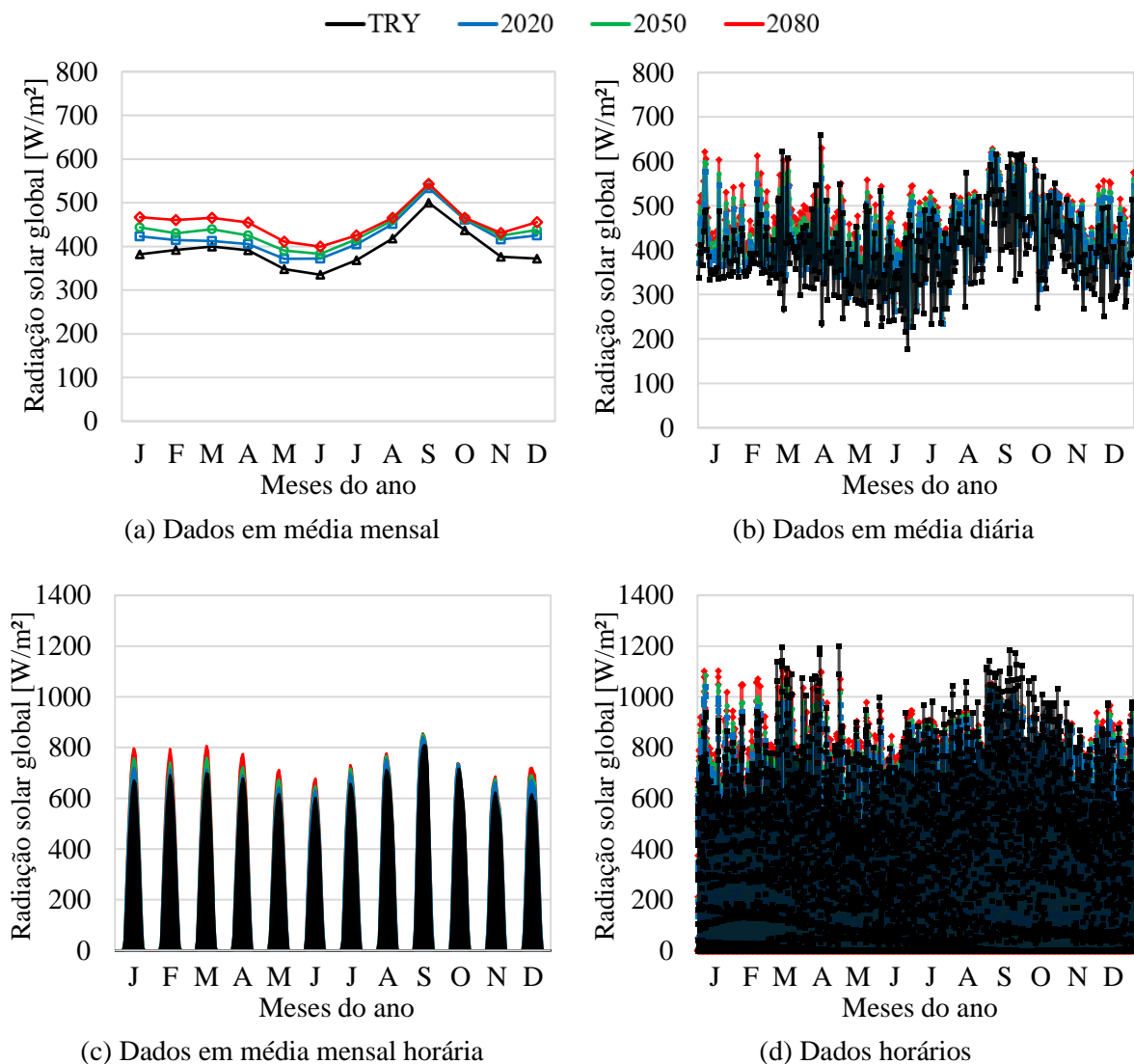
Fonte: o autor; elaborado a partir de Carlo e Lamberts (2005) e Goulart, Lamberts e Firmino (1998)

Figura 63 – Umidade relativa do ar de Belém, conforme os períodos climáticos



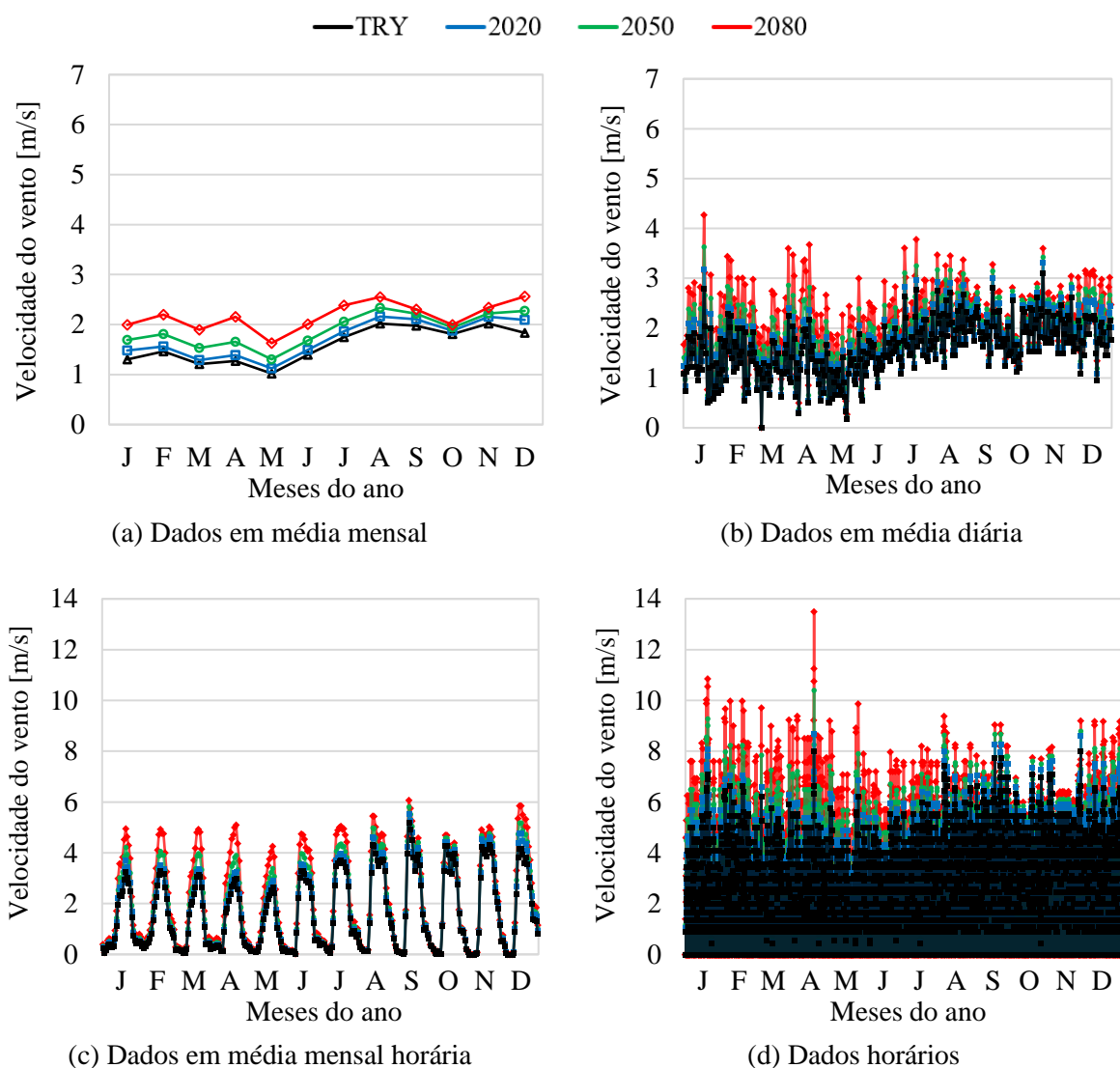
Fonte: o autor; elaborado a partir de Carlo e Lamberts (2005) e Goulart, Lamberts e Firmino (1998)

Figura 64 – Radiação solar global de Belém, conforme os períodos climáticos



Fonte: o autor; elaborado a partir de Carlo e Lamberts (2005) e Goulart, Lamberts e Firmino (1998)

Figura 65 – Velocidade do vento de Belém, conforme os períodos climáticos



Fonte: o autor; elaborado a partir de Carlo e Lamberts (2005) e Goulart, Lamberts e Firmino (1998)

Quadro 10 – Estatísticas para a temperatura de bulbo seco [°C] de Belém, conforme os períodos climáticos

Mês		Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Mai	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
1964	Média	25,58	25,35	25,51	25,57	25,80	26,32	26,67	26,68	25,97	26,17	26,51	26,24
	Média das mínimas	23,18	23,04	23,13	23,12	23,22	22,91	22,81	22,41	22,26	21,86	22,01	22,46
	Média das máximas	30,02	29,14	29,92	29,74	30,45	31,14	31,91	32,24	31,56	31,42	31,98	31,55
	Mínima	21,65	22,04	21,89	22,39	22,10	21,41	21,45	21,45	21,20	20,79	20,39	21,61
	Máxima	34,72	31,45	31,66	31,69	32,89	32,60	33,10	33,66	32,98	32,78	33,16	33,09
2020	Média	27,07	26,63	26,78	26,83	27,13	27,65	28,01	28,18	27,33	27,29	27,70	27,71
	Média das mínimas	24,47	24,20	24,33	24,32	24,50	24,11	24,03	23,73	23,46	22,79	22,94	23,60
	Média das máximas	31,88	30,62	31,35	31,10	31,88	32,68	33,40	33,95	33,14	32,77	33,48	33,49
	Mínima	22,85	23,14	23,04	23,59	23,30	22,51	22,65	22,75	22,40	21,69	21,19	22,71
	Máxima	36,98	33,05	33,16	33,09	34,39	34,20	34,60	35,41	34,58	34,23	34,70	35,14
2050	Média	28,67	28,17	28,40	28,45	28,81	29,31	29,74	29,92	28,83	28,48	28,95	29,18
	Média das mínimas	25,88	25,51	25,71	25,81	26,00	25,53	25,46	25,22	24,82	23,94	24,06	24,87
	Média das máximas	33,85	32,53	33,37	32,96	33,87	34,68	35,55	36,02	34,87	34,04	34,90	35,23
	Mínima	24,09	24,34	24,29	24,99	24,80	23,87	23,95	24,19	23,70	22,79	22,29	23,91
	Máxima	39,32	35,19	35,36	35,09	36,49	36,30	36,90	37,56	36,43	35,58	36,15	36,94
2080	Média	30,85	30,48	30,76	30,94	31,36	31,89	32,31	32,17	30,59	30,09	30,58	31,12
	Média das mínimas	27,71	27,46	27,77	27,97	28,26	27,78	27,84	27,35	26,57	25,55	25,66	26,59
	Média das máximas	36,66	35,41	36,30	35,99	36,96	37,72	38,37	38,38	36,64	35,63	36,58	37,49
	Mínima	25,69	26,18	26,24	27,09	26,90	25,97	26,25	26,35	25,40	24,39	23,89	25,57
	Máxima	42,83	38,45	38,46	38,34	39,89	39,50	39,80	39,96	38,18	37,18	37,85	39,34

Fonte: o autor; elaborado a partir de dados de Carlo e Lamberts (2005) e Goulart, Lamberts e Firmino (1998)

Quadro 11 – Estatísticas para a umidade relativa do ar [%] de Belém, conforme os períodos climáticos

Mês		Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Mai	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
TRY (1964)	Média	90,00	90,58	90,25	89,42	88,82	83,92	82,51	82,41	84,16	81,52	79,69	82,52
	Média das mínimas	70,80	74,90	70,77	71,14	67,74	61,24	61,35	60,34	60,73	59,11	55,89	60,10
	Média das máximas	98,56	98,17	98,56	98,51	98,46	97,59	96,76	97,01	97,22	96,79	96,17	96,08
	Mínima	50,00	60,80	59,55	59,55	53,90	49,90	45,00	50,70	54,45	49,90	49,45	43,90
	Máxima	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	99,55	98,00	99,00	99,55	99,55	98,10	99,55
2020	Média	86,00	87,57	88,24	87,42	85,82	79,95	77,53	77,41	80,13	78,52	76,68	77,55
	Média das mínimas	66,80	71,90	68,77	69,14	64,74	57,28	56,38	55,34	56,70	56,11	52,89	55,14
	Média das máximas	94,56	95,17	96,53	96,51	95,49	93,62	91,76	92,08	93,22	93,78	93,17	91,11
	Mínima	46,00	57,80	57,55	57,55	50,90	45,90	40,00	45,70	50,45	46,90	46,45	38,90
	Máxima	96,00	97,00	98,00	98,00	97,00	95,55	93,00	94,00	95,55	96,55	95,10	94,55
2050	Média	81,01	83,55	83,25	82,42	80,80	73,92	70,51	70,43	76,14	76,50	74,67	74,54
	Média das mínimas	61,80	67,86	63,77	64,14	59,72	51,21	49,35	48,50	52,73	54,09	50,86	52,14
	Média das máximas	89,56	91,13	91,56	91,51	90,48	87,62	84,76	85,24	89,25	91,76	91,17	88,11
	Mínima	41,00	53,80	52,55	52,55	45,90	39,90	33,00	38,70	46,45	44,90	44,45	35,90
	Máxima	91,00	93,00	93,00	93,00	92,00	89,55	86,00	87,00	91,55	94,55	93,10	91,55
2080	Média	75,00	76,58	76,25	74,44	71,81	63,93	61,52	64,45	72,18	74,49	72,64	70,55
	Média das mínimas	55,80	60,90	56,77	56,18	50,71	41,26	40,38	42,60	48,77	52,08	48,82	48,14
	Média das máximas	83,56	84,17	84,56	83,54	81,49	77,62	75,79	79,37	85,32	89,73	89,14	84,14
	Mínima	35,00	46,80	45,55	44,55	36,90	29,90	24,00	32,70	42,45	42,90	42,45	31,90
	Máxima	85,00	86,00	86,00	86,00	83,00	79,55	77,00	81,00	89,00	92,55	91,10	87,55

Fonte: o autor; elaborado a partir de dados de Carlo e Lamberts (2005) e Goulart, Lamberts e Firmino (1998)

Quadro 12 – Estatísticas para a radiação solar global [W/m²] de Belém, conforme os períodos climáticos

Mês		Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Mai	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
TRY (1964)	Média	381,72	391,72	399,98	391,55	348,10	335,16	368,76	418,35	499,93	437,30	376,66	372,47
	Média das mínimas	10,82	15,01	12,64	5,21	3,05	3,98	6,21	6,01	14,96	19,79	3,72	8,03
	Média das máximas	685,01	703,63	776,85	757,16	648,41	664,32	725,52	795,84	946,97	848,69	695,54	708,86
	Mínima	4,54	10,83	7,93	3,24	1,83	1,79	3,55	3,47	1,02	1,32	1,46	1,02
	Máxima	939,82	941,29	1196,18	1201,05	948,19	996,62	982,36	1117,52	1185,14	1074,14	977,55	980,84
2020	Média	423,00	414,28	412,53	405,12	371,62	371,82	404,49	451,36	533,50	460,91	416,23	425,08
	Média das mínimas	12,83	16,47	12,23	4,94	2,56	3,45	5,66	5,33	21,75	34,04	5,42	10,15
	Média das máximas	737,52	725,34	743,28	722,33	660,07	673,19	739,83	797,65	896,29	804,87	702,70	738,28
	Mínima	8,57	15,12	8,22	2,49	1,49	1,40	3,79	3,72	0,44	1,61	2,00	1,73
	Máxima	1038,59	960,36	974,64	976,39	883,68	879,92	863,88	935,11	1033,48	933,81	868,94	908,20
2050	Média	443,62	430,25	439,55	425,06	390,41	382,88	416,79	459,91	541,04	463,09	424,56	438,06
	Média das mínimas	12,84	16,56	12,23	4,80	2,50	3,40	5,61	5,26	21,90	34,17	5,42	10,27
	Média das máximas	774,88	753,79	792,77	758,43	693,79	693,48	762,86	812,85	909,15	808,78	716,97	761,38
	Mínima	8,23	14,77	7,53	2,30	1,28	1,30	3,87	3,52	0,41	1,57	1,99	1,75
	Máxima	1085,15	997,71	1040,28	1024,59	929,01	905,87	890,10	952,39	1047,42	938,50	886,35	936,39
2080	Média	466,59	460,64	465,29	454,79	411,19	399,51	425,26	465,34	543,29	465,22	430,53	455,59
	Média das mínimas	12,72	16,54	12,04	4,56	2,43	3,32	5,55	5,23	21,98	34,27	5,41	10,45
	Média das máximas	815,90	808,56	840,84	812,79	731,26	724,07	778,51	822,24	913,02	812,49	727,20	793,35
	Mínima	7,91	14,23	6,68	2,04	1,12	1,18	3,94	3,58	0,41	1,57	1,89	1,75
	Máxima	1101,96	1071,23	1102,67	1099,11	978,39	944,86	908,80	962,70	1052,20	942,87	899,12	976,67

Fonte: o autor; elaborado a partir de dados de Carlo e Lamberts (2005) e Goulart, Lamberts e Firmino (1998)

Quadro 13 – Estatísticas para a velocidade do vento [m/s] de Belém, conforme os períodos climáticos

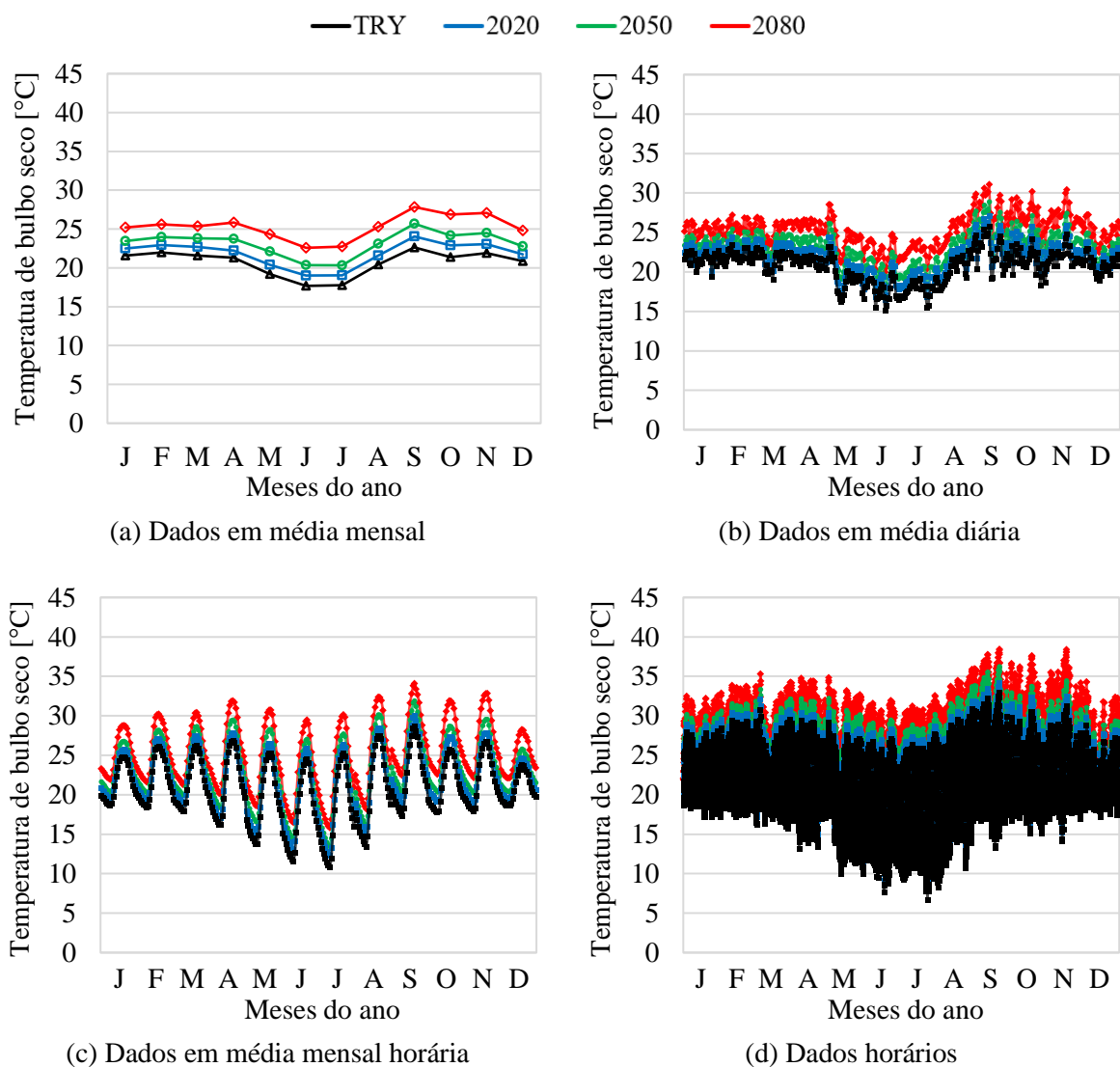
Mês		Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Mai	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
TRY (1964)	Média	1,30	1,46	1,21	1,27	1,02	1,40	1,75	2,02	1,98	1,81	2,02	1,83
	Média das mínimas	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Média das máximas	4,34	4,96	4,16	4,23	3,79	4,08	4,68	5,18	5,60	5,09	5,34	5,24
	Mínima	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Máxima	7,10	6,65	6,20	8,00	6,20	5,55	6,00	7,45	7,75	7,10	8,00	6,55
2020	Média	1,48	1,56	1,29	1,39	1,12	1,49	1,87	2,16	2,11	1,87	2,15	2,09
	Média das mínimas	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Média das máximas	4,94	5,29	4,44	4,58	4,17	4,38	5,02	5,56	5,97	5,28	5,69	5,99
	Mínima	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Máxima	8,07	7,06	6,61	8,70	6,88	5,95	6,40	8,00	8,27	7,36	8,60	7,51
2050	Média	1,69	1,81	1,53	1,65	1,30	1,68	2,06	2,34	2,22	1,94	2,22	2,27
	Média das mínimas	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Média das máximas	5,64	6,13	5,27	5,50	4,84	4,90	5,52	5,97	6,27	5,47	5,88	6,49
	Mínima	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Máxima	9,29	8,24	7,85	10,40	7,91	6,72	7,10	8,64	8,68	7,61	8,80	8,12
2080	Média	1,99	2,20	1,89	2,16	1,63	2,00	2,38	2,55	2,31	1,99	2,34	2,56
	Média das mínimas	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Média das máximas	6,62	7,44	6,53	7,17	6,03	5,84	6,38	6,52	6,53	5,60	6,17	7,33
	Mínima	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Máxima	10,85	9,98	9,71	13,50	9,87	7,97	8,20	9,39	9,05	7,76	9,20	9,17

Fonte: o autor; elaborado a partir de dados de Carlo e Lamberts (2005) e Goulart, Lamberts e Firmino (1998)

C.2 BRASÍLIA

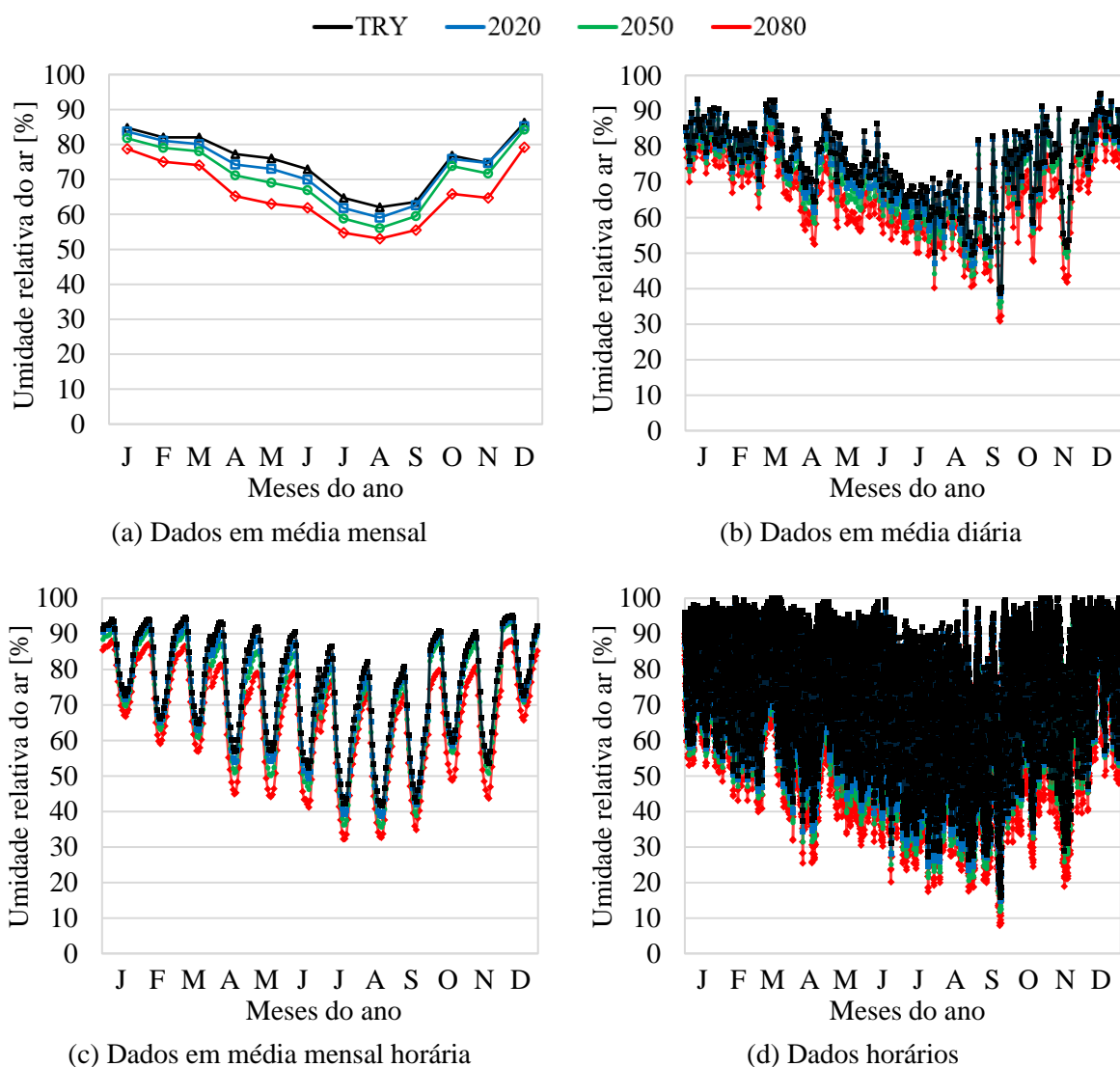
Nas Figuras 66 a 69, e nos Quadros 14 a 17, apresentam-se informações complementares sobre as progressões climáticas para Brasília, descritas no Item 4.2.2.

Figura 66 – Temperatura de bulbo seco de Brasília, conforme os períodos climáticos



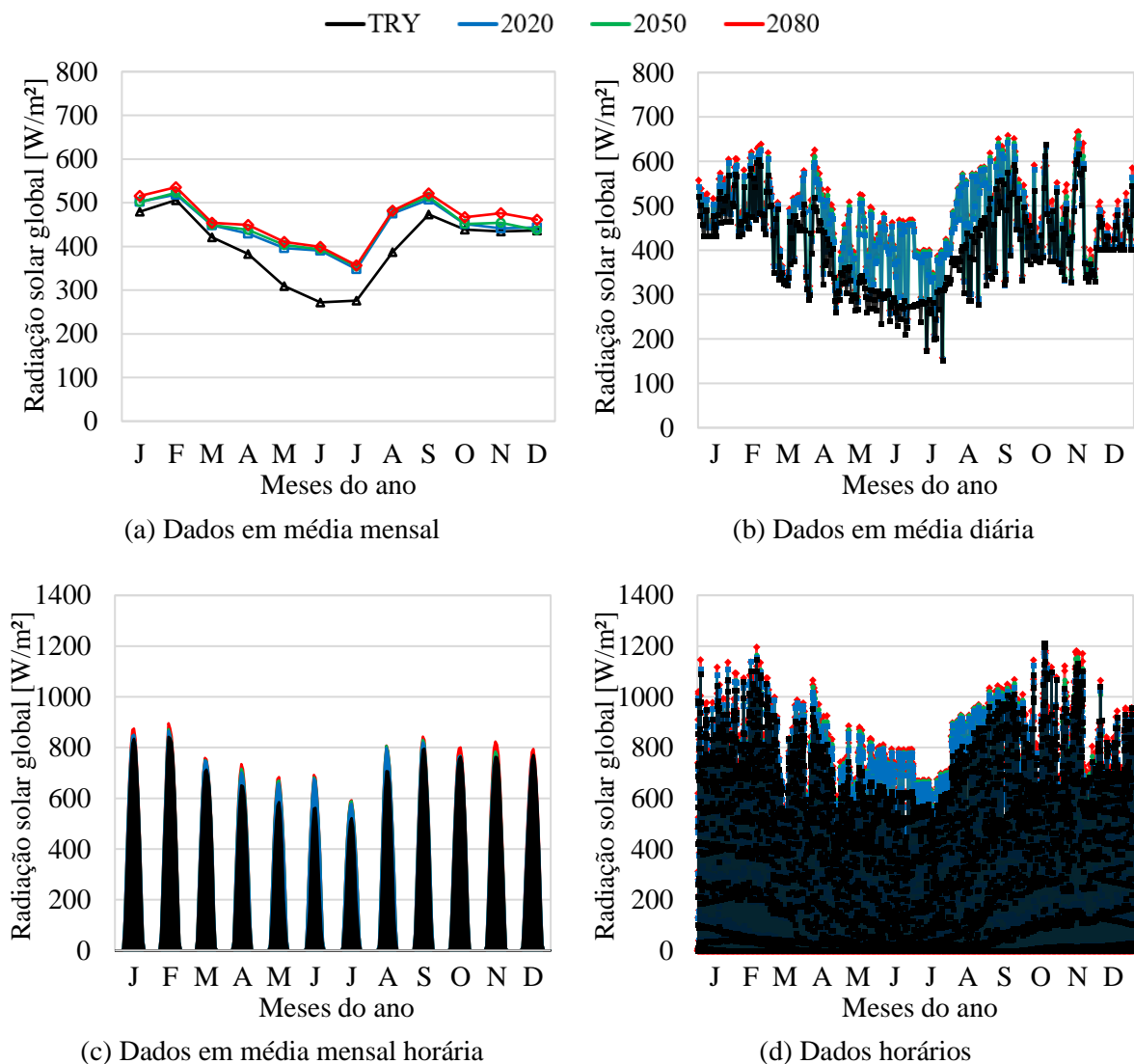
Fonte: o autor; elaborado a partir de Carlo e Lamberts (2005) e Goulart, Lamberts e Firmino (1998)

Figura 67 – Umidade relativa do ar de Brasília, conforme os períodos climáticos



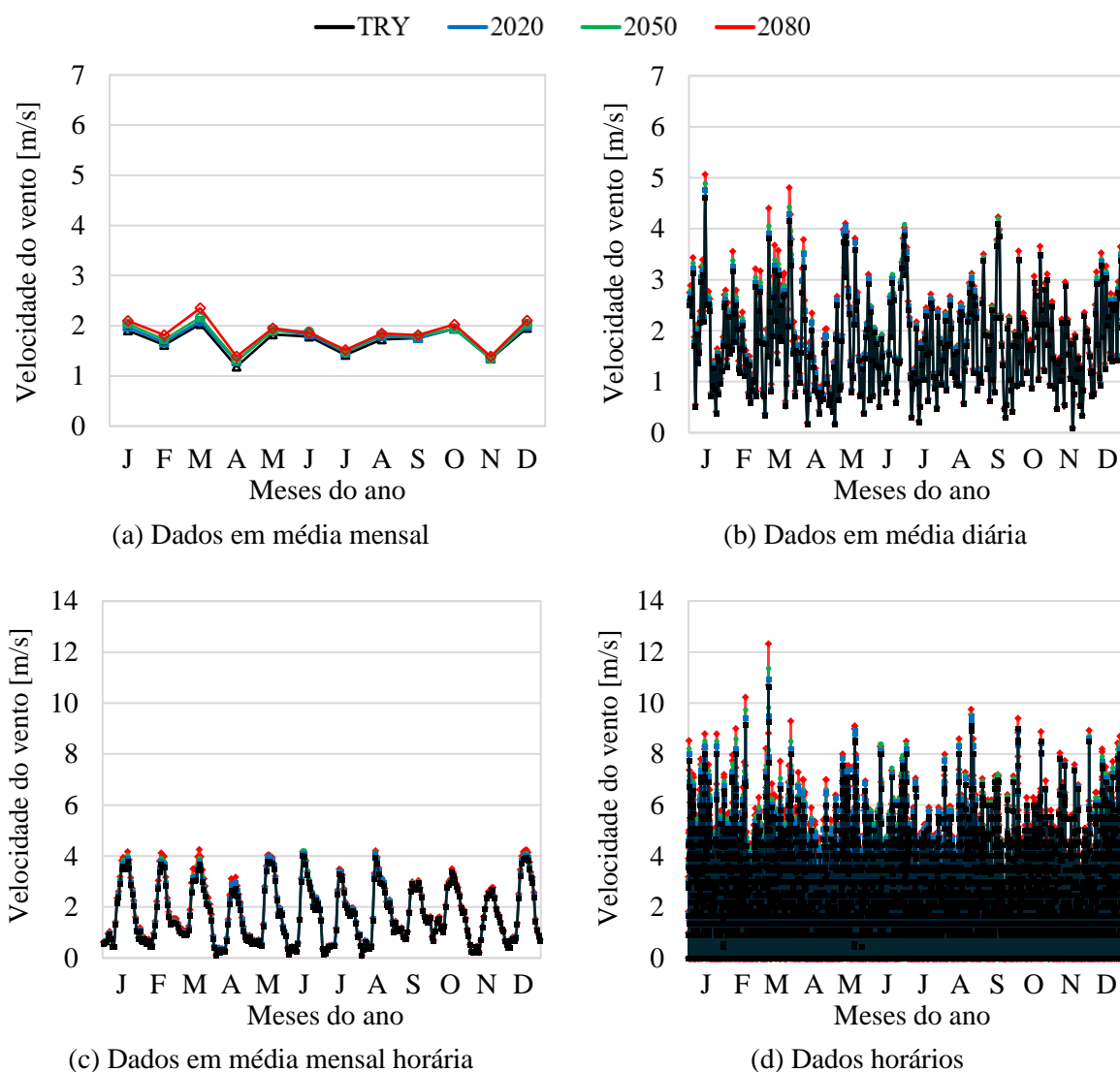
Fonte: o autor; elaborado a partir de Carlo e Lamberts (2005) e Goulart, Lamberts e Firmino (1998)

Figura 68 – Radiação solar global de Brasília, conforme os períodos climáticos



Fonte: o autor; elaborado a partir de Carlo e Lamberts (2005) e Goulart, Lamberts e Firmino (1998)

Figura 69 – Velocidade do vento de Brasília, conforme os períodos climáticos



Fonte: o autor; elaborado a partir de Carlo e Lamberts (2005) e Goulart, Lamberts e Firmino (1998)

Quadro 14 – Estatísticas para a temperatura de bulbo seco [°C] de Brasília, conforme os períodos climáticos

Mês		Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Mai	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
TRY (1962)	Média	21,59	22,00	21,59	21,31	19,20	17,68	17,79	20,43	22,63	21,37	21,92	20,87
	Média das mínimas	18,56	18,25	17,62	16,06	13,51	11,46	10,60	13,16	17,26	17,45	17,80	18,49
	Média das máximas	25,73	27,25	26,85	27,31	25,52	24,70	25,30	27,80	28,98	26,40	27,52	24,65
	Mínima	17,18	17,18	15,71	13,22	9,95	7,67	6,64	8,35	13,31	15,12	14,20	17,20
	Máxima	28,10	29,39	30,73	29,45	29,16	27,09	27,71	30,92	32,96	30,55	31,26	28,78
2020	Média	22,49	22,92	22,69	22,21	20,40	19,02	19,05	21,58	24,04	22,91	23,05	21,75
	Média das mínimas	19,37	19,12	18,61	16,95	14,71	12,87	12,05	14,45	18,79	18,86	18,90	19,31
	Média das máximas	26,70	28,25	28,10	28,23	26,72	25,92	26,37	28,82	30,25	28,09	28,72	25,60
	Mínima	17,98	17,98	16,61	14,07	11,15	9,17	8,20	9,75	14,91	16,42	15,30	18,00
	Máxima	29,10	30,39	32,13	30,45	30,36	28,29	28,71	31,92	34,16	32,35	32,46	29,78
2050	Média	23,45	23,96	23,79	23,75	22,11	20,34	20,33	23,08	25,68	24,18	24,50	22,78
	Média das mínimas	20,25	20,09	19,63	18,30	16,32	14,26	13,20	15,74	20,16	20,08	20,12	20,29
	Média das máximas	27,82	29,37	29,31	29,98	28,53	27,20	27,80	30,53	32,20	29,45	30,47	26,75
	Mínima	18,78	18,88	17,61	15,32	12,75	10,57	9,24	10,85	16,11	17,62	16,24	18,90
	Máxima	30,30	31,59	33,39	32,19	32,26	29,49	30,21	33,72	36,26	33,77	34,46	31,08
2080	Média	25,22	25,62	25,36	25,84	24,34	22,58	22,72	25,29	27,83	26,87	27,07	24,81
	Média das mínimas	21,80	21,42	21,02	20,05	18,36	16,36	15,59	17,96	22,30	22,29	22,07	21,94
	Média das máximas	29,90	31,49	31,10	32,44	30,99	29,60	30,20	32,73	34,37	32,75	33,86	29,36
	Mínima	20,23	20,20	18,95	16,92	14,65	12,57	11,64	13,05	18,21	19,56	17,69	20,40
	Máxima	32,60	33,89	35,33	34,79	34,86	31,99	32,61	35,92	38,46	37,65	38,41	34,33

Fonte: o autor; elaborado a partir de dados de Carlo e Lamberts (2005) e Goulart, Lamberts e Firmino (1998)

Quadro 15 – Estatísticas para a umidade relativa do ar [%] de Brasília, conforme os períodos climáticos

Mês		Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Mai	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
TRY (1962)	Média	84,73	82,06	82,05	77,24	76,04	72,93	64,76	62,07	63,56	76,82	74,71	86,24
	Média das mínimas	68,36	60,96	61,08	54,74	55,15	49,79	39,79	38,70	41,16	56,02	49,60	68,37
	Média das máximas	95,79	96,31	95,79	94,46	93,28	92,00	87,61	84,40	83,45	93,57	92,45	96,73
	Mínima	57,00	50,10	45,90	37,45	43,45	31,10	27,45	26,55	15,90	35,45	28,90	47,25
	Máxima	99,55	100,00	100,00	99,10	99,00	99,55	93,55	99,00	99,55	100,00	100,00	100,00
2020	Média	83,73	81,04	80,05	74,24	73,04	69,93	61,76	59,09	62,55	75,82	74,67	85,24
	Média das mínimas	67,36	59,93	59,08	51,74	52,15	46,79	36,79	35,80	40,16	55,02	49,54	67,37
	Média das máximas	94,79	95,31	93,79	91,46	90,28	89,00	84,61	81,53	82,45	92,57	92,42	95,73
	Mínima	56,00	49,10	43,90	34,45	40,45	28,10	24,45	23,55	14,90	34,45	28,90	46,25
	Máxima	98,55	99,00	98,00	96,10	96,00	96,55	90,55	96,00	98,55	99,00	100,00	99,00
2050	Média	81,73	79,05	78,03	71,21	69,04	66,93	58,76	56,07	59,53	73,82	71,71	84,24
	Média das mínimas	65,36	57,93	57,04	48,71	48,15	43,79	33,79	32,77	37,13	53,02	46,60	66,37
	Média das máximas	92,79	93,31	91,75	88,42	86,28	85,97	81,61	78,53	79,45	90,57	89,45	94,73
	Mínima	54,00	47,10	41,90	31,45	36,45	25,10	21,45	20,55	11,90	32,45	25,90	45,25
	Máxima	96,55	97,00	96,00	92,90	92,00	93,55	87,55	93,00	95,55	97,00	97,00	98,00
2080	Média	78,73	75,06	74,04	65,24	63,04	61,91	54,75	53,05	55,54	65,86	64,73	79,21
	Média das mínimas	62,36	53,96	53,04	42,74	42,15	38,75	29,79	29,74	33,13	45,08	39,64	61,37
	Média das máximas	89,79	89,31	87,82	82,51	80,28	80,97	77,57	75,43	75,45	82,62	82,47	89,70
	Mínima	51,00	43,10	37,90	25,45	30,45	20,10	17,45	17,55	7,90	24,45	18,90	40,25
	Máxima	93,55	93,00	92,00	86,90	86,00	88,55	83,55	90,00	91,55	89,00	90,00	93,00

Fonte: o autor; elaborado a partir de dados de Carlo e Lamberts (2005) e Goulart, Lamberts e Firmino (1998)

Quadro 16 – Estatísticas para a radiação solar global [W/m²] de Brasília, conforme os períodos climáticos

Mês		Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Mai	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
TRY (1962)	Média	479,37	506,06	421,00	382,99	308,96	271,96	275,81	386,92	473,35	438,40	434,56	436,18
	Média das mínimas	14,18	32,13	11,99	19,33	14,94	8,07	8,13	14,27	46,17	2,87	8,35	13,09
	Média das máximas	866,32	907,56	757,60	675,59	596,47	569,86	533,97	753,29	838,98	818,94	819,90	797,26
	Mínima	1,55	20,74	2,38	1,46	7,11	3,74	6,17	5,15	1,26	1,32	3,30	5,52
	Máxima	1088,49	1145,28	985,89	953,62	743,68	649,72	623,27	878,66	1008,21	1210,40	1131,84	1038,56
2020	Média	502,28	518,74	448,18	429,03	396,02	390,53	347,80	475,23	506,88	451,15	441,05	443,47
	Média das mínimas	16,13	33,63	10,84	26,47	22,84	12,62	11,42	21,10	63,09	2,43	7,63	14,29
	Média das máximas	888,96	918,88	791,26	726,39	682,80	685,46	599,88	834,06	864,14	827,31	810,66	786,83
	Mínima	2,03	22,52	1,84	1,49	16,25	8,50	7,34	11,80	1,50	0,69	3,15	8,05
	Máxima	1109,71	1154,10	1010,73	1016,71	854,42	793,55	693,92	957,23	1038,15	1171,99	1119,46	1023,52
2050	Média	501,21	522,72	449,36	438,04	402,95	393,15	354,45	480,48	513,61	451,60	454,25	437,36
	Média das mínimas	16,15	33,61	10,82	26,56	22,84	12,58	11,27	21,11	63,61	2,43	7,54	14,33
	Média das máximas	886,95	926,22	793,39	741,81	694,96	690,10	611,65	843,13	875,81	827,96	835,50	775,78
	Mínima	2,03	22,63	1,78	1,46	16,28	8,46	7,47	11,81	1,45	0,69	2,95	8,16
	Máxima	1108,20	1164,00	1014,68	1039,18	869,63	798,94	707,12	967,76	1052,77	1171,99	1155,04	1008,95
2080	Média	515,80	535,54	454,04	448,92	410,63	399,07	356,70	481,35	521,20	466,83	476,31	461,16
	Média das mínimas	16,12	33,71	10,80	26,76	22,86	12,51	11,23	21,12	64,28	2,34	7,37	14,19
	Média das máximas	913,86	950,53	801,84	760,58	708,39	700,60	615,57	844,94	889,07	856,37	877,46	818,74
	Mínima	1,90	22,95	1,78	1,38	16,24	8,35	7,47	11,83	1,10	0,53	2,75	7,81
	Máxima	1145,64	1196,15	1027,51	1066,26	885,25	811,16	711,11	969,37	1068,64	1180,88	1181,91	1064,62

Fonte: o autor; elaborado a partir de dados de Carlo e Lamberts (2005) e Goulart, Lamberts e Firmino (1998)

Quadro 17 – Estatísticas para a velocidade do vento [m/s] de Brasília, conforme os períodos climáticos

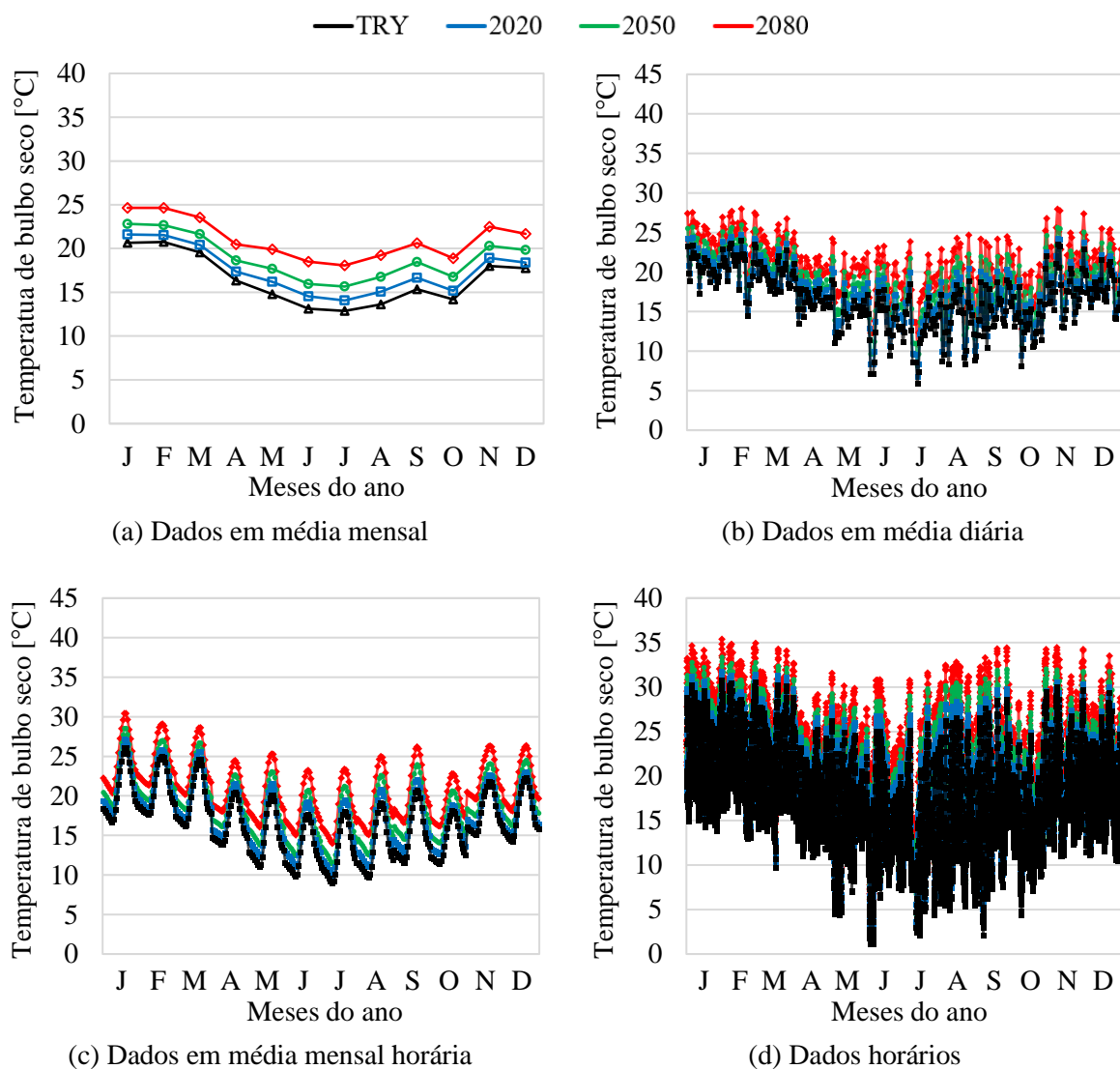
Mês		Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Mai	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
1962	Média	1,91	1,61	2,03	1,19	1,83	1,79	1,42	1,73	1,76	1,94	1,35	1,96
	Média das mínimas	0,03	0,00	0,10	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00
	Média das máximas	5,45	4,98	5,11	4,12	4,97	5,12	4,29	5,05	4,79	5,09	4,62	5,15
	Mínima	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Máxima	8,00	9,15	10,65	6,20	8,55	8,00	8,00	9,10	7,00	9,00	8,50	8,00
2020	Média	1,97	1,66	2,09	1,29	1,91	1,83	1,47	1,80	1,76	1,94	1,35	2,00
	Média das mínimas	0,03	0,00	0,11	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00
	Média das máximas	5,63	5,12	5,25	4,47	5,19	5,22	4,43	5,25	4,79	5,06	4,64	5,26
	Mínima	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Máxima	8,30	9,42	10,95	6,72	8,91	8,10	8,20	9,46	7,00	8,90	8,61	8,20
2050	Média	2,04	1,72	2,17	1,30	1,89	1,89	1,48	1,83	1,80	1,94	1,35	2,04
	Média das mínimas	0,03	0,00	0,11	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00
	Média das máximas	5,80	5,32	5,44	4,53	5,15	5,40	4,49	5,32	4,90	5,09	4,63	5,38
	Mínima	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Máxima	8,50	9,75	11,36	6,82	8,85	8,40	8,40	9,56	7,20	9,00	8,71	8,40
2080	Média	2,10	1,81	2,35	1,39	1,95	1,86	1,52	1,85	1,82	2,03	1,39	2,11
	Média das mínimas	0,03	0,00	0,12	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00
	Média das máximas	5,99	5,59	5,92	4,82	5,30	5,33	4,58	5,41	4,95	5,32	4,75	5,56
	Mínima	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Máxima	8,80	10,23	12,33	7,29	9,11	8,30	8,50	9,76	7,20	9,40	8,93	8,70

Fonte: o autor; elaborado a partir de dados de Carlo e Lamberts (2005) e Goulart, Lamberts e Firmino (1998)

C.3 CURITIBA

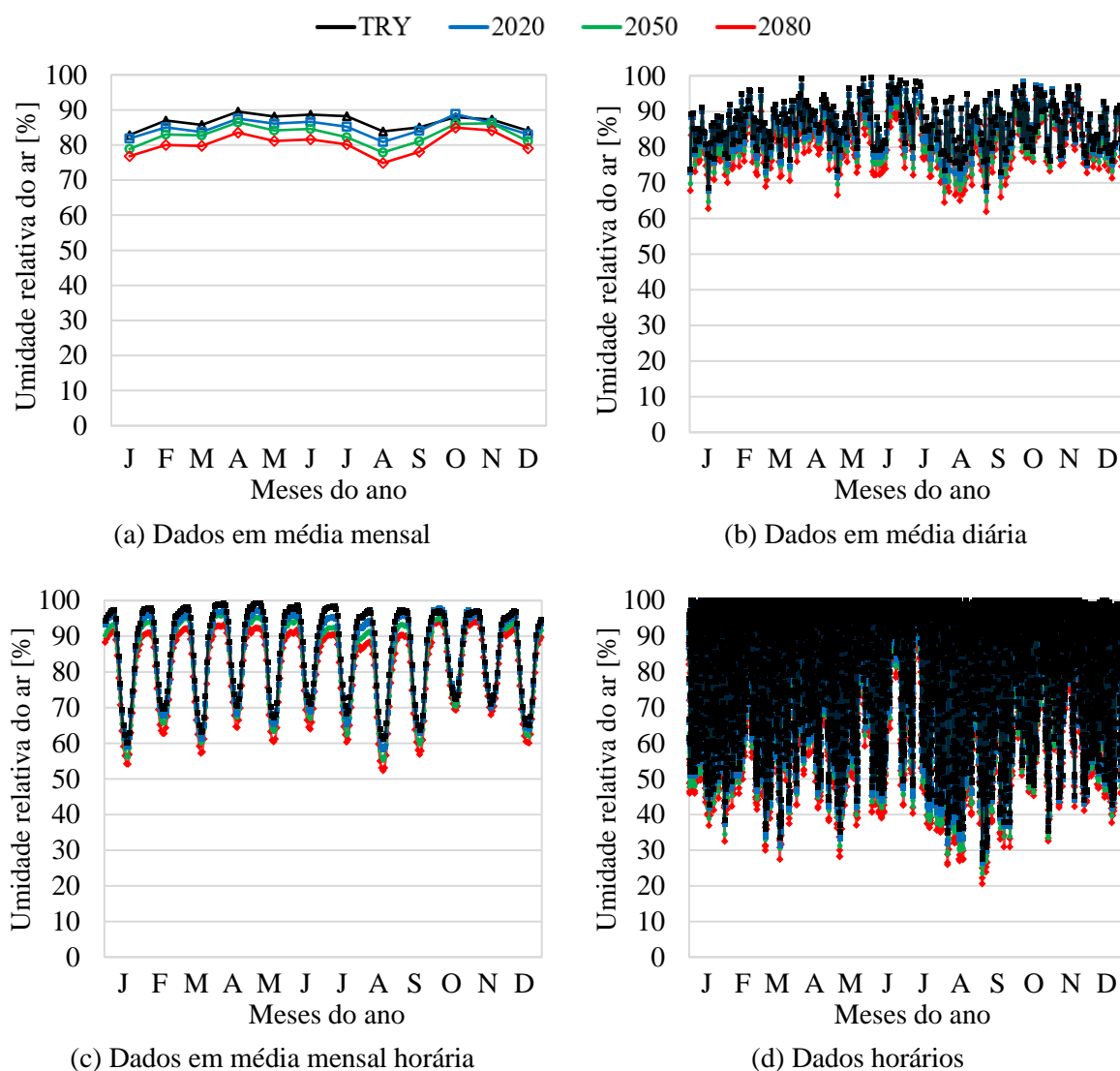
Nas Figuras 70 a 73, e nos Quadros 18 a 21, apresentam-se informações complementares sobre as progressões climáticas para Curitiba, descritas no Item 4.2.3.

Figura 70 – Temperatura de bulbo seco de Curitiba, conforme os períodos climáticos



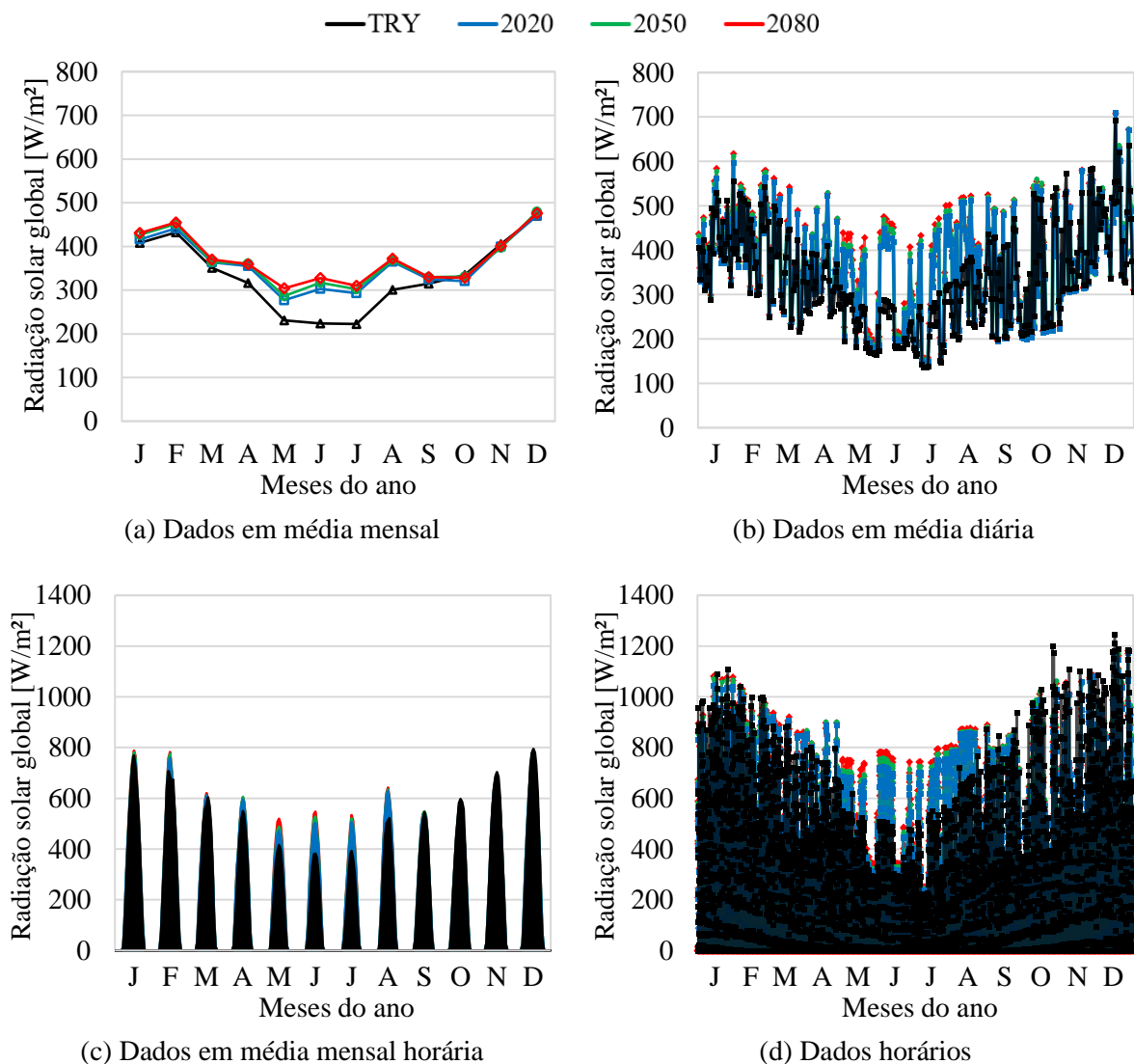
Fonte: o autor; elaborado a partir de Carlo e Lamberts (2005) e Goulart, Lamberts e Firmino (1998)

Figura 71 – Umidade relativa do ar de Curitiba, conforme os períodos climáticos



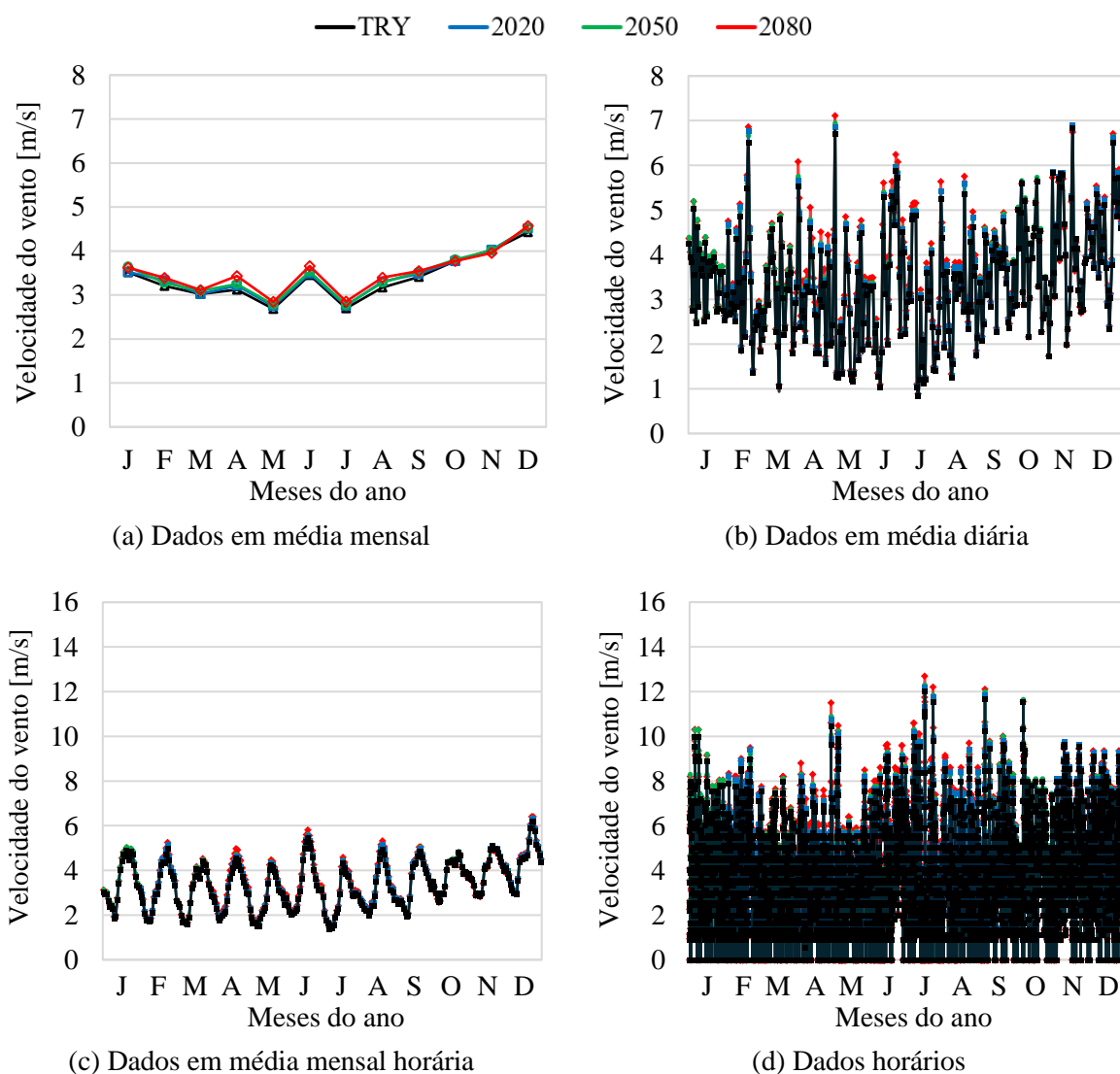
Fonte: o autor; elaborado a partir de Carlo e Lamberts (2005) e Goulart, Lamberts e Firmino (1998)

Figura 72 – Radiação solar global de Curitiba, conforme os períodos climáticos



Fonte: o autor; elaborado a partir de Carlo e Lamberts (2005) e Goulart, Lamberts e Firmino (1998)

Figura 73 – Velocidade do vento de Curitiba, conforme os períodos climáticos



Fonte: o autor; elaborado a partir de Carlo e Lamberts (2005) e Goulart, Lamberts e Firmino (1998)

Quadro 18 – Estatísticas para a temperatura de bulbo seco [°C] de Curitiba, conforme os períodos climáticos

Mês		Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Mai	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
1969	Média	20,64	20,75	19,56	16,35	14,77	13,13	12,87	13,63	15,35	14,18	17,99	17,77
	Média das mínimas	16,40	17,13	15,74	13,18	10,13	8,74	8,38	8,52	10,79	10,65	14,51	13,95
	Média das máximas	26,78	26,02	25,07	20,89	20,50	18,10	18,74	19,94	21,83	18,73	22,72	22,90
	Mínima	13,78	13,00	9,68	10,89	4,35	1,13	2,04	4,95	2,04	4,38	11,05	10,45
	Máxima	30,78	30,53	30,28	25,28	26,17	25,02	25,89	26,50	28,60	29,44	29,96	29,31
2020	Média	21,60	21,55	20,40	17,38	16,20	14,53	14,07	15,08	16,66	15,17	18,93	18,41
	Média das mínimas	17,31	17,91	16,54	14,18	11,50	10,01	9,36	9,80	12,17	11,85	15,53	14,56
	Média das máximas	27,78	26,87	25,98	21,99	22,00	19,64	20,21	21,56	23,07	19,45	23,54	23,60
	Mínima	14,68	13,70	10,38	11,89	5,65	2,23	2,74	6,05	3,54	5,98	12,15	11,05
	Máxima	31,78	31,43	31,28	26,48	27,77	26,72	27,69	28,40	29,80	29,54	30,56	30,01
2050	Média	22,82	22,67	21,66	18,63	17,68	15,94	15,66	16,76	18,47	16,78	20,31	19,84
	Média das mínimas	18,39	18,92	17,84	15,48	12,95	11,33	10,77	11,33	13,82	13,24	16,91	15,91
	Média das máximas	29,23	28,13	27,17	23,12	23,50	21,16	22,04	23,43	25,09	21,33	24,93	25,14
	Mínima	15,68	14,60	11,78	13,19	7,05	3,33	3,89	7,49	4,89	6,98	13,55	12,25
	Máxima	33,38	32,79	32,38	27,47	29,26	28,42	29,83	30,50	32,00	32,04	31,95	31,76
2080	Média	24,63	24,65	23,56	20,49	19,93	18,50	18,07	19,24	20,63	18,89	22,49	21,69
	Média das mínimas	20,15	20,85	19,74	17,41	15,19	13,97	13,41	13,86	15,89	15,35	19,00	17,77
	Média das máximas	31,13	30,19	29,06	24,90	25,77	23,66	24,16	25,81	27,36	23,47	27,22	26,97
	Mínima	17,38	16,50	13,68	15,19	9,35	6,13	6,84	10,15	6,84	9,08	15,55	14,15
	Máxima	35,38	34,93	34,28	29,18	31,57	30,82	31,59	32,80	34,40	34,24	34,46	33,51

Fonte: o autor; elaborado a partir de dados de Carlo e Lamberts (2005) e Goulart, Lamberts e Firmino (1998)

Quadro 19 – Estatísticas para a umidade relativa do ar [%] de Curitiba, conforme os períodos climáticos

Mês		Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Mai	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
TRY (1969)	Média	82,86	87,00	85,72	89,52	88,12	88,63	88,17	83,87	85,07	87,99	87,21	84,03
	Média das mínimas	56,26	64,46	59,84	67,23	64,03	69,02	64,89	56,51	58,14	69,11	67,50	59,70
	Média das máximas	98,30	98,90	99,26	99,94	99,82	99,63	99,75	99,10	99,12	99,07	98,61	98,01
	Mínima	38,45	48,45	33,45	44,20	35,20	46,00	43,00	35,00	27,55	35,55	44,10	42,70
	Máxima	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
2020	Média	81,86	85,00	83,72	87,52	86,12	86,62	85,17	80,87	84,05	88,82	86,24	83,03
	Média das mínimas	55,26	62,46	57,84	65,23	62,03	67,02	61,89	53,58	57,10	70,04	66,54	58,70
	Média das máximas	97,30	96,90	97,26	97,94	97,82	97,63	96,75	96,22	98,09	99,42	97,65	97,01
	Mínima	37,45	46,45	31,45	42,20	33,20	44,00	40,00	32,00	26,55	36,55	43,10	41,70
	Máxima	99,00	98,00	98,00	98,00	98,00	98,00	97,00	98,00	99,00	100,00	100,00	99,00
2050	Média	78,86	83,00	82,72	86,48	84,12	84,62	82,21	77,89	81,05	85,97	86,15	81,04
	Média das mínimas	52,26	60,46	56,84	64,20	60,03	65,02	58,92	50,61	54,10	67,11	66,44	56,70
	Média das máximas	94,30	94,90	96,26	96,91	95,82	95,63	93,78	93,29	95,09	97,03	97,60	95,01
	Mínima	34,45	44,45	30,45	41,20	31,20	42,00	37,00	29,00	23,55	33,55	43,10	39,70
	Máxima	96,00	96,00	97,00	97,00	96,00	96,00	95,00	95,00	96,00	98,00	99,00	97,00
2080	Média	76,83	80,01	79,72	83,52	81,14	81,63	80,18	74,88	78,09	84,95	84,17	79,04
	Média das mínimas	50,22	57,46	53,84	61,23	57,07	62,02	56,89	47,61	51,17	66,07	64,47	54,70
	Média das máximas	92,28	91,90	93,26	93,94	92,85	92,63	91,78	90,32	92,12	96,00	95,60	93,04
	Mínima	32,45	41,45	27,45	38,20	28,20	39,00	35,00	26,00	20,55	32,55	41,10	37,70
	Máxima	94,00	93,00	94,00	94,00	94,00	93,00	93,00	92,00	94,00	97,00	97,00	95,00

Fonte: o autor; elaborado a partir de dados de Carlo e Lamberts (2005) e Goulart, Lamberts e Firmino (1998)

Quadro 20 – Estatísticas para a radiação solar global [W/m²] de Curitiba, conforme os períodos climáticos

Mês		Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maiο	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
TRY (1969)	Média	407,97	432,13	351,08	316,01	230,76	223,91	222,47	300,39	314,83	334,78	405,04	470,10
	Média das mínimas	1,87	34,47	13,65	11,80	5,35	9,17	14,53	8,17	12,96	5,95	20,75	22,41
	Média das máximas	857,78	826,28	650,49	615,06	427,85	395,66	410,48	588,33	613,40	686,38	777,10	921,54
	Mínima	0,69	1,66	3,37	1,02	2,55	1,07	0,93	0,96	1,13	1,74	7,48	1,61
	Máxima	1108,81	1038,70	885,08	800,58	617,58	509,89	566,21	872,03	938,89	1200,62	1108,09	1244,94
2020	Média	415,77	441,59	363,94	355,26	276,94	302,97	293,31	364,78	324,66	320,35	399,82	470,88
	Média das mínimas	2,20	41,77	16,21	12,85	5,21	11,06	20,61	8,07	14,47	6,62	22,95	27,88
	Média das máximas	817,88	803,62	649,93	629,27	486,69	511,35	531,14	668,05	603,94	598,85	722,82	843,57
	Mínima	1,34	1,69	4,63	2,10	2,11	0,69	0,26	0,26	1,34	1,81	13,96	1,66
	Máxima	1047,49	1012,31	921,33	887,61	687,50	724,11	756,57	872,44	843,79	1028,43	1081,13	1181,47
2050	Média	426,87	451,35	364,22	360,77	286,42	317,12	301,90	367,98	329,88	331,13	397,21	479,23
	Média das mínimas	2,17	42,43	16,21	12,78	5,14	11,23	20,83	8,06	14,55	6,61	22,90	27,83
	Média das máximas	839,85	821,54	650,52	639,41	503,54	535,81	547,01	673,77	613,78	619,12	717,82	858,77
	Mínima	1,17	1,59	4,63	2,05	2,12	0,64	0,22	0,26	1,29	1,84	13,84	1,68
	Máxima	1076,11	1034,31	921,36	901,40	710,32	759,23	779,24	881,66	857,98	1063,80	1073,94	1182,31
2080	Média	430,92	454,67	369,71	359,57	303,95	327,54	309,71	372,35	329,59	328,17	401,17	475,72
	Média das mínimas	2,15	42,65	16,20	12,80	5,04	11,36	21,15	8,04	14,58	6,62	22,97	27,76
	Média das máximas	848,01	827,69	660,24	637,30	534,77	555,78	561,40	681,41	613,27	613,48	725,16	852,41
	Mínima	0,98	1,59	4,45	2,04	2,08	0,59	0,18	0,22	1,29	1,82	13,97	1,68
	Máxima	1085,86	1042,46	936,21	897,83	754,02	782,42	800,06	889,45	857,07	1053,48	1084,89	1181,83

Fonte: o autor; elaborado a partir de dados de Carlo e Lamberts (2005) e Goulart, Lamberts e Firmino (1998)

Quadro 21 – Estatísticas para a velocidade do vento [m/s] de Curitiba, conforme os períodos climáticos

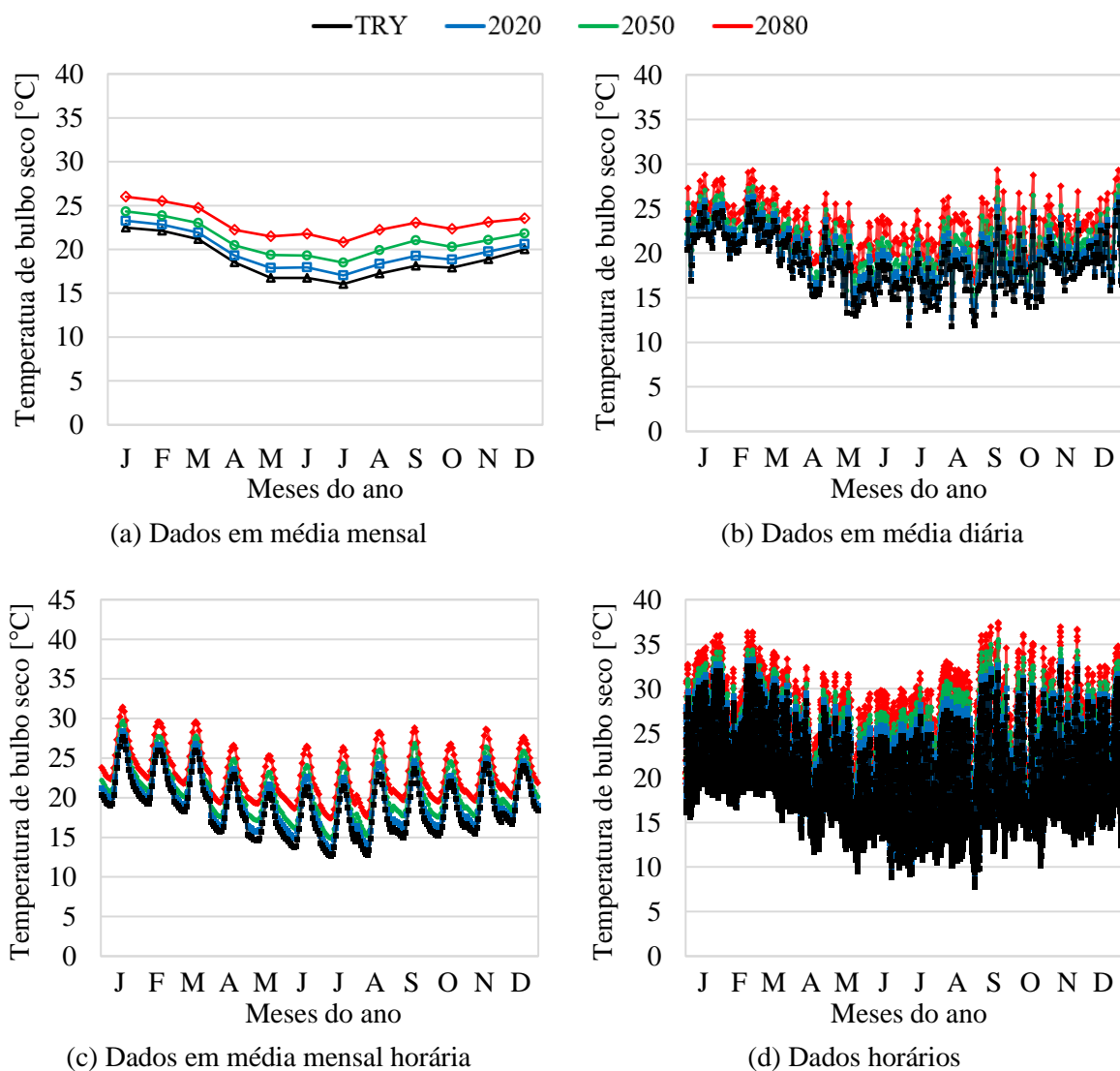
Mês		Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Mai	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
TRY (1969)	Média	3,52	3,21	3,02	3,12	2,69	3,45	2,70	3,17	3,41	3,77	4,01	4,43
	Média das mínimas	0,76	0,77	0,46	0,70	0,63	1,04	0,24	0,78	0,82	1,26	1,55	1,52
	Média das máximas	6,69	6,31	5,59	5,71	5,24	6,49	6,49	5,98	6,59	6,54	6,94	7,48
	Mínima	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Máxima	10,00	9,00	8,00	10,45	9,90	9,10	12,00	9,00	11,65	11,55	9,65	9,10
2020	Média	3,52	3,33	3,02	3,21	2,74	3,49	2,75	3,31	3,48	3,77	4,02	4,51
	Média das mínimas	0,76	0,79	0,46	0,72	0,65	1,04	0,25	0,81	0,83	1,26	1,55	1,56
	Média das máximas	6,69	6,56	5,60	5,86	5,34	6,57	6,61	6,24	6,70	6,54	7,01	7,60
	Mínima	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Máxima	10,00	9,40	8,00	10,75	10,10	9,20	12,20	9,40	11,85	11,55	9,75	9,26
2050	Média	3,64	3,28	3,09	3,25	2,78	3,53	2,77	3,28	3,52	3,81	4,01	4,52
	Média das mínimas	0,80	0,79	0,47	0,73	0,66	1,06	0,26	0,81	0,85	1,26	1,55	1,56
	Média das máximas	6,91	6,45	5,69	5,93	5,42	6,64	6,65	6,20	6,81	6,63	6,94	7,64
	Mínima	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Máxima	10,30	9,20	8,10	10,90	10,25	9,30	12,30	9,30	12,01	11,65	9,65	9,30
2080	Média	3,62	3,39	3,11	3,43	2,84	3,66	2,85	3,40	3,55	3,77	3,95	4,57
	Média das mínimas	0,80	0,81	0,48	0,77	0,67	1,10	0,26	0,82	0,85	1,26	1,54	1,58
	Média das máximas	6,87	6,65	5,74	6,28	5,55	6,89	6,87	6,42	6,84	6,54	6,85	7,69
	Mínima	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Máxima	10,30	9,50	8,20	11,50	10,49	9,66	12,70	9,70	12,11	11,55	9,55	9,36

Fonte: o autor; elaborado a partir de dados de Carlo e Lamberts (2005) e Goulart, Lamberts e Firmino (1998)

C.4 SÃO PAULO

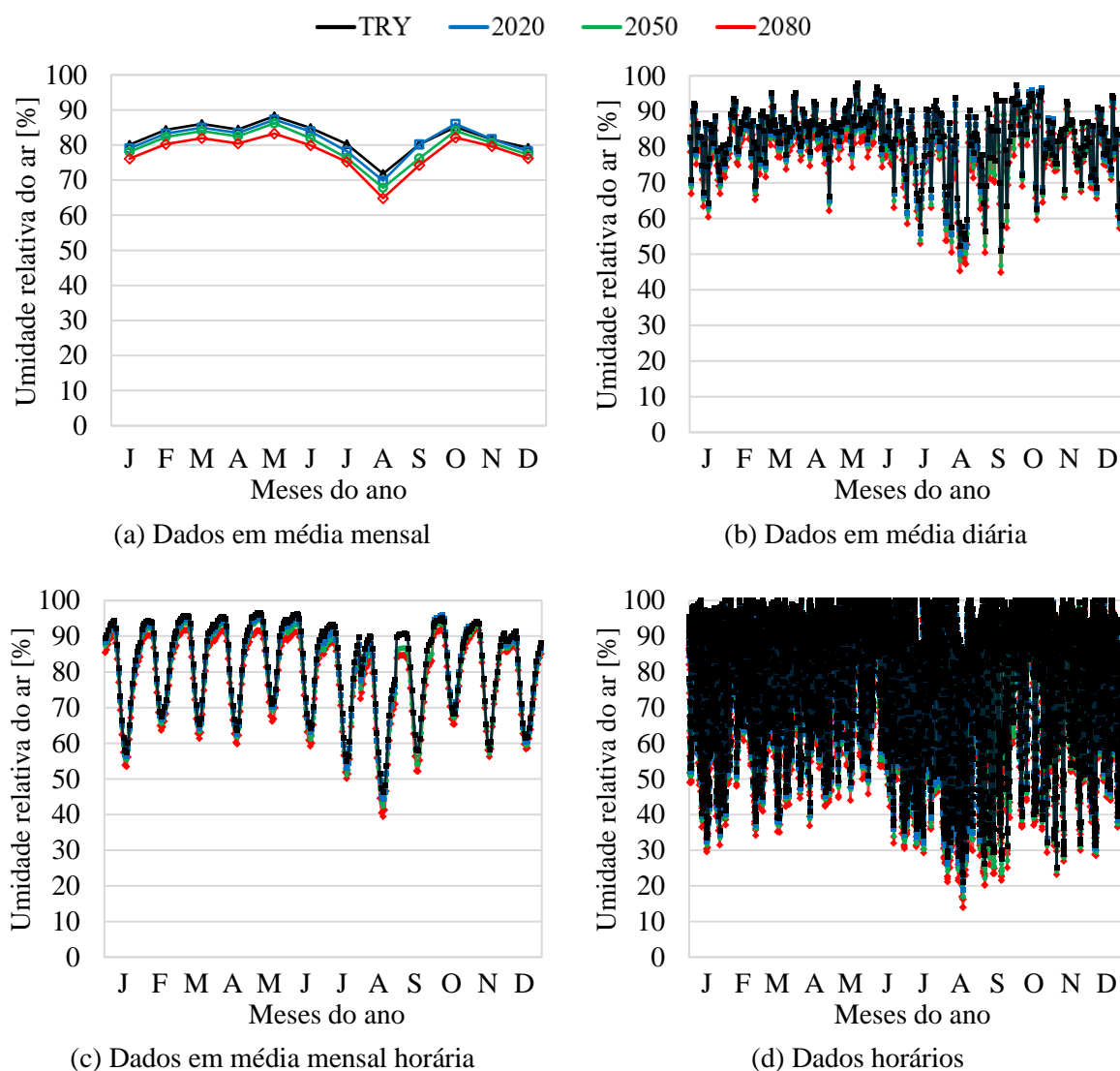
Nas Figuras 74 a 77, e nos Quadros 22 a 25, apresentam-se informações complementares sobre as progressões climáticas para São Paulo, descritas no Item 4.2.4.

Figura 74 – Temperatura de bulbo seco de São Paulo, conforme os períodos climáticos



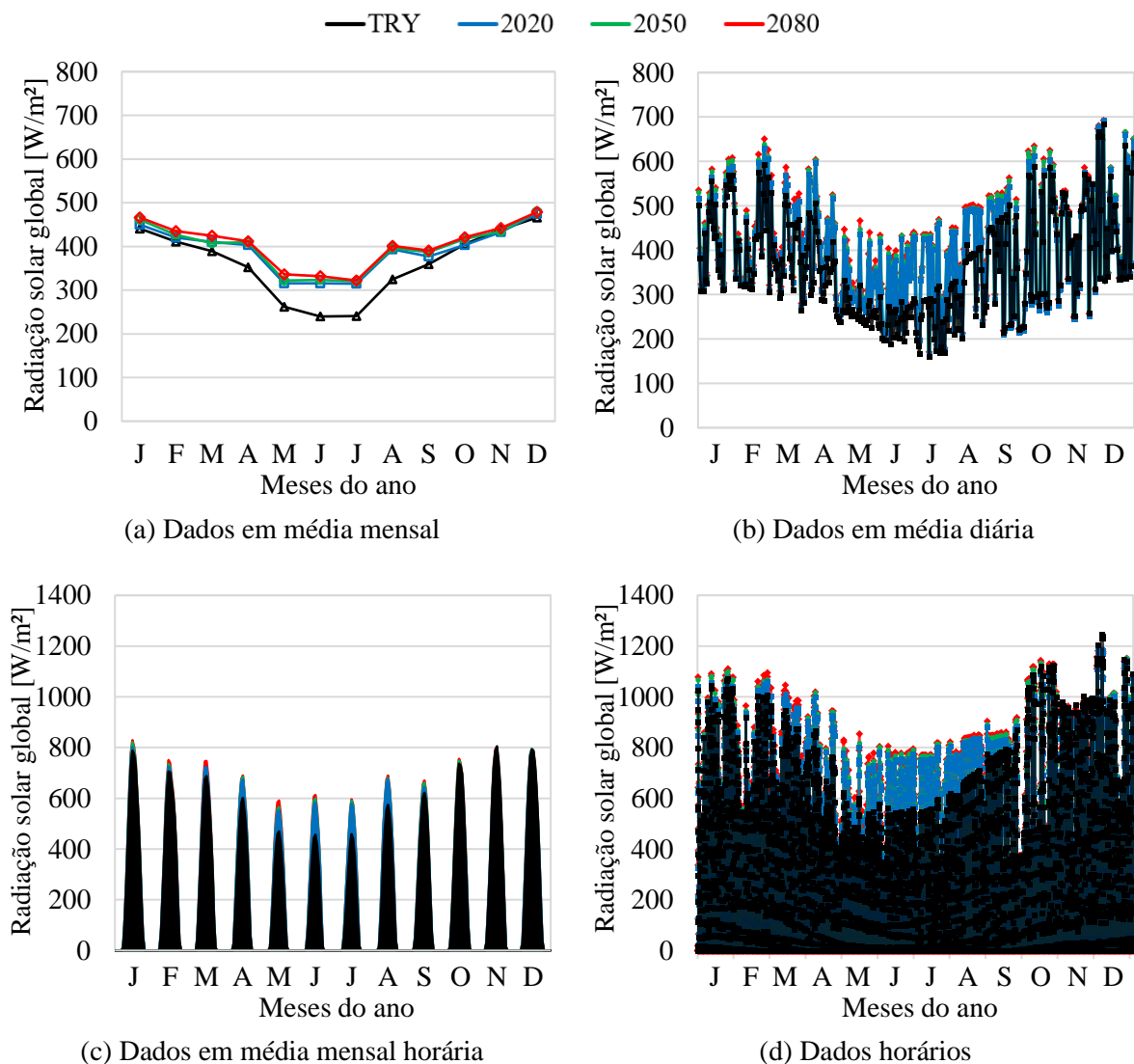
Fonte: o autor; elaborado a partir de Carlo e Lamberts (2005) e Goulart, Lamberts e Firmino (1998)

Figura 75 – Umidade relativa do ar de São Paulo, conforme os períodos climáticos



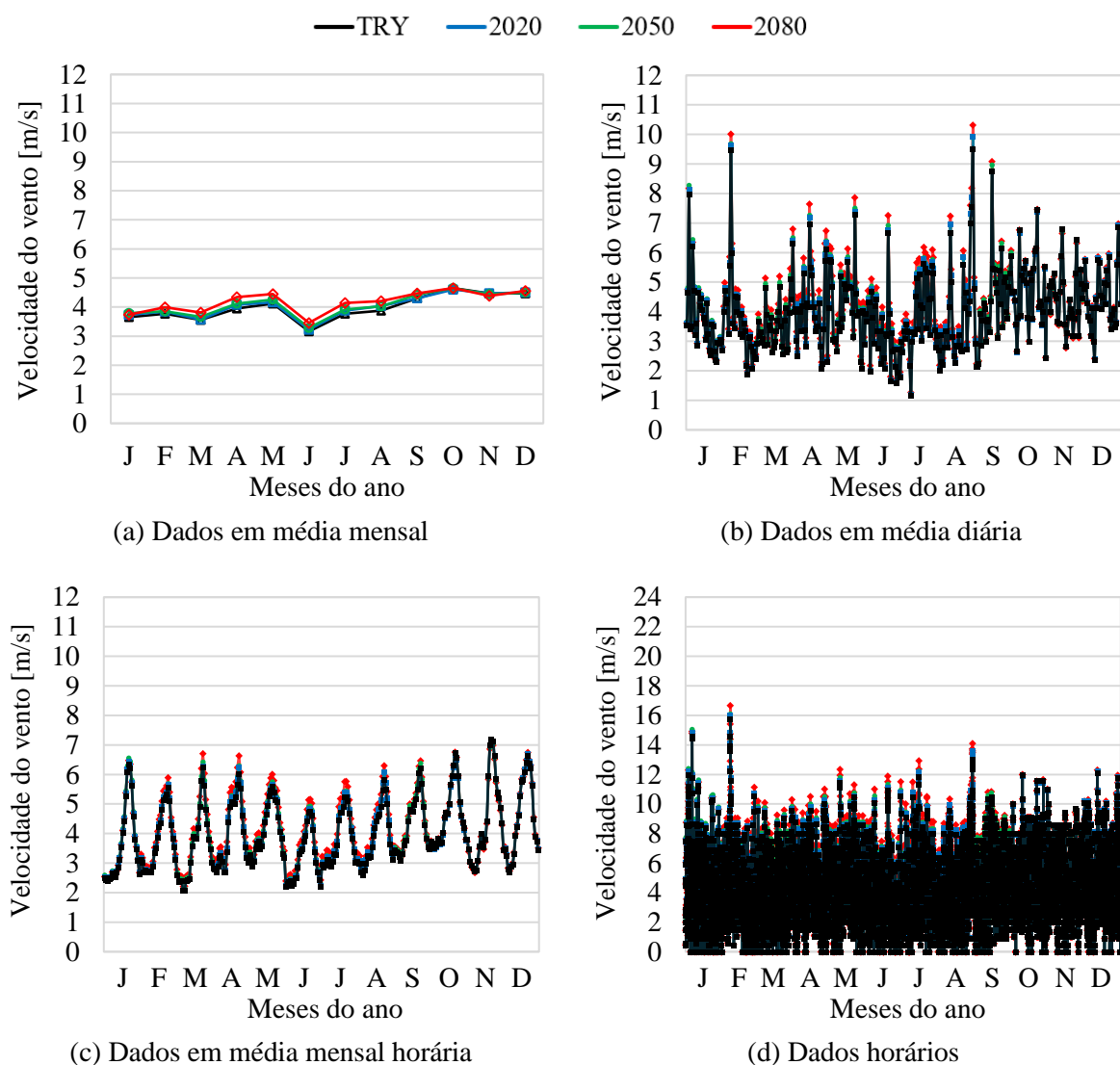
Fonte: o autor; elaborado a partir de Carlo e Lamberts (2005) e Goulart, Lamberts e Firmino (1998)

Figura 76 – Radiação solar global de São Paulo, conforme os períodos climáticos



Fonte: o autor; elaborado a partir de Carlo e Lamberts (2005) e Goulart, Lamberts e Firmino (1998)

Figura 77 – Velocidade do vento de São Paulo, conforme os períodos climáticos



Fonte: o autor; elaborado a partir de Carlo e Lamberts (2005) e Goulart, Lamberts e Firmino (1998)

Quadro 22 – Estatísticas para a temperatura de bulbo seco [°C] de São Paulo, conforme os períodos climáticos

Mês		Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Mai	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
TRY (1954)	Média	22,47	22,13	21,18	18,51	16,74	16,76	16,05	17,23	18,13	17,91	18,88	20,00
	Média das mínimas	18,74	18,98	18,06	15,42	13,95	13,36	12,23	12,35	14,45	14,64	15,31	16,23
	Média das máximas	28,48	26,92	26,60	23,20	21,05	21,72	21,91	23,66	24,39	23,10	24,68	24,89
	Mínima	15,64	16,72	15,27	11,73	9,56	8,92	9,20	7,82	9,76	10,17	12,64	12,40
	Máxima	32,03	32,58	30,82	28,62	26,67	24,71	26,88	27,58	31,78	30,89	32,47	31,13
2020	Média	23,27	22,82	21,91	19,31	17,89	17,95	17,03	18,35	19,26	18,82	19,75	20,58
	Média das mínimas	19,52	19,62	18,76	16,19	15,05	14,49	13,11	13,38	15,62	15,69	16,27	16,79
	Média das máximas	29,28	27,62	27,39	24,03	22,27	23,00	23,05	24,88	25,43	23,79	25,43	25,49
	Mínima	16,34	17,32	15,97	12,43	10,56	9,92	10,00	8,76	10,86	11,41	13,64	12,90
	Máxima	32,83	33,28	31,62	29,52	27,97	26,01	28,18	28,88	32,68	31,29	33,07	31,73
2050	Média	24,33	23,85	23,01	20,45	19,35	19,29	18,49	19,90	21,02	20,29	21,06	21,79
	Média das mínimas	20,47	20,68	19,94	17,33	16,46	15,78	14,39	14,73	17,10	16,95	17,51	17,96
	Média das máximas	30,52	28,66	28,41	25,19	23,82	24,43	24,76	26,71	27,66	25,58	26,79	26,76
	Mínima	17,24	18,37	17,17	13,63	11,91	11,22	11,10	9,92	12,06	12,37	14,84	14,10
	Máxima	34,17	34,38	32,62	30,62	29,67	27,51	30,08	30,88	35,53	33,49	34,51	33,13
2080	Média	25,99	25,53	24,72	22,23	21,47	21,75	20,81	22,24	23,03	22,35	23,11	23,53
	Média das mínimas	22,09	22,25	21,56	19,13	18,60	18,25	16,93	17,15	19,12	18,89	19,46	19,69
	Média das máximas	32,29	30,52	30,25	26,95	25,91	26,87	26,77	28,93	29,65	27,83	29,03	28,51
	Mínima	18,84	19,92	18,72	15,43	14,06	13,67	13,90	12,42	14,26	14,17	16,74	15,80
	Máxima	36,03	36,38	34,52	32,42	31,67	29,97	31,78	33,08	37,48	36,09	36,97	34,83

Fonte: o autor; elaborado a partir de dados de Carlo e Lamberts (2005) e Goulart, Lamberts e Firmino (1998)

Quadro 23 – Estatísticas para a umidade relativa do ar [%] de São Paulo, conforme os períodos climáticos

Mês		Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Mai	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
TRY (1954)	Média	80,07	84,29	85,97	84,44	88,22	84,87	80,23	71,81	80,21	85,13	81,63	79,22
	Média das mínimas	52,69	63,46	61,91	60,98	67,61	61,97	52,39	44,03	53,27	61,88	55,61	56,77
	Média das máximas	96,29	96,85	97,58	97,36	98,36	98,53	96,55	93,00	96,11	98,00	95,94	94,67
	Mínima	33,55	38,10	39,00	40,80	49,00	35,45	34,25	21,00	26,10	32,35	25,15	31,45
	Máxima	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
2020	Média	79,07	83,29	84,97	83,44	87,22	83,85	78,23	69,82	80,18	86,04	81,64	78,23
	Média das mínimas	51,69	62,46	60,91	59,98	66,61	60,94	50,39	42,03	53,23	62,88	55,61	55,77
	Média das máximas	95,29	95,85	96,58	96,36	97,36	97,53	94,55	91,06	96,07	98,55	95,98	93,70
	Mínima	32,55	37,10	38,00	39,80	48,00	34,45	32,25	19,00	26,10	33,35	25,15	30,45
	Máxima	99,00	99,00	99,00	99,00	99,00	99,00	98,00	98,00	100,00	100,00	100,00	99,00
2050	Média	78,07	82,29	83,97	82,44	86,22	81,90	76,26	67,81	76,24	84,10	80,63	77,24
	Média das mínimas	50,69	61,46	59,91	58,98	65,61	59,00	48,42	40,03	49,30	60,85	54,61	54,80
	Média das máximas	94,29	94,85	95,58	95,36	96,36	95,57	92,55	89,10	92,17	96,97	94,94	92,70
	Mínima	31,55	36,10	37,00	38,80	47,00	32,45	30,25	17,00	22,10	31,35	24,15	29,45
	Máxima	98,00	98,00	98,00	98,00	98,00	97,00	96,00	96,00	98,00	99,00	99,00	98,00
2080	Média	76,07	80,29	81,97	80,44	83,25	79,87	75,20	64,85	74,23	82,10	79,61	76,22
	Média das mínimas	48,69	59,46	57,91	56,98	62,64	56,97	47,36	37,06	47,30	58,85	53,61	53,77
	Média das máximas	92,29	92,85	93,58	93,36	93,38	93,53	91,52	86,19	90,14	94,97	93,94	91,67
	Mínima	29,55	34,10	35,00	36,80	44,00	30,45	29,25	14,00	20,10	29,35	23,15	28,45
	Máxima	96,00	96,00	96,00	96,00	95,00	95,00	95,00	94,00	95,00	97,00	98,00	97,00

Fonte: o autor; elaborado a partir de dados de Carlo e Lamberts (2005) e Goulart, Lamberts e Firmino (1998)

Quadro 24 – Estatísticas para a radiação solar global [W/m²] de São Paulo, conforme os períodos climáticos

Mês		Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Mai	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
TRY (1954)	Média	440,92	410,65	388,86	352,66	261,57	239,64	240,36	324,55	359,39	405,42	438,72	466,12
	Média das mínimas	11,87	12,86	12,43	21,79	11,35	4,36	3,39	11,69	26,36	5,47	13,62	23,34
	Média das máximas	822,77	737,84	715,45	615,03	473,89	467,03	468,05	614,57	629,34	778,87	834,57	843,93
	Mínima	4,22	0,73	2,05	15,18	5,10	2,06	1,96	3,73	1,44	1,59	5,02	16,08
	Máxima	1070,04	1006,90	961,90	863,90	621,01	575,13	618,85	773,87	867,83	1125,07	1000,91	1244,47
2020	Média	450,14	420,16	410,29	403,20	315,39	315,72	314,71	393,08	376,75	403,07	433,09	474,78
	Média das mínimas	14,34	12,61	10,40	28,08	13,80	5,66	4,22	15,47	34,18	5,07	12,38	30,04
	Média das máximas	829,91	753,22	758,78	704,23	570,05	615,26	603,43	722,00	653,65	758,40	812,57	839,17
	Mínima	5,82	1,72	0,99	15,89	8,09	3,50	2,35	5,27	2,07	0,76	4,83	16,22
	Máxima	1072,82	1056,80	1011,66	1000,32	798,93	782,15	802,49	880,61	883,04	1091,48	967,67	1185,08
2050	Média	461,37	426,23	407,79	409,25	322,22	323,24	320,13	395,85	386,80	417,30	434,40	479,21
	Média das mínimas	14,44	12,63	10,40	28,21	13,75	5,65	4,21	15,47	34,68	5,07	12,40	30,00
	Média das máximas	850,92	764,20	754,15	715,44	582,65	630,79	614,66	726,82	671,56	787,15	814,91	847,54
	Mínima	5,93	1,72	1,05	16,05	7,98	3,51	2,43	5,27	2,12	0,66	4,80	16,13
	Máxima	1100,34	1067,05	1004,49	1016,21	816,99	802,28	814,93	891,30	907,53	1133,77	969,63	1182,83
2080	Média	465,80	434,92	424,08	411,46	335,96	331,50	322,07	401,03	390,58	421,07	441,96	478,52
	Média das mínimas	14,48	12,62	10,32	28,30	13,59	5,63	4,21	15,53	35,05	5,07	12,34	29,95
	Média das máximas	859,13	780,26	784,84	719,52	608,69	647,24	618,85	735,91	679,38	795,14	829,24	846,23
	Mínima	5,94	1,72	0,83	16,22	7,48	3,61	2,43	5,39	2,12	0,62	4,82	16,15
	Máxima	1111,15	1094,71	1046,54	1020,10	854,27	805,36	822,89	903,50	918,35	1144,14	987,17	1182,93

Fonte: o autor; elaborado a partir de dados de Carlo e Lamberts (2005) e Goulart, Lamberts e Firmino (1998)

Quadro 25 – Estatísticas para a velocidade do vento [m/s] de São Paulo, conforme os períodos climáticos

Mês		Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Mai	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
TRY (1954)	Média	3,66	3,77	3,56	3,94	4,12	3,16	3,77	3,87	4,30	4,65	4,47	4,47
	Média das mínimas	0,56	1,09	0,65	1,33	1,30	0,79	1,23	1,09	1,45	1,57	1,56	1,28
	Média das máximas	8,10	7,66	7,33	7,28	7,43	6,47	7,15	7,53	7,91	8,34	8,14	8,44
	Mínima	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Máxima	14,55	15,75	9,55	10,00	11,45	10,90	11,80	13,00	10,45	12,00	10,00	12,10
2020	Média	3,72	3,84	3,57	4,08	4,16	3,22	3,88	4,04	4,30	4,60	4,47	4,50
	Média das mínimas	0,57	1,10	0,66	1,37	1,30	0,80	1,27	1,13	1,45	1,57	1,56	1,28
	Média das máximas	8,22	7,79	7,35	7,52	7,52	6,58	7,34	7,86	7,91	8,24	8,14	8,53
	Mínima	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Máxima	14,81	16,01	9,65	10,30	11,55	11,10	12,15	13,60	10,45	11,90	10,00	12,20
2050	Média	3,79	3,85	3,67	4,12	4,26	3,29	3,91	4,02	4,42	4,65	4,44	4,50
	Média das mínimas	0,59	1,10	0,67	1,38	1,34	0,82	1,28	1,13	1,50	1,57	1,56	1,28
	Média das máximas	8,40	7,85	7,53	7,62	7,65	6,72	7,42	7,82	8,11	8,31	8,04	8,53
	Mínima	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Máxima	15,05	16,11	9,85	10,50	11,80	11,35	12,25	13,50	10,75	11,90	9,90	12,20
2080	Média	3,74	3,99	3,81	4,34	4,44	3,45	4,14	4,21	4,47	4,65	4,38	4,55
	Média das mínimas	0,57	1,15	0,70	1,46	1,41	0,87	1,36	1,19	1,50	1,57	1,54	1,29
	Média das máximas	8,29	8,11	7,86	8,00	7,99	7,03	7,86	8,16	8,23	8,34	7,97	8,58
	Mínima	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Máxima	14,91	16,66	10,31	11,00	12,35	11,89	12,94	14,10	10,85	12,00	9,85	12,30

Fonte: o autor; elaborado a partir de dados de Carlo e Lamberts (2005) e Goulart, Lamberts e Firmino (1998)

Apêndice D – Dados Das Simulações

Neste apêndice, detalham-se as informações sobre os modelos simulados, bem como os indicadores de desempenho obtidos por meio das simulações em cada clima, para cada período considerado.

D.1 AMOSTRA SIMULADA

No Quadro 26, apresentam-se as propriedades termofísicas de cada um dos modelos da amostragem Morris criada, conforme o detalhamento das variáveis independentes, descrito no Quadro 5, e demais considerações adotadas para o método de Morris, descritas no Item 3.3.3.

Quadro 26 – Propriedades termofísicas de cada modelo da amostra (continua)

Mod	acob	apar	CTcob	CTpar	CTpis	ecob	Fvent	FSvid	OS	tvenez	Ucob	Upar	Upis
1	0,40	0,60	382,33	310,00	177,27	0,33	0,43	0,36	270,00	0,20	1,12	0,27	2,04
2	0,40	0,60	382,33	310,00	177,27	0,33	0,43	0,53	270,00	0,20	1,12	0,27	2,04
3	0,40	0,80	382,33	310,00	177,27	0,33	0,43	0,53	270,00	0,20	1,12	0,27	2,04
4	0,40	0,80	382,33	175,00	177,27	0,33	0,43	0,53	270,00	0,20	1,12	0,27	2,04
5	0,40	0,80	382,33	175,00	177,27	0,33	0,43	0,53	270,00	0,43	1,12	0,27	2,04
6	0,40	0,80	382,33	175,00	177,27	0,33	0,43	0,53	270,00	0,43	1,12	1,65	2,04
7	0,40	0,80	568,00	175,00	177,27	0,33	0,43	0,53	270,00	0,43	1,12	1,65	2,04
8	0,40	0,80	568,00	175,00	177,27	0,62	0,43	0,53	270,00	0,43	1,12	1,65	2,04
9	0,40	0,80	568,00	175,00	177,27	0,62	0,43	0,53	270,00	0,43	1,12	1,65	0,72
10	0,60	0,80	568,00	175,00	177,27	0,62	0,43	0,53	270,00	0,43	1,12	1,65	0,72
11	0,60	0,80	568,00	175,00	13,40	0,62	0,43	0,53	270,00	0,43	1,12	1,65	0,72
12	0,60	0,80	568,00	175,00	13,40	0,62	0,67	0,53	270,00	0,43	1,12	1,65	0,72
13	0,60	0,80	568,00	175,00	13,40	0,62	0,67	0,53	180,00	0,43	1,12	1,65	0,72
14	0,60	0,80	568,00	175,00	13,40	0,62	0,67	0,53	180,00	0,43	0,53	1,65	0,72
15	0,80	0,40	382,33	310,00	177,27	0,05	0,67	0,87	90,00	0,43	1,71	0,27	2,04
16	0,80	0,40	382,33	310,00	177,27	0,05	0,67	0,87	90,00	0,43	2,30	0,27	2,04
17	0,80	0,40	382,33	310,00	177,27	0,05	0,43	0,87	90,00	0,43	2,30	0,27	2,04
18	0,60	0,40	382,33	310,00	177,27	0,05	0,43	0,87	90,00	0,43	2,30	0,27	2,04
19	0,60	0,40	382,33	310,00	177,27	0,33	0,43	0,87	90,00	0,43	2,30	0,27	2,04
20	0,60	0,20	382,33	310,00	177,27	0,33	0,43	0,87	90,00	0,43	2,30	0,27	2,04
21	0,60	0,20	382,33	175,00	177,27	0,33	0,43	0,87	90,00	0,43	2,30	0,27	2,04
22	0,60	0,20	382,33	175,00	177,27	0,33	0,43	0,87	90,00	0,67	2,30	0,27	2,04
23	0,60	0,20	382,33	175,00	341,13	0,33	0,43	0,87	90,00	0,67	2,30	0,27	2,04
24	0,60	0,20	382,33	175,00	341,13	0,33	0,43	0,87	180,00	0,67	2,30	0,27	2,04
25	0,60	0,20	382,33	175,00	341,13	0,33	0,43	0,87	180,00	0,67	2,30	1,65	2,04
26	0,60	0,20	196,67	175,00	341,13	0,33	0,43	0,87	180,00	0,67	2,30	1,65	2,04
27	0,60	0,20	196,67	175,00	341,13	0,33	0,43	0,87	180,00	0,67	2,30	1,65	3,35
28	0,60	0,20	196,67	175,00	341,13	0,33	0,43	0,70	180,00	0,67	2,30	1,65	3,35

Quadro 26 – Propriedades termofísicas de cada modelo da amostra (continua)

Mod	acob	apar	CTcob	CTpar	CTpis	ecob	Fvent	FSvid	OS	tvnez	Ucob	Upar	Upis
29	0,40	0,40	382,33	175,00	177,27	0,05	0,67	0,53	180,00	0,67	0,53	3,02	3,35
30	0,40	0,40	382,33	175,00	177,27	0,05	0,67	0,53	180,00	0,67	0,53	3,02	2,04
31	0,40	0,40	382,33	175,00	341,13	0,05	0,67	0,53	180,00	0,67	0,53	3,02	2,04
32	0,40	0,40	382,33	175,00	341,13	0,05	0,67	0,36	180,00	0,67	0,53	3,02	2,04
33	0,40	0,40	382,33	175,00	341,13	0,33	0,67	0,36	180,00	0,67	0,53	3,02	2,04
34	0,40	0,40	382,33	175,00	341,13	0,33	0,67	0,36	90,00	0,67	0,53	3,02	2,04
35	0,40	0,40	568,00	175,00	341,13	0,33	0,67	0,36	90,00	0,67	0,53	3,02	2,04
36	0,40	0,60	568,00	175,00	341,13	0,33	0,67	0,36	90,00	0,67	0,53	3,02	2,04
37	0,40	0,60	568,00	175,00	341,13	0,33	0,67	0,36	90,00	0,43	0,53	3,02	2,04
38	0,40	0,60	568,00	175,00	341,13	0,33	0,67	0,36	90,00	0,43	1,12	3,02	2,04
39	0,40	0,60	568,00	175,00	341,13	0,33	0,90	0,36	90,00	0,43	1,12	3,02	2,04
40	0,20	0,60	568,00	175,00	341,13	0,33	0,90	0,36	90,00	0,43	1,12	3,02	2,04
41	0,20	0,60	568,00	310,00	341,13	0,33	0,90	0,36	90,00	0,43	1,12	3,02	2,04
42	0,20	0,60	568,00	310,00	341,13	0,33	0,90	0,36	90,00	0,43	1,12	1,65	2,04
43	0,20	0,40	196,67	175,00	505,00	0,62	0,90	0,70	90,00	0,43	1,71	3,02	0,72
44	0,20	0,40	196,67	175,00	505,00	0,62	0,90	0,53	90,00	0,43	1,71	3,02	0,72
45	0,20	0,40	196,67	175,00	505,00	0,62	0,90	0,53	90,00	0,43	1,12	3,02	0,72
46	0,40	0,40	196,67	175,00	505,00	0,62	0,90	0,53	90,00	0,43	1,12	3,02	0,72
47	0,40	0,40	196,67	310,00	505,00	0,62	0,90	0,53	90,00	0,43	1,12	3,02	0,72
48	0,40	0,40	196,67	310,00	505,00	0,62	0,90	0,53	90,00	0,43	1,12	1,65	0,72
49	0,40	0,20	196,67	310,00	505,00	0,62	0,90	0,53	90,00	0,43	1,12	1,65	0,72
50	0,40	0,20	196,67	310,00	505,00	0,62	0,90	0,53	90,00	0,43	1,12	1,65	2,04
51	0,40	0,20	196,67	310,00	505,00	0,62	0,67	0,53	90,00	0,43	1,12	1,65	2,04
52	0,40	0,20	11,00	310,00	505,00	0,62	0,67	0,53	90,00	0,43	1,12	1,65	2,04
53	0,40	0,20	11,00	310,00	341,13	0,62	0,67	0,53	90,00	0,43	1,12	1,65	2,04
54	0,40	0,20	11,00	310,00	341,13	0,62	0,67	0,53	180,00	0,43	1,12	1,65	2,04
55	0,40	0,20	11,00	310,00	341,13	0,33	0,67	0,53	180,00	0,43	1,12	1,65	2,04
56	0,40	0,20	11,00	310,00	341,13	0,33	0,67	0,53	180,00	0,20	1,12	1,65	2,04
57	0,80	0,40	196,67	175,00	341,13	0,33	0,20	0,70	90,00	0,43	1,71	3,02	3,35
58	0,80	0,40	196,67	175,00	341,13	0,33	0,20	0,53	90,00	0,43	1,71	3,02	3,35
59	0,80	0,40	196,67	175,00	341,13	0,33	0,20	0,53	0,00	0,43	1,71	3,02	3,35
60	0,80	0,40	196,67	175,00	341,13	0,33	0,20	0,53	0,00	0,43	2,30	3,02	3,35
61	0,80	0,40	196,67	175,00	341,13	0,33	0,43	0,53	0,00	0,43	2,30	3,02	3,35
62	0,80	0,40	196,67	175,00	341,13	0,33	0,43	0,53	0,00	0,43	2,30	4,40	3,35
63	0,80	0,40	196,67	175,00	341,13	0,33	0,43	0,53	0,00	0,43	2,30	4,40	2,04
64	0,80	0,40	196,67	175,00	341,13	0,05	0,43	0,53	0,00	0,43	2,30	4,40	2,04
65	0,80	0,40	196,67	40,00	341,13	0,05	0,43	0,53	0,00	0,43	2,30	4,40	2,04
66	0,80	0,40	11,00	40,00	341,13	0,05	0,43	0,53	0,00	0,43	2,30	4,40	2,04
67	0,60	0,40	11,00	40,00	341,13	0,05	0,43	0,53	0,00	0,43	2,30	4,40	2,04
68	0,60	0,40	11,00	40,00	177,27	0,05	0,43	0,53	0,00	0,43	2,30	4,40	2,04
69	0,60	0,20	11,00	40,00	177,27	0,05	0,43	0,53	0,00	0,43	2,30	4,40	2,04
70	0,60	0,20	11,00	40,00	177,27	0,05	0,43	0,53	0,00	0,20	2,30	4,40	2,04
71	0,40	0,40	382,33	445,00	341,13	0,62	0,90	0,53	270,00	0,20	2,30	0,27	2,04
72	0,40	0,60	382,33	445,00	341,13	0,62	0,90	0,53	270,00	0,20	2,30	0,27	2,04

Quadro 26 – Propriedades termofísicas de cada modelo da amostra (continua)

Mod	acob	apar	CTcob	CTpar	CTpis	ecob	Fvent	FSvid	OS	tvenez	Ucob	Upar	Upis
73	0,60	0,60	382,33	445,00	341,13	0,62	0,90	0,53	270,00	0,20	2,30	0,27	2,04
74	0,60	0,60	382,33	445,00	341,13	0,62	0,90	0,53	270,00	0,20	2,30	1,65	2,04
75	0,60	0,60	382,33	445,00	177,27	0,62	0,90	0,53	270,00	0,20	2,30	1,65	2,04
76	0,60	0,60	382,33	445,00	177,27	0,62	0,90	0,36	270,00	0,20	2,30	1,65	2,04
77	0,60	0,60	382,33	445,00	177,27	0,62	0,90	0,36	270,00	0,43	2,30	1,65	2,04
78	0,60	0,60	382,33	310,00	177,27	0,62	0,90	0,36	270,00	0,43	2,30	1,65	2,04
79	0,60	0,60	196,67	310,00	177,27	0,62	0,90	0,36	270,00	0,43	2,30	1,65	2,04
80	0,60	0,60	196,67	310,00	177,27	0,33	0,90	0,36	270,00	0,43	2,30	1,65	2,04
81	0,60	0,60	196,67	310,00	177,27	0,33	0,90	0,36	270,00	0,43	1,71	1,65	2,04
82	0,60	0,60	196,67	310,00	177,27	0,33	0,90	0,36	270,00	0,43	1,71	1,65	0,72
83	0,60	0,60	196,67	310,00	177,27	0,33	0,90	0,36	180,00	0,43	1,71	1,65	0,72
84	0,60	0,60	196,67	310,00	177,27	0,33	0,67	0,36	180,00	0,43	1,71	1,65	0,72
85	0,40	0,40	196,67	310,00	177,27	0,90	0,43	0,53	90,00	0,43	1,12	0,27	4,67
86	0,40	0,20	196,67	310,00	177,27	0,90	0,43	0,53	90,00	0,43	1,12	0,27	4,67
87	0,40	0,20	196,67	310,00	341,13	0,90	0,43	0,53	90,00	0,43	1,12	0,27	4,67
88	0,40	0,20	11,00	310,00	341,13	0,90	0,43	0,53	90,00	0,43	1,12	0,27	4,67
89	0,40	0,20	11,00	310,00	341,13	0,62	0,43	0,53	90,00	0,43	1,12	0,27	4,67
90	0,60	0,20	11,00	310,00	341,13	0,62	0,43	0,53	90,00	0,43	1,12	0,27	4,67
91	0,60	0,20	11,00	310,00	341,13	0,62	0,43	0,53	90,00	0,43	1,12	1,65	4,67
92	0,60	0,20	11,00	310,00	341,13	0,62	0,43	0,53	0,00	0,43	1,12	1,65	4,67
93	0,60	0,20	11,00	310,00	341,13	0,62	0,43	0,53	0,00	0,43	1,12	1,65	3,35
94	0,60	0,20	11,00	310,00	341,13	0,62	0,43	0,53	0,00	0,43	1,71	1,65	3,35
95	0,60	0,20	11,00	310,00	341,13	0,62	0,20	0,53	0,00	0,43	1,71	1,65	3,35
96	0,60	0,20	11,00	310,00	341,13	0,62	0,20	0,53	0,00	0,20	1,71	1,65	3,35
97	0,60	0,20	11,00	445,00	341,13	0,62	0,20	0,53	0,00	0,20	1,71	1,65	3,35
98	0,60	0,20	11,00	445,00	341,13	0,62	0,20	0,36	0,00	0,20	1,71	1,65	3,35
99	0,40	0,60	382,33	175,00	505,00	0,62	0,43	0,53	180,00	0,43	1,12	0,27	2,04
100	0,20	0,60	382,33	175,00	505,00	0,62	0,43	0,53	180,00	0,43	1,12	0,27	2,04
101	0,20	0,60	568,00	175,00	505,00	0,62	0,43	0,53	180,00	0,43	1,12	0,27	2,04
102	0,20	0,60	568,00	175,00	505,00	0,62	0,43	0,53	180,00	0,67	1,12	0,27	2,04
103	0,20	0,60	568,00	175,00	505,00	0,62	0,43	0,53	180,00	0,67	1,71	0,27	2,04
104	0,20	0,80	568,00	175,00	505,00	0,62	0,43	0,53	180,00	0,67	1,71	0,27	2,04
105	0,20	0,80	568,00	175,00	505,00	0,62	0,43	0,53	180,00	0,67	1,71	1,65	2,04
106	0,20	0,80	568,00	175,00	505,00	0,62	0,43	0,36	180,00	0,67	1,71	1,65	2,04
107	0,20	0,80	568,00	175,00	505,00	0,62	0,43	0,36	270,00	0,67	1,71	1,65	2,04
108	0,20	0,80	568,00	310,00	505,00	0,62	0,43	0,36	270,00	0,67	1,71	1,65	2,04
109	0,20	0,80	568,00	310,00	505,00	0,90	0,43	0,36	270,00	0,67	1,71	1,65	2,04
110	0,20	0,80	568,00	310,00	505,00	0,90	0,20	0,36	270,00	0,67	1,71	1,65	2,04
111	0,20	0,80	568,00	310,00	505,00	0,90	0,20	0,36	270,00	0,67	1,71	1,65	3,35
112	0,20	0,80	568,00	310,00	341,13	0,90	0,20	0,36	270,00	0,67	1,71	1,65	3,35
113	0,60	0,60	382,33	310,00	13,40	0,33	0,43	0,53	90,00	0,90	1,71	4,40	2,04
114	0,60	0,80	382,33	310,00	13,40	0,33	0,43	0,53	90,00	0,90	1,71	4,40	2,04
115	0,60	0,80	382,33	310,00	13,40	0,33	0,43	0,53	180,00	0,90	1,71	4,40	2,04
116	0,60	0,80	382,33	310,00	177,27	0,33	0,43	0,53	180,00	0,90	1,71	4,40	2,04

Quadro 26 – Propriedades termofísicas de cada modelo da amostra (continua)

Mod	acob	apar	CTcob	CTpar	CTpis	ecob	Fvent	FSvid	OS	tvnez	Ucob	Upar	Upis
117	0,60	0,80	382,33	310,00	177,27	0,33	0,43	0,53	180,00	0,90	1,71	3,02	2,04
118	0,60	0,80	196,67	310,00	177,27	0,33	0,43	0,53	180,00	0,90	1,71	3,02	2,04
119	0,60	0,80	196,67	310,00	177,27	0,05	0,43	0,53	180,00	0,90	1,71	3,02	2,04
120	0,60	0,80	196,67	175,00	177,27	0,05	0,43	0,53	180,00	0,90	1,71	3,02	2,04
121	0,60	0,80	196,67	175,00	177,27	0,05	0,43	0,70	180,00	0,90	1,71	3,02	2,04
122	0,60	0,80	196,67	175,00	177,27	0,05	0,67	0,70	180,00	0,90	1,71	3,02	2,04
123	0,40	0,80	196,67	175,00	177,27	0,05	0,67	0,70	180,00	0,90	1,71	3,02	2,04
124	0,40	0,80	196,67	175,00	177,27	0,05	0,67	0,70	180,00	0,90	1,71	3,02	3,35
125	0,40	0,80	196,67	175,00	177,27	0,05	0,67	0,70	180,00	0,67	1,71	3,02	3,35
126	0,40	0,80	196,67	175,00	177,27	0,05	0,67	0,70	180,00	0,67	1,12	3,02	3,35
127	0,60	0,20	11,00	310,00	177,27	0,33	0,90	0,70	270,00	0,67	1,12	3,02	2,04
128	0,60	0,20	11,00	310,00	177,27	0,33	0,90	0,70	270,00	0,67	1,12	4,40	2,04
129	0,60	0,20	11,00	310,00	177,27	0,33	0,90	0,70	180,00	0,67	1,12	4,40	2,04
130	0,60	0,20	11,00	445,00	177,27	0,33	0,90	0,70	180,00	0,67	1,12	4,40	2,04
131	0,60	0,20	11,00	445,00	177,27	0,33	0,90	0,70	180,00	0,67	0,53	4,40	2,04
132	0,60	0,20	11,00	445,00	177,27	0,33	0,90	0,87	180,00	0,67	0,53	4,40	2,04
133	0,60	0,20	11,00	445,00	177,27	0,33	0,90	0,87	180,00	0,67	0,53	4,40	3,35
134	0,60	0,20	11,00	445,00	177,27	0,05	0,90	0,87	180,00	0,67	0,53	4,40	3,35
135	0,60	0,40	11,00	445,00	177,27	0,05	0,90	0,87	180,00	0,67	0,53	4,40	3,35
136	0,80	0,40	11,00	445,00	177,27	0,05	0,90	0,87	180,00	0,67	0,53	4,40	3,35
137	0,80	0,40	11,00	445,00	341,13	0,05	0,90	0,87	180,00	0,67	0,53	4,40	3,35
138	0,80	0,40	11,00	445,00	341,13	0,05	0,90	0,87	180,00	0,43	0,53	4,40	3,35
139	0,80	0,40	196,67	445,00	341,13	0,05	0,90	0,87	180,00	0,43	0,53	4,40	3,35
140	0,80	0,40	196,67	445,00	341,13	0,05	0,67	0,87	180,00	0,43	0,53	4,40	3,35
141	0,40	0,60	196,67	40,00	13,40	0,90	0,43	0,70	0,00	0,67	1,71	1,65	2,04
142	0,20	0,60	196,67	40,00	13,40	0,90	0,43	0,70	0,00	0,67	1,71	1,65	2,04
143	0,20	0,60	196,67	40,00	13,40	0,90	0,43	0,70	90,00	0,67	1,71	1,65	2,04
144	0,20	0,60	196,67	40,00	13,40	0,90	0,43	0,87	90,00	0,67	1,71	1,65	2,04
145	0,20	0,80	196,67	40,00	13,40	0,90	0,43	0,87	90,00	0,67	1,71	1,65	2,04
146	0,20	0,80	196,67	40,00	13,40	0,90	0,43	0,87	90,00	0,67	1,71	3,02	2,04
147	0,20	0,80	196,67	40,00	177,27	0,90	0,43	0,87	90,00	0,67	1,71	3,02	2,04
148	0,20	0,80	196,67	40,00	177,27	0,90	0,43	0,87	90,00	0,67	1,71	3,02	3,35
149	0,20	0,80	196,67	40,00	177,27	0,90	0,43	0,87	90,00	0,90	1,71	3,02	3,35
150	0,20	0,80	196,67	175,00	177,27	0,90	0,43	0,87	90,00	0,90	1,71	3,02	3,35
151	0,20	0,80	196,67	175,00	177,27	0,90	0,67	0,87	90,00	0,90	1,71	3,02	3,35
152	0,20	0,80	196,67	175,00	177,27	0,62	0,67	0,87	90,00	0,90	1,71	3,02	3,35
153	0,20	0,80	196,67	175,00	177,27	0,62	0,67	0,87	90,00	0,90	2,30	3,02	3,35
154	0,20	0,80	11,00	175,00	177,27	0,62	0,67	0,87	90,00	0,90	2,30	3,02	3,35
155	0,60	0,80	11,00	175,00	341,13	0,33	0,20	0,70	180,00	0,90	0,53	4,40	4,67
156	0,60	0,80	11,00	310,00	341,13	0,33	0,20	0,70	180,00	0,90	0,53	4,40	4,67
157	0,60	0,80	11,00	310,00	341,13	0,33	0,20	0,70	180,00	0,90	0,53	3,02	4,67
158	0,60	0,80	11,00	310,00	341,13	0,33	0,20	0,70	180,00	0,90	1,12	3,02	4,67
159	0,60	0,80	11,00	310,00	341,13	0,33	0,20	0,70	270,00	0,90	1,12	3,02	4,67
160	0,60	0,80	196,67	310,00	341,13	0,33	0,20	0,70	270,00	0,90	1,12	3,02	4,67

Quadro 26 – Propriedades termofísicas de cada modelo da amostra (conclusão)

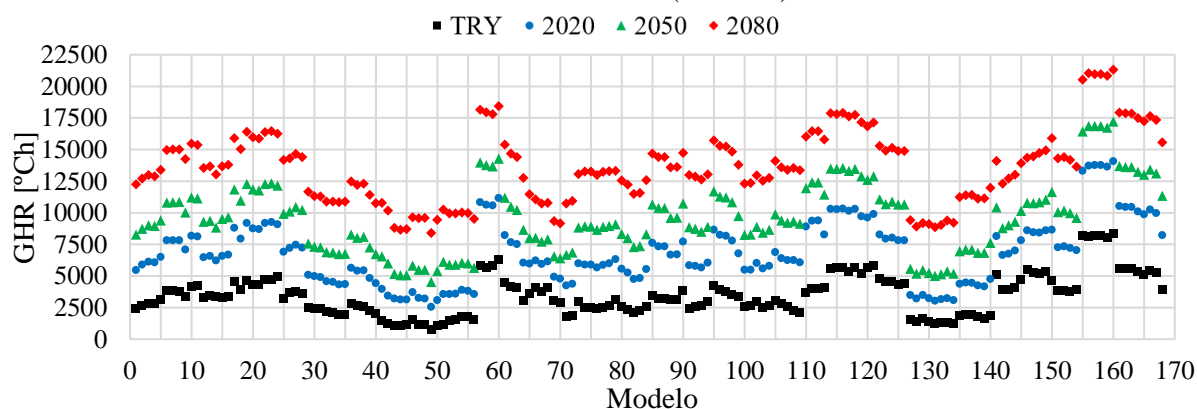
Mod	acob	apar	CTcob	CTpar	CTpis	ecob	Fvent	FSvid	OS	tvenez	Ucob	Upar	Upis
161	0,60	0,80	196,67	310,00	341,13	0,33	0,43	0,70	270,00	0,90	1,12	3,02	4,67
162	0,60	0,80	196,67	310,00	341,13	0,33	0,43	0,70	270,00	0,90	1,12	3,02	3,35
163	0,60	0,80	196,67	310,00	177,27	0,33	0,43	0,70	270,00	0,90	1,12	3,02	3,35
164	0,60	0,80	196,67	310,00	177,27	0,05	0,43	0,70	270,00	0,90	1,12	3,02	3,35
165	0,60	0,80	196,67	310,00	177,27	0,05	0,43	0,70	270,00	0,67	1,12	3,02	3,35
166	0,80	0,80	196,67	310,00	177,27	0,05	0,43	0,70	270,00	0,67	1,12	3,02	3,35
167	0,80	0,80	196,67	310,00	177,27	0,05	0,43	0,53	270,00	0,67	1,12	3,02	3,35
168	0,80	0,60	196,67	310,00	177,27	0,05	0,43	0,53	270,00	0,67	1,12	3,02	3,35

Fonte: o autor

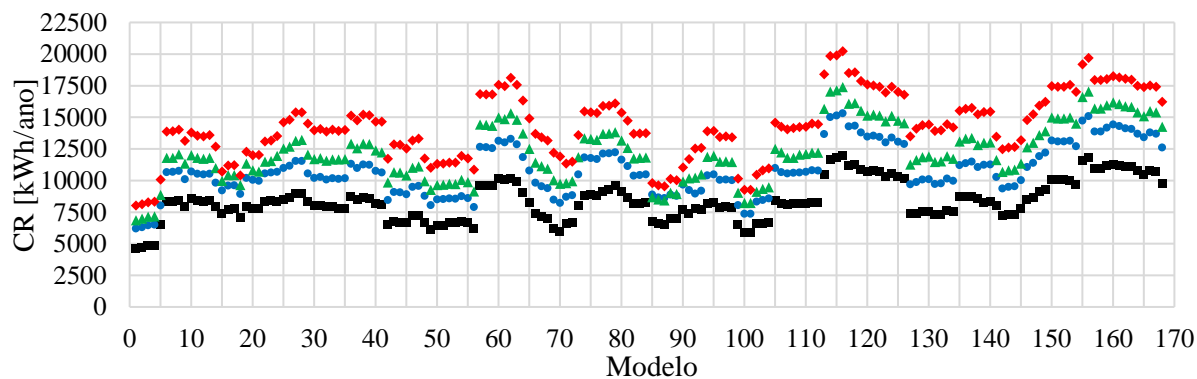
D.2 INDICADORES DE DESEMPENHO PARA O CLIMA DE BELÉM

Na Figura 78, ilustram-se os indicadores de desempenho de cada modelo da amostra, conforme as simulações para os períodos climáticos de Belém.

Figura 78 – Indicadores de desempenho de cada modelo da amostra, para os diferentes períodos climáticos de Belém (continua)

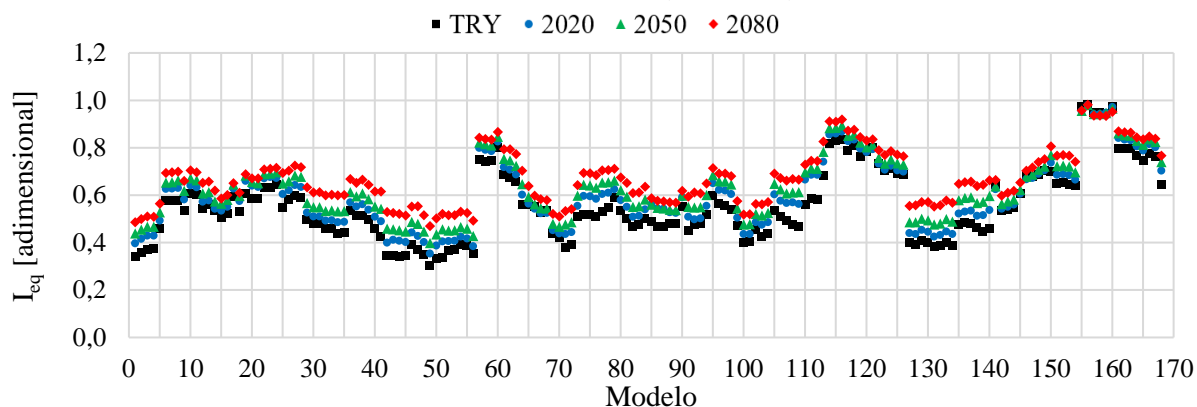


(a) Graus-hora para resfriamento



(b) Consumo de energia para resfriamento

Figura 78 – Indicadores de desempenho de cada modelo da amostra, para os diferentes períodos climáticos de Belém (conclusão)



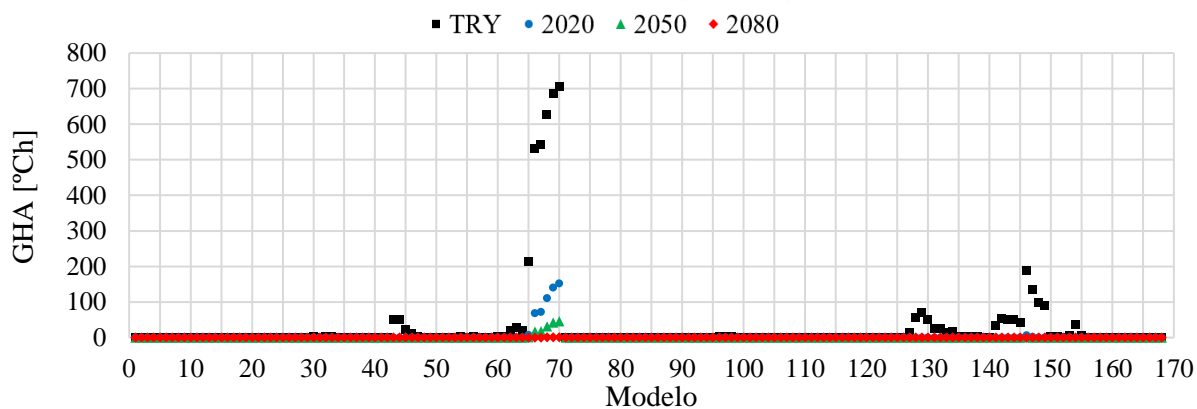
(c) Indicador equivalente de desempenho

Fonte: o autor

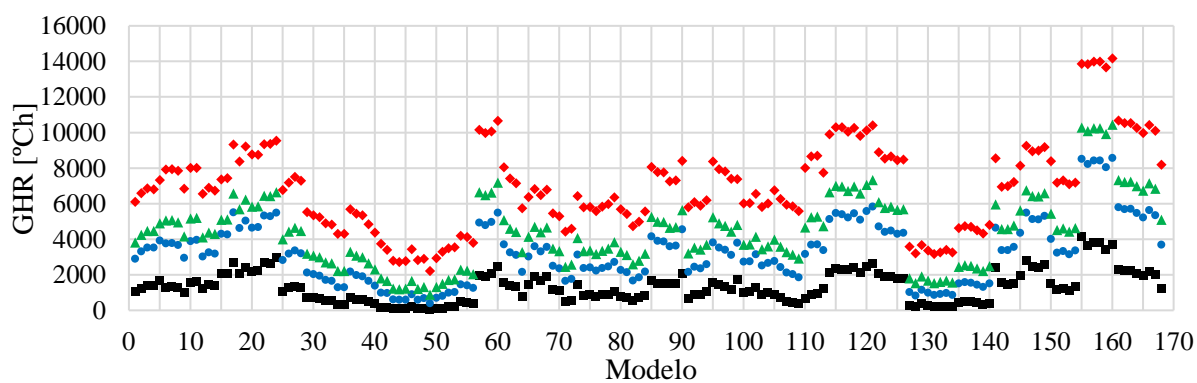
D.3 INDICADORES DE DESEMPENHO PARA O CLIMA DE BRASÍLIA

Na Figura 79, ilustram-se os indicadores de desempenho de cada modelo da amostra, conforme as simulações para os períodos climáticos de Brasília.

Figura 79 – Indicadores de desempenho de cada modelo da amostra, para os diferentes períodos climáticos de Brasília (continua)

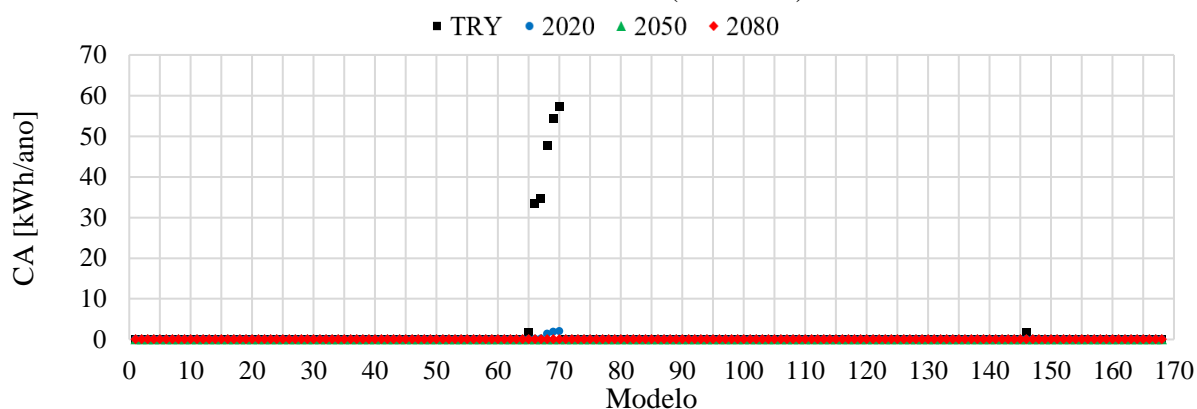


(a) Graus-hora para aquecimento

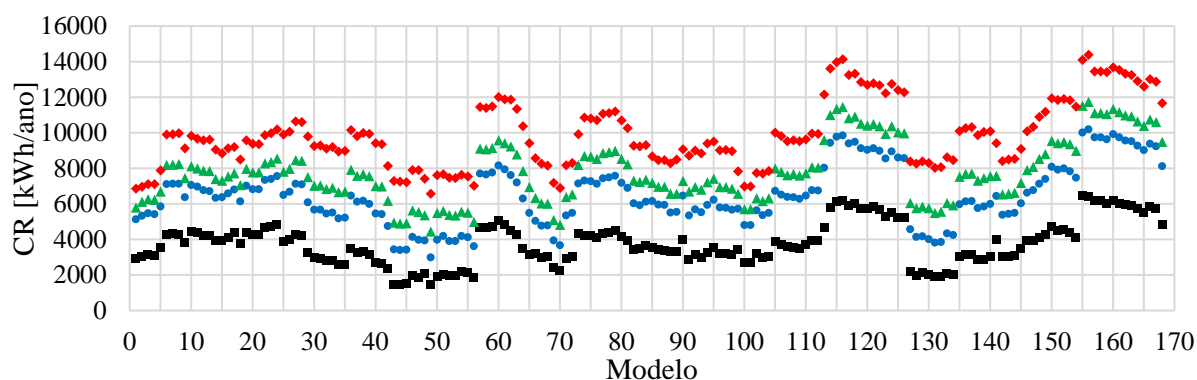


(b) Graus-hora para resfriamento

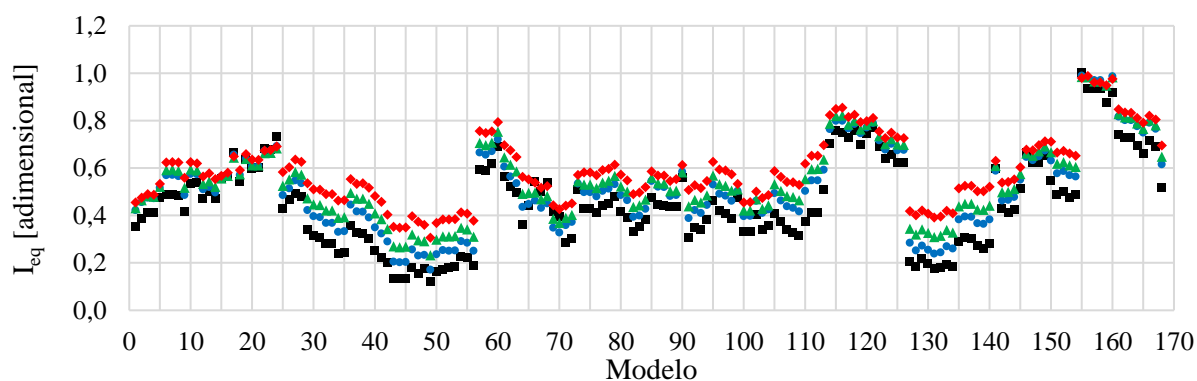
Figura 79 – Indicadores de desempenho de cada modelo da amostra, para os diferentes períodos climáticos de Brasília (conclusão)



(c) Consumo de energia para aquecimento



(d) Consumo de energia para resfriamento



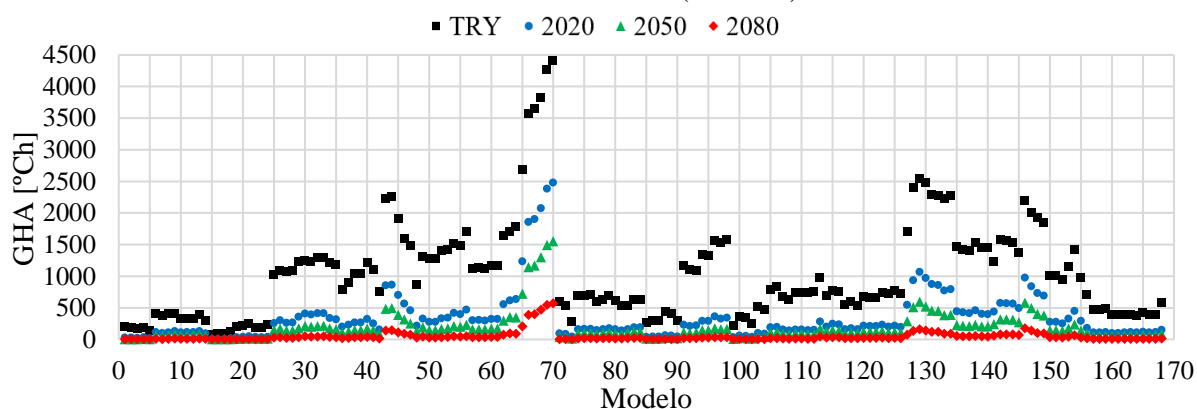
(e) Indicador equivalente de desempenho

Fonte: o autor

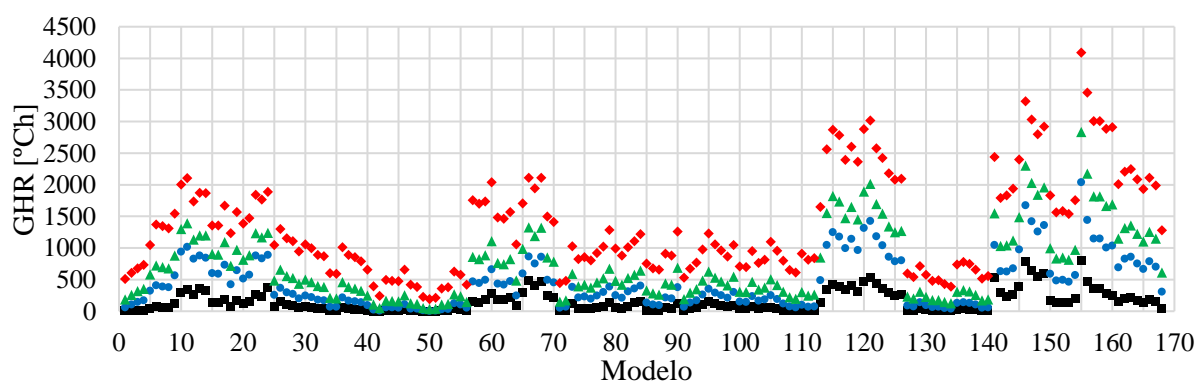
D.4 INDICADORES DE DESEMPENHO PARA O CLIMA DE CURITIBA

Na Figura 80, ilustram-se os indicadores de desempenho de cada modelo da amostra, conforme as simulações para os períodos climáticos de Curitiba.

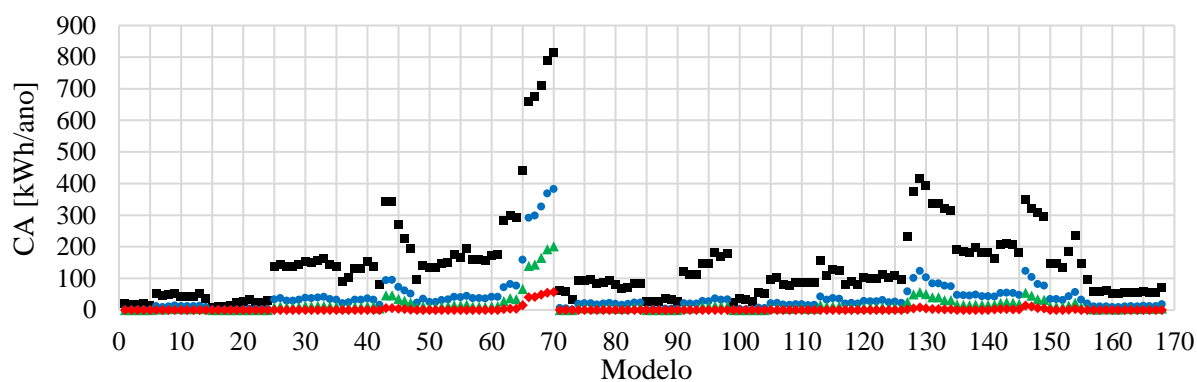
Figura 80 – Indicadores de desempenho de cada modelo da amostra, para os diferentes períodos climáticos de Curitiba (continua)



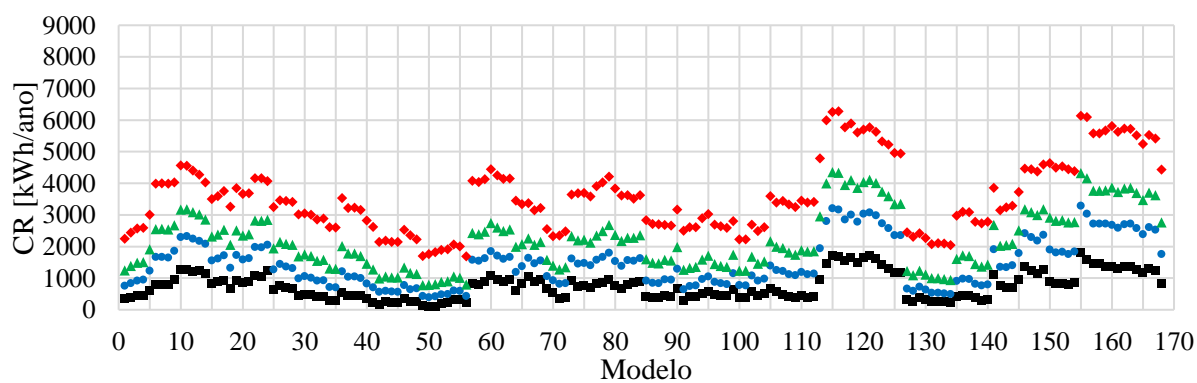
(a) Graus-hora para aquecimento



(b) Graus-hora para resfriamento

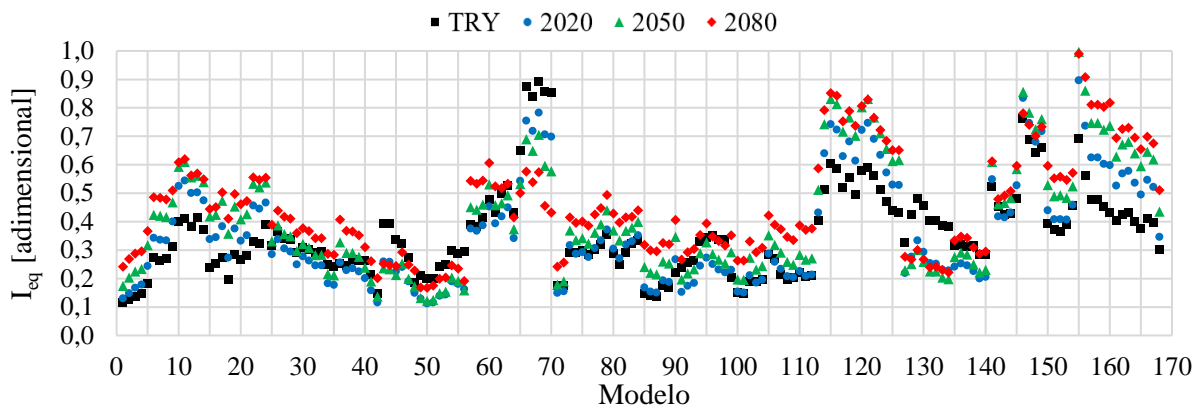


(c) Consumo de energia para aquecimento



(d) Consumo de energia para resfriamento

Figura 80 – Indicadores de desempenho de cada modelo da amostra, para os diferentes períodos climáticos de Curitiba (conclusão)



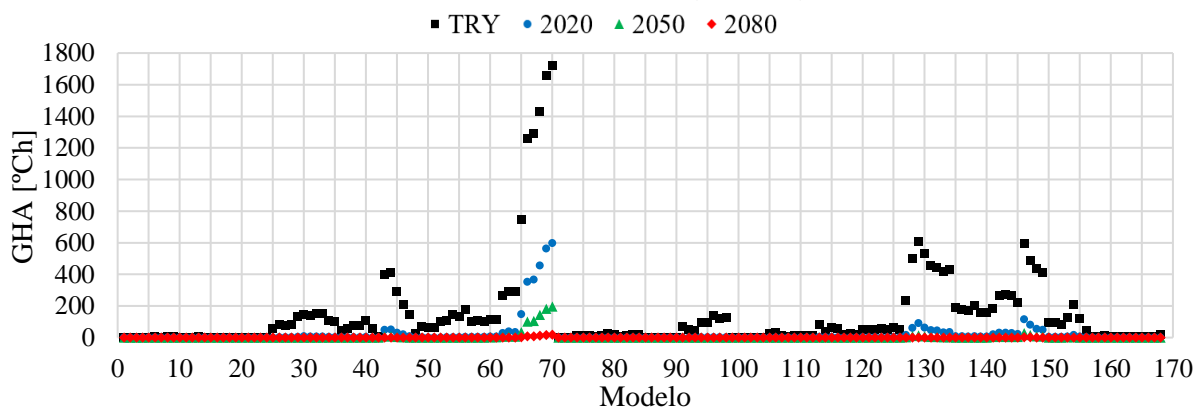
(e) Indicador equivalente de desempenho

Fonte: o autor

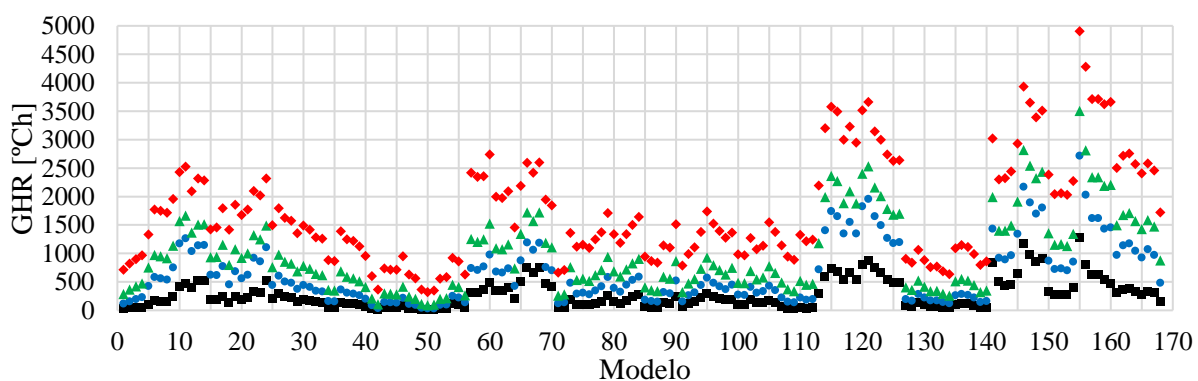
D.5 INDICADORES DE DESEMPENHO PARA O CLIMA DE SÃO PAULO

Na Figura 81, ilustram-se os indicadores de desempenho de cada modelo da amostra, conforme as simulações para os períodos climáticos de São Paulo.

Figura 81 – Indicadores de desempenho de cada modelo da amostra, para os diferentes períodos climáticos de São Paulo (continua)

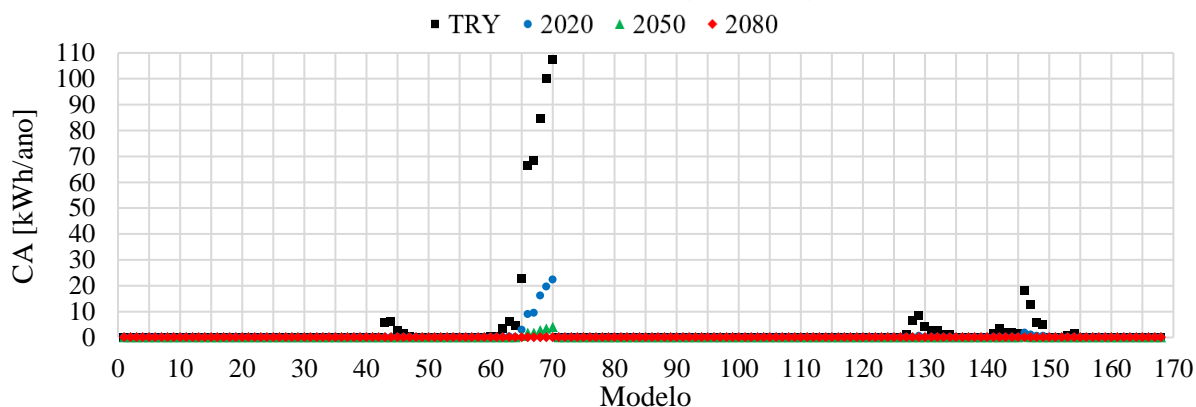


(a) Graus-hora para aquecimento

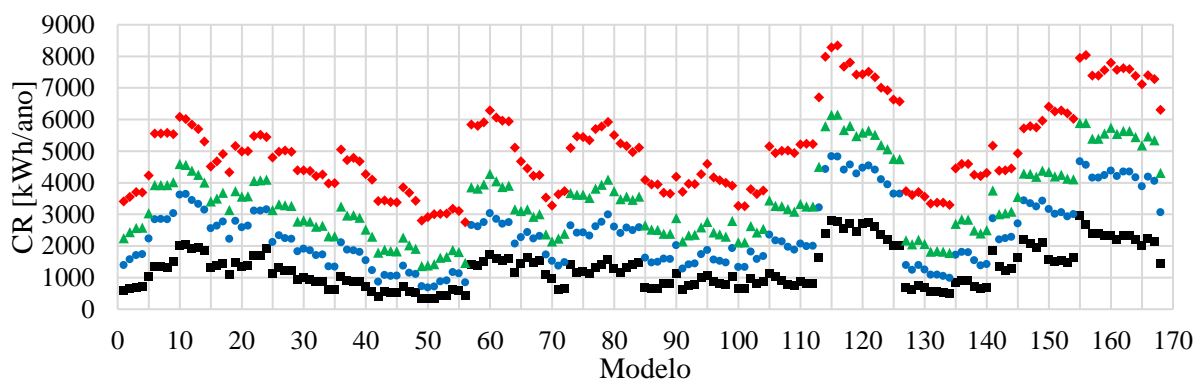


(b) Graus-hora para resfriamento

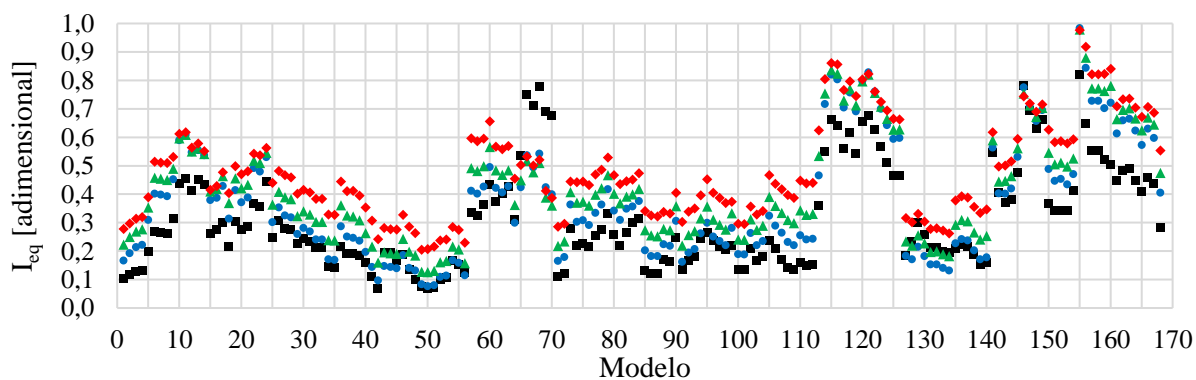
Figura 81 – Indicadores de desempenho de cada modelo da amostra, para os diferentes períodos climáticos de São Paulo (conclusão)



(c) Consumo de energia para aquecimento



(d) Consumo de energia para resfriamento



(e) Indicador equivalente de desempenho

Fonte: o autor

ANEXO A – Algoritmos da Análise de Sensibilidade De Morris

Neste anexo, são apresentados os códigos fonte dos *scripts* (algoritmos) ‘*morris.create*’ e ‘*morris.analyse*’, em linguagem R – desenvolvidos por Silva (2016) –, utilizados para as análises de sensibilidade global conduzidas nesta dissertação. Também são apresentadas as instruções básicas de utilização, conforme o autor dos algoritmos.

A.1 CRIAÇÃO DA AMOSTRA

Para que a criação da amostra seja realizada, primeiro é necessário definir as variáveis independentes⁷ em um arquivo denominado “*morris-input.csv*”. O arquivo deve conter quatro colunas com as seguintes informações:

- ‘factor’ é o nome dos fatores (cada variável independente);
- ‘units’ é a unidade de medida de cada variável independente;
- ‘lower’ é o valor do limite inferior de cada variável independente;
- ‘upper’ é o valor do limite superior de cada variável independente.

Depois disso, a amostra pode ser criada, de acordo com o método dos efeitos elementares de Morris, por meio do algoritmo ‘*morris.create*’. Os argumentos do algoritmo são:

- ‘pasta’ é o caminho para a pasta que contém o arquivo de entrada “*morris-input.csv*”;
- ‘input.r’ é o número de repetições r (o valor padrão é 10);
- ‘input.l’ é o número de níveis l (o valor padrão é 4).

O algoritmo ‘*morris.create*’ usa a função ‘*morris*’ do pacote ‘*sensitivity*’ (R Package ‘*sensitivity*’). A amostra criada tem tamanho $n=r(k+1)$, sendo n o número de observações, r o número de repetições e k o número de variáveis independentes. Este procedimento gera dois arquivos na ‘pasta’ dada como argumento:

⁷ Os valores dos níveis de cada variável devem ser normalizados, de forma que os níveis limites correspondam aos valores do intervalo $\{0 - 1\}$.

- ‘morris-dput.R’ é o arquivo que contém a amostra gerada em extensão R para ser lida e integrada novamente ao console do R na ocasião do uso do algoritmo ‘*morris.analyse*’, na etapa seguinte;
- ‘morris-sample.csv’ é o arquivo que contém a amostra das observações de tamanho n , para ser utilizada na especificação das variáveis de entrada para o programa *EnergyPlus*.

No Quadro 27, apresenta-se o algoritmo ‘*morris.create*’, em linguagem R.

Quadro 27 – Algoritmo ‘*morris.create*’, em linguagem R

1.	morris.create=function (pasta,input.r=10,input.l=4){
2.	library(sensitivity)
3.	
4.	factors.path=c(paste(pasta,"/morris-input.csv",sep=""))
5.	factors.classes=c("character","character","numeric","numeric")
6.	factors=read.table(file=factors.path,header=TRUE,sep="," ,
7.	colClasses=factors.classes)
8.	
9.	factors.names=factors[[1]]
10.	factors.lower=factors[[3]]
11.	factors.upper=factors[[4]]
12.	
13.	morris.funcao=morris(model=NULL,factors=factors.names,r=input.r,
14.	design=list(type="oat",levels=input.l,grid.jump=1),binf=factors.lower,bsup=factors.upper,
15.	scale=FALSE)
16.	
17.	morris.dput=dput(morris.funcao,file=c(paste(pasta,
18.	"/morris-dput.R",sep="")),control="all")
19.	
20.	morris.amostra=morris.funcao[[8]]
21.	morris.amostra.path=c(paste(pasta,"/morris-sample.csv",sep=""))
22.	morris.amostra.csv=write.table(x=morris.amostra,file=morris.amostra.path,sep="," ,
23.	row.names=FALSE)
24.	
25.	return(c("Arquivos de Morris criados com sucesso."))
26.	}

Fonte: Silva (2016)

A.2 CÁLCULO DOS ÍNDICES DE SENSIBILIDADE DE MORRIS

Depois de realizadas as simulações (a partir da amostra criada na etapa anterior) e calculadas as variáveis dependentes (a partir das ‘saídas’ das simulações), deve-se criar um arquivo denominado “morris-results.csv” com os resultados. Nas colunas da tabela devem estar

as variáveis dependentes, devidamente nomeadas, com a mesma quantidade de linhas da amostra “morris.sample.csv”.

O algoritmo ‘*morris.analyse*’ é utilizado para calcular os índices de sensibilidade com o método de Morris. O argumento do algoritmo é:

‘pasta’ é o caminho para a pasta que contém o arquivo de resultados “morris-results.csv” e os arquivos “morris-dput.R” e “morris-input.csv”; corresponde à mesma pasta da etapa de criação da amostra.

Esse procedimento, que usa a função ‘*morris*’ por meio das funções ‘*dget*’ e ‘*tell*’ para calcular os índices de sensibilidade μ , μ^* e σ , gera quatro arquivos:

‘morris-output-ALL.csv’ é o arquivo que contém todos os índices μ , μ^* e σ de cada variável independente em cada variável dependente;

‘morris-output-MU.csv’ é o arquivo que contém todos os índices μ de cada variável independente em cada variável dependente;

‘morris-output-MUSTAR.csv’ é o arquivo que contém todos os índices μ^* de cada variável independente em cada variável dependente;

‘morris-output-SIGMA.csv’ é o arquivo que contém todos os índices σ de cada variável independente em cada variável dependente.

No Quadro 28, apresenta-se o algoritmo ‘*morris.analyse*’, em linguagem R.

Quadro 28 – Algoritmo ‘*morris.analyse*’, em linguagem R (continua)

1.	morris.analyse=function (pasta){
2.	library(sensitivity)
3.	
4.	factors.path=c(paste(pasta,"/morris-input.csv",sep=""))
5.	factors.classes=c("character","character","numeric","numeric")
6.	factors=read.table(file=factors.path,header=TRUE,sep="," ,
7.	colClasses=factors.classes)
8.	
9.	factors.names=factors[[1]]
10.	factors.lower=factors[[3]]
11.	factors.upper=factors[[4]]
12.	
13.	dget.folder=c(paste(pasta,"/morris-dput.R",sep=""))
14.	morris.funcao=dget(dget.folder)

Quadro 28 – Algoritmo ‘*morris.analyse*’, em linguagem R (continua)

15.	
16.	results.path=c(paste(pasta,"/morris-results.csv",sep=""))
17.	results=read.table(file=results.path,header=TRUE,sep=" ",colClasses="numeric")
18.	results.ncol=ncol(results)
19.	
20.	output.mu=NULL
21.	output.mustar=NULL
22.	output.sigma=NULL
23.	output.all=NULL
24.	output.mu.names=NULL
25.	output.mustar.names=NULL
26.	output.sigma.names=NULL
27.	output.all.names=NULL
28.	
29.	for(i in 1:results.ncol){
30.	morris.results=tell(x=morris.funcao,y=results[[i]])
31.	variable.name=names(results[i])
32.	
33.	morris.mu=apply(morris.results\$e,2,mean)
34.	morris.mustar=apply(morris.results\$e,2,
35.	function(morris.results) mean(abs(morris.results)))
36.	morris.sigma=apply(morris.results\$e,2,sd)
37.	
38.	n1=c(paste(variable.name,c("_MU"),sep=""))
39.	n2=c(paste(variable.name,c("_MU*"),sep=""))
40.	n3=c(paste(variable.name,c("_SIGMA"),sep=""))
41.	
42.	output.mu=cbind(output.mu,morris.mu,deparse.level=0)
43.	output.mustar=cbind(output.mustar,morris.mustar,deparse.level=0)
44.	output.sigma=cbind(output.sigma,morris.sigma,deparse.level=0)
45.	output.all=cbind(output.all,morris.mu,morris.mustar,morris.sigma,
46.	deparse.level=0)
47.	output.mu.names=rbind(output.mu.names,n1,deparse.level=0)
48.	
49.	output.mustar.names=rbind(output.mustar.names,n2,deparse.level=0)
50.	output.sigma.names=rbind(output.sigma.names,n3,deparse.level=0)
51.	output.all.names=rbind(output.all.names,n1,n2,n3,deparse.level=0)
52.	}
53.	
54.	vector.n1=as.vector(as.data.frame.matrix(output.mu.names)[[1]])
55.	vector.n2=as.vector(as.data.frame.matrix(output.mustar.names)[[1]])
56.	vector.n3=as.vector(as.data.frame.matrix(output.sigma.names)[[1]])
57.	vector.n4=as.vector(as.data.frame.matrix(output.all.names)[[1]])
58.	
59.	a1=as.data.frame.matrix(output.mu)
60.	a2=as.data.frame.matrix(output.mustar)
61.	a3=as.data.frame.matrix(output.sigma)
62.	a4=as.data.frame.matrix(output.all)
63.	
64.	names(a1)=vector.n1
65.	names(a2)=vector.n2
66.	names(a3)=vector.n3
67.	names(a4)=vector.n4

Quadro 28 – Algoritmo ‘*morris.analyse*’, em linguagem R (conclusão)

```
68.
69.     output.name1=c(paste(pasta,"/morris-output-MU.csv",sep=""))
70.     output.name2=c(paste(pasta,"/morris-output-MUSTAR.csv",sep=""))
71.     output.name3=c(paste(pasta,"/morris-output-SIGMA.csv",sep=""))
72.     output.name4=c(paste(pasta,"/morris-output-ALL.csv",sep=""))
73.
74.     o1=write.table(x=a1,file=output.name1,sep=" ",
75.                  row.names=TRUE,col.names=NA)
76.     o2=write.table(x=a2,file=output.name2,sep=" ",
77.                  row.names=TRUE,col.names=NA)
78.     o3=write.table(x=a3,file=output.name3,sep=" ",
79.                  row.names=TRUE,col.names=NA)
80.     o4=write.table(x=a4,file=output.name4,sep=" ",
81.                  row.names=TRUE,col.names=NA)
82.
83.     return(c("Análise de sensibilidade de Morris realizada com sucesso."))
84. }
```

Fonte: Silva (2016)