

Análise de sensibilidade de variáveis termofísicas de habitações brasileiras sob a influência das mudanças climáticas

Sensitivity analysis of design variables of Brazilian dwellings under the effects of climate change

Gustavo Henrique Nunes 
Thalita Gorban Ferreira Giglio 

Resumo

Este estudo teve como objetivo determinar índices de sensibilidade global de variáveis termofísicas no desempenho térmico de habitações em Belém, Brasília, São Paulo e Curitiba, considerando os efeitos das mudanças climáticas. Para tanto, o desempenho térmico de um dormitório foi analisado em diferentes períodos climáticos, a partir de progressões obtidas por meio da ferramenta CCWorldWeatherGen, para os intervalos dos anos 2020 (representa 2011 a 2040), 2050 (representa 2041 a 2070) e 2080 (representa 2071 a 2100), de acordo com o cenário de emissões A2 do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas. Os índices de sensibilidade de Morris indicaram que as mudanças climáticas, além de influenciarem no desempenho térmico do ambiente construído, influenciam na importância das variáveis termofísicas, principalmente em cidades com climas mais amenos. Em Belém, o fator de ventilação foi mais importante; em Brasília, destacaram-se a transmitância térmica das paredes e o fator de ventilação; e em São Paulo e Curitiba, destacaram-se a absorptância solar da cobertura, a orientação solar e o fator de ventilação. Diante de variações determinantes nos índices de sensibilidade ao longo dos anos, conclui-se que o projeto de edificações deve, necessariamente, considerar projeções de mudanças climáticas, para que o ambiente construído possua resiliência em seu desempenho.

Palavras-chave: Aquecimento global. Conforto térmico adaptativo. Desempenho térmico de edificações. Método de Morris. Simulação computacional.

Abstract

This paper aims to determine global sensitivity indices of design variables in the thermal performance of low-income housing in Belém, Brasília, São Paulo, and Curitiba, in view of the effects of climate change. For this purpose, the thermal performance of a bedroom was simulated in different environmental conditions, from progressions of weather files obtained through the CCWorldWeatherGen tool, for the periods of the years 2020 (2011 to 2040), 2050 (2041 to 2070) and 2080 (2071 to 2100), according to the A2 emissions scenario of the Intergovernmental Panel on Climate Change. The Morris indices showed that climate change impacts not only the thermal performance of the built environment, but also the importance of design variables, especially in cities in milder climates. In Belém, the ventilation factor was most important; in Brasília, the thermal transmittance of the walls and the ventilation factor stood out; and in São Paulo and Curitiba, the solar absorptance of the roof, solar orientation, and the ventilation factor stood out. Due to decisive variations in the sensitivity indices over the years, this study concluded that the building designs must necessarily consider projections of climate change to ensure performance resilience of the built environment.

¹Gustavo Henrique Nunes

¹Universidade Estadual de Londrina
Londrina - PR - Brasil

²Thalita Gorban Ferreira Giglio

²Universidade Estadual de Londrina
Londrina - PR - Brasil

Recebido em 14/12/21
Aceito em 14/02/22

Keywords: Building simulation. Global warming. Morris method. Thermal performance of buildings.

Introdução

A preocupação com os efeitos das mudanças climáticas vem conduzindo debates mundiais sobre o tema, evidenciado, principalmente, pela elevação da temperatura global. De acordo com a NASA (NATIONAL..., 2021), 2020 foi o ano mais quente da história, com anomalia de temperatura 1,02 °C maior do que a média do século XX, representada pelo período de 1951 a 1980. Nesse âmbito, tendo em vista os impactos atuais e as tendências esperadas, o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) estima que a temperatura média do ar, no período de 2081 a 2100, seja até 4,8 °C mais alta do que em 1986–2005 (INTERGOVERNMENTAL..., 2014).

A construção civil é responsável por muitos impactos ambientais, que contribuem para as mudanças climáticas. De modo análogo, considerando-se que a resposta térmica e energética das edificações está estreitamente relacionada ao clima em que se inserem (CASAGRANDE, 2013), e sabendo-se que as edificações possuem uma vida útil longa (ABNT, 2013; MCKINSEY & COMPANY, 2009), Williams *et al.* (2012) apontam que as mudanças climáticas influenciam no seu desempenho, assim como no conforto dos usuários e no consumo de energia. Esses fatores alertam para a necessidade de se encontrar estratégias de adaptação às condições climáticas futuras, proporcionando resiliência às edificações.

Os projetos de edificações não consideram o desempenho das construções em condições ambientais futuras. Além disso, especialmente no Brasil, ainda é comum se utilizar arquivos climáticos de 1961 a 1990 para análises de desempenho térmico e energético do ambiente construído. Isso faz com que os resultados e as soluções propostas para eficiência energética, por exemplo, fiquem comprometidos, devido ao fato de as condições climáticas simuladas não condizerem com o cenário atual e, tampouco, com as perspectivas de mudanças no clima. Existe, portanto, o interesse e a necessidade da concepção de edificações que contemplem soluções adequadas às condições climáticas futuras (INVIDIATA; GHISI, 2016; ROBERT; KUMMERT, 2012).

Jentsch, James e Bahaj (2012) desenvolveram uma ferramenta para adaptar arquivos climáticos do EnergyPlus, aplicando o método *morphing* proposto por Belcher, Hacker e Powell (2005). A ferramenta Climate Change World Weather File Generator (CCWorldWeatherGen) (UNIVERSITY..., 2020) foi elaborada para a progressão de arquivos climáticos futuros, referentes aos períodos 2020 (compreende o intervalo de anos entre 2011 e 2040), 2050 (compreende o intervalo de anos entre 2041 e 2070) e 2080 (compreende o intervalo de anos entre 2071 e 2100), para qualquer parte do mundo (JENTSCH *et al.*, 2013). O CCWorldWeatherGen gera os arquivos climáticos futuros a partir do modelo HadCM3, de acordo com o cenário A2 do IPCC (INTERGOVERNMENTAL..., 2007). Esse cenário é o que melhor representa a tendência atual, compatível com os níveis de emissões elevados (TRIANA; LAMBERTS; SASSI, 2018). Nesse sentido, a técnica de progressão climática descrita por Jentsch *et al.* (2013) é caracterizada como uma forma prática e eficaz para avaliar mudanças climáticas no ambiente construído e vem sendo aplicada em pesquisas de comportamento de edificações em anos futuros.

Alguns trabalhos recentes (ALVES; DUARTE; GONÇALVES, 2016; INVIDIATA; GHISI, 2016; NUNES; GIGLIO, 2020; TRIANA; LAMBERTS; SASSI, 2018) vêm abordando as mudanças climáticas e os seus efeitos no desempenho de edificações no Brasil. Os resultados de Alves, Duarte e Gonçalves (2016) comprovam uma redução progressiva nas condições de conforto ao longo dos anos, indicando que a combinação das mudanças climáticas e ondas de calor podem tornar as condições térmicas de edificações inóspitas para o conforto humano. Invidiata e Ghisi (2016) analisam os efeitos das mudanças climáticas, observando seus impactos no desempenho térmico e energético de habitações, e demonstram que, com estratégias passivas, é possível reduzir até 50% do consumo energético com condicionamento ambiental, diante de cenários climáticos futuros. Por sua vez, os resultados de Nunes e Giglio (2020) mostram que, conforme o sistema construtivo da edificação, o aquecimento global fará com que indicadores de graus-hora para aquecimento diminuam drasticamente, e indicadores de graus-hora para resfriamento aumentem. Triana, Lamberts e Sassi (2018) também evidenciam aumento nos indicadores relacionados à necessidade de refrigeração e decréscimo nos indicadores relacionados ao aquecimento do ambiente construído. Adicionalmente, Triana, Lamberts e Sassi (2018) mostram que estratégias de desempenho envolvendo o envelope (paredes com baixa transmitância e média/alta capacidade térmica, cobertura com isolamento térmico e janelas adequadas) resultam em melhor resposta termoenergética nos cenários climáticos futuros avaliados.

Embora alguns estudos no exterior já busquem avaliações mais aprofundadas sobre mudanças climáticas e edificações, baseadas em análises de sensibilidade de variáveis projetuais, por exemplo, no Brasil ainda há carência de investigações com esse nível de aplicação. A análise de sensibilidade em simulações computacionais caracteriza uma técnica valiosa para soluções de desempenho de edificações, que consiste

em investigar sistematicamente uma saída de uma simulação a partir da incerteza de valores das variáveis do modelo, com vistas a determinar variáveis mais importantes (quais são suas contribuições para a variável de saída) no modelo (KLEIJNEN, 1997; SALTELLI *et al.*, 2008; SILVA, 2016; SIMLAB, 2008; TIAN, 2013). Assim, análises de sensibilidade ajudam a entender a propagação de incertezas e permitem identificar a influência das variáveis no desempenho térmico, de modo que projetistas possam planejar estratégias construtivas para a vida útil de habitações.

Por meio da bibliografia, observa-se que é consenso o impacto do aquecimento global em edificações, fazendo com que o ambiente construído passe a apresentar situações de calor mais extremas ao longo dos anos. Além disso, percebe-se que alguns estudos já se preocupam em propor soluções de projeto que possibilitem melhorar a satisfação térmica do usuário de edificações brasileiras, visando menor uso de climatização mecânica. Devido à grande incerteza que envolve as previsões climáticas e a evolução tecnológica de equipamentos, focar em soluções passivas se mostra a tendência de pesquisa mais plausível e eficiente. Nesse sentido, esta pesquisa teve como objetivo analisar os índices de sensibilidade global de variáveis termofísicas de desempenho de habitações em Belém, Brasília, São Paulo e Curitiba, considerando os efeitos das mudanças climáticas no desempenho térmico de uma habitação de interesse social. Assim, o trabalho contribui para o avanço das discussões e do conhecimento científico sobre o comportamento térmico de edificações e os impactos das mudanças climáticas.

Método

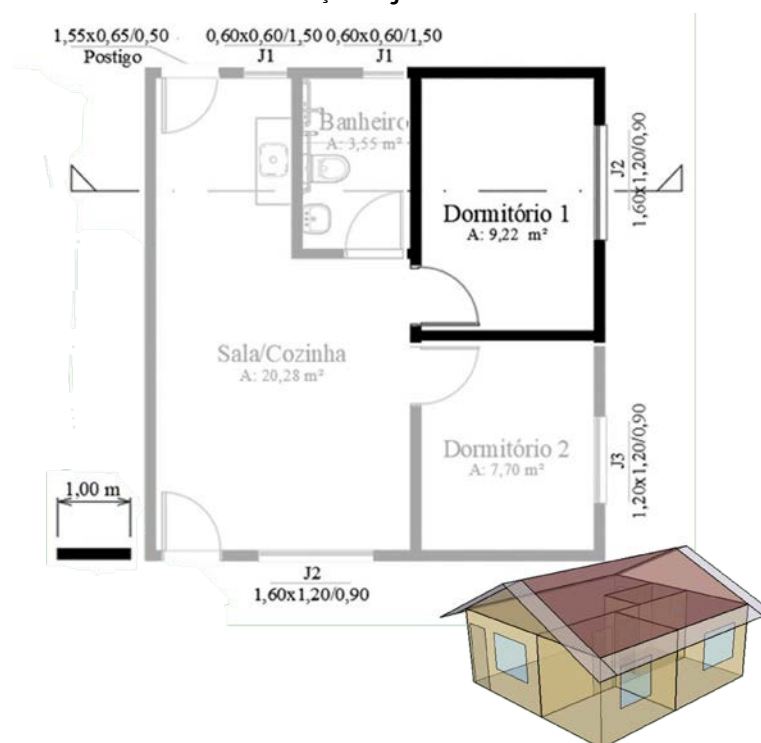
Para atender ao objetivo da pesquisa, por meio de simulações computacionais paramétricas e análises de sensibilidade global com os efeitos elementares de Morris, observou-se a influência de variáveis termofísicas no desempenho térmico do ambiente construído, frente a períodos climáticos futuros.

Nesta seção, são apresentadas as características do objeto de estudo, as condições climáticas consideradas, e os procedimentos seguidos para a determinação da sensibilidade de variáveis termofísicas da edificação.

Objeto de estudo

O objeto de estudo foi uma residência unifamiliar com tipologia baseada nos padrões de habitações de interesse social, conforme ilustrado na Figura 1. A moradia é composta por uma sala integrada com cozinha, dois dormitórios e um banheiro, com área total de 40,75 m² e pé-direito de 2,55 m. As análises de sensibilidade foram realizadas a partir da resposta térmica do dormitório 1, destacado na Figura 1.

Figura 1 - Planta baixa e modelo 3D da habitação objeto de estudo



Condições climáticas analisadas

A previsão é de que haja aumento de temperatura com níveis de intensidade diferentes na extensão do território brasileiro, assim como se percebe historicamente (INTERGOVERNMENTAL..., 2014; NATIONAL..., 2021). A fim de se obter resultados para climas com comportamentos distintos, esta pesquisa foi desenvolvida para quatro cidades diferentes, visando uma boa representação do cenário brasileiro: Belém, Brasília, São Paulo e Curitiba. Na Figura 2, apresentam-se as cidades em um mapa de previsão de aumento da temperatura máxima diária do ar até 2100 (2081–2100), em relação a 1986–2005 (INTERGOVERNMENTAL..., 2014).

Conforme a classificação climática mundial de Köppen-Geiger, 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 São Paulo pertence ao tipo climático Cwa (clima subtropical) (ALVARES *et al.*, 2013; PEEL; FINLAYSON; MCMAHON, 2007). Ademais, de acordo com a classificação da NBR 15220 (ABNT, 2005), Belém está situada na zona bioclimática 8, apresentando um clima quente e úmido, com altas temperaturas e precipitações ao longo de todo o ano; Brasília está inserida na zona bioclimática 4, com clima quente e seco ao longo da maior parte do ano; São Paulo está situada na zona bioclimática 3, possuindo um clima ameno, com verões quentes e úmidos, e invernos pouco secos e frios; e Curitiba pertence à zona bioclimática 1, com baixas temperaturas durante a maior parte do ano.

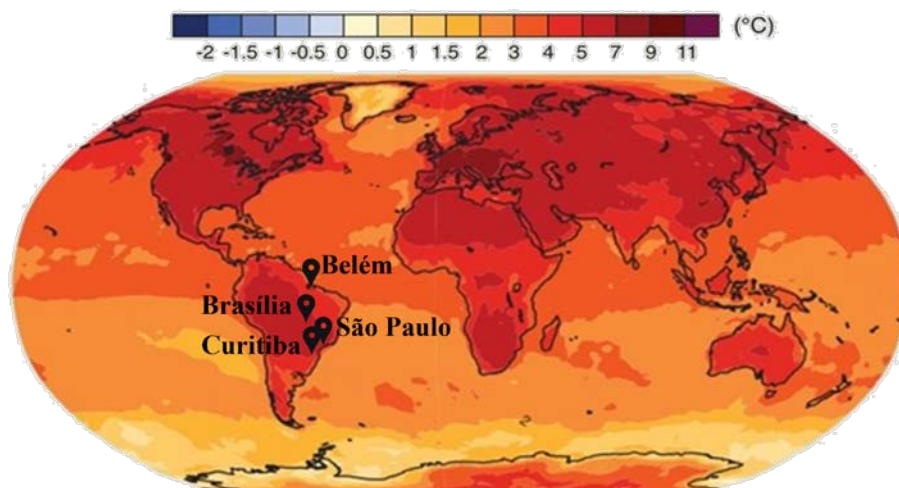
As condições climáticas aplicadas nesta pesquisa foram baseadas, primeiramente, nos arquivos dos anos climáticos de referência (TRY) de Belém (1964), Brasília (1962), Curitiba (1969) e São Paulo (1954) (CARLO; LAMBERTS, 2005; GOULART; LAMBERTS; FIRMINO, 1998). Depois, a partir dos dados TRY, foram gerados arquivos climáticos com progressões para períodos futuros de cada cidade, representando os anos de 2020 (2011 a 2040), 2050 (2041 a 2070) e 2080 (2071 a 2100). Os arquivos climáticos futuros foram desenvolvidos com auxílio da ferramenta CCWorldWeatherGen (versão 1.9), projetada por Jentsch, James e Bahaj (2012), considerando-se o cenário A2 do IPCC.

Simulações de desempenho térmico

As simulações de desempenho térmico do ambiente construído foram realizadas por meio do EnergyPlus (versão 9.3.0), considerando-se todas as 8.760 horas do ano.

As definições de ocupação e uso, cargas internas e sistemas de ventilação da habitação seguiram algumas considerações do método de simulação da proposta de Instrução Normativa Inmetro para Classe de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (INI-R) (CENTRO..., 2018), e referências técnicas da Sociedade Americana de Engenheiros de Aquecimento, Refrigeração e Ar-Condicionado (ASHRAE) (AMERICAN..., 2017a, 2017b) e do Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE) (UNITED..., 2015). Nas Figuras 3 e 4, apresentam-se as rotinas de ocupação e de acionamento da iluminação dos ambientes de permanência prolongada, e no Quadro 1 apresentam-se os parâmetros de fontes de calor para as simulações.

Figura 2 - Localização de Belém, Brasília, São Paulo e Curitiba, em um mapa de previsão de aumento da temperatura máxima diária do ar até 2100 (2081-2100), em relação a 1986-2005



Fonte: adaptado de IPCC (INTERGOVERNMENTAL..., 2014).

Figura 3 - Rotinas de ocupação dos ambientes de permanência prolongada



Fonte: adaptado de CB3E (CENTRO..., 2018).

Figura 4 - Rotinas de acionamento da iluminação dos ambientes de permanência prolongada



Fonte: adaptado de CB3E (CENTRO..., 2018).

Quadro 1 - Parâmetros de fontes de calor para as simulações

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: adaptado de ASHRAE (AMERICAN..., 2017a, 2017b), CB3E (CENTRO..., 2018) e DOE (UNITED..., 2015).

Com relação à configuração do sistema de ventilação, foram considerados os critérios de operação da ventilação natural estabelecidos pela proposta da INI-R (CENTRO..., 2018), desconsiderando a possibilidade de acionamento de um sistema de ar-condicionado. Entende-se que essa decisão foi apropriada, devido às incertezas que abrangem os possíveis avanços na eficiência de equipamentos, por exemplo. O sistema de ventilação natural foi configurado para ser operado conforme a temperatura do ar e ocupação dos ambientes, que controlaram 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 a 19 °C e superior à temperatura do ar externo; as janelas da edificação estão fechadas quando não há ocupação (das 8h00 às 14h00); das 14h00 às 22h00, 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 modelado 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.

A troca de calor com o solo foi considerada por meio do parâmetro Site:GroundDomain:Slab, a partir da correlação de Kusuda e Achenbach. Admitiu-se: solo argiloso, com massa específica de 1.700 kg/m³, calor específico de 840 J/kgK e condutividade térmica de 0,52 W/mK; e entorno da edificação com calçamento.

Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade global, na fonte das incertezas de variáveis termofísicas, foi desenvolvida por meio do método dos efeitos elementares de Morris, considerando-se o ambiente de permanência prolongada nomeado dormitório 1, na Figura 1. Assim, foi obtida a classificação dos parâmetros mais importantes e influentes no desempenho térmico do ambiente construído, diante das mudanças climáticas em distintas localidades do país.

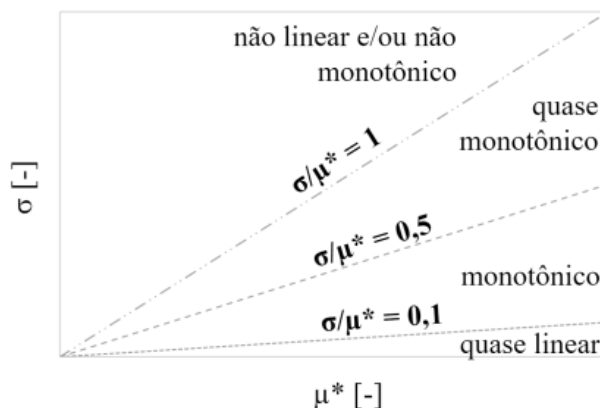
O método dos efeitos elementares, ou método de Morris, foi introduzido por Morris (1991) e desenvolvido por Campolongo, Cariboni e Saltelli (2007). As medidas de sensibilidade propostas por Morris (1991) são dadas pelos parâmetros “média estimada (μ)” e “desvio padrão (σ)” dos efeitos elementares. Por 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 maneira equivocada (em estatística, Erro Tipo II) e, assim, aperfeiçoaram o método, desenvolvendo a “média, em valor absoluto, estimada (μ^*)”. No método de sensibilidade global aplicado, 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, o método de Morris otimiza o esforço computacional das técnicas de análise local – *one-at-a-time* (uma por vez) – com o foco global de métodos avançados baseados na variância (BRANGER *et al.*, 2015; SALTELLI *et al.*, 2008).

Os índices de sensibilidade conseguem captar a influência das variáveis independentes na resposta do modelo (variáveis dependentes), possibilitando identificar parâmetros que possuem efeitos:

- desprezíveis ou negligenciáveis (média baixa, desvio padrão baixo);
- lineares e aditivos (média alta, desvio padrão baixo); e
- não lineares ou de segunda ordem (desvio padrão alto), quando estão em níveis distantes, como no caso das variáveis termofísicas de edificações.

Outra vantagem do método de Morris é indicar a relação monotônica das variáveis: por meio da monotonia é possível entender se um aumento no valor da variável independente provoca um aumento ou uma diminuição do valor da variável dependente. Nesse sentido, na Figura 5, apresenta-se um esquema de classificação, em termos de linearidade, monotonicidade e possíveis interações de parâmetros, a partir de correlações estatísticas dos índices. Os índices de sensibilidade das variáveis foram calculados por meio das Equações 1, 2 e 3, conforme Morris (1991) e Campolongo, Cariboni e Saltelli (2007).

Figura 5 - Esquema genérico de classificação de parâmetros, a partir da relação σ/μ^*



$$\mu_i = \frac{1}{r} \sum_{j=1}^r d_i \quad \text{Eq. 1}$$

$$\mu_i^* = \frac{1}{r} \sum_{j=1}^r |d_i| \quad \text{Eq. 2}$$

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{(r-1)} \sum_{j=1}^r [d_i - \mu_i]^2} \quad \text{Eq. 3}$$

Em que:

i é cada uma das variáveis independentes;

r é o número de trajetórias da amostra;

μ_i é a média dos efeitos elementares da i -ésima variável independente;

μ_i^* é a média, em valor absoluto, dos efeitos elementares da i -ésima variável independente;

σ é o desvio padrão dos efeitos elementares da i -ésima variável independente; e

d_i é o efeito elementar da i -ésima variável independente.

Compreendendo uma distribuição de probabilidades discreta e normalizada, foram adotados quatro níveis de variação, considerando-se 12 trajetórias, para uniformidade na amostragem. O número de variáveis analisadas foi 13 (Quadro 2), gerando-se um tamanho de amostra igual a 168 modelos (Quadro 3) para cada cidade e para cada um dos arquivos de períodos climáticos (TRY, 2020, 2050 e 2080). Dessa forma, um total de 2.688 simulações paramétricas foram realizadas. Os procedimentos relacionados à análise de sensibilidade foram conduzidos com auxílio da linguagem de programação R, a partir de algoritmos desenvolvidos por Silva (2016).

Quadro 2 - Descrição das variáveis independentes para a análise de sensibilidade de Morris

Variáveis termofísicas	Símbolo	LI LS	Variação
Absortância solar da cobertura [-]	acob	{0,2 0,8}	0,20
Absortância solar das paredes externas [-]	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 venezianas 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

Quadro 3 - Propriedades termofísicas de cada modelo da amostra (Continua...)

Mod	acob	apar	CTcob	CTpar	CTpis	ecob	Fvent	FSvid	OS	tvnez	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

Quadro 3 - Propriedades termofísicas de cada modelo da amostra (continuação)

Mod	acob	apar	CTcob	CTpar	CTpis	ecob	Fvent	FSvid	OS	tvenez	Ucob	Upar	Upis
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
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

Quadro 3 - Propriedades termofísicas de cada modelo da amostra (continuação)

Mod	acob	apar	CTcob	CTpar	CTpis	ecob	Fvent	FSvid	OS	tvnez	Ucob	Upar	Upis
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
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
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

Quadro 3 - Propriedades termofísicas de cada modelo da amostra (continuação)

Mod	acob	apar	CTcob	CTpar	CTpis	ecob	Fvent	FSvid	OS	tvnez	Ucob	Upar	Upis
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
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

Variáveis independentes

As variáveis independentes foram 13 variáveis termofísicas relacionadas 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 2 estão listadas todas as 13 variáveis de entrada, as simbologias para as análises, os valores limites amostrais inferior (LI) e superior (LS), e as variações.

Variáveis dependentes

As variáveis dependentes, que definem a resposta do modelo, ou seja, que representam o desempenho térmico do dormitório 1, foram obtidas por meio de indicadores de graus-hora para aquecimento (GHA) e resfriamento (GHR). O modelo adaptativo de conforto térmico condicionou os parâmetros para os cálculos dos graus-hora, considerando-se a quantidade de horas ocupadas em desconforto térmico, para 80% de aceitabilidade, de acordo com a norma Standard 55 (AMERICAN..., 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 (ASSOCIAÇÃO...; COMITÊ..., 2017). Na Figura 6 ilustra-se o intervalo de temperatura de conforto térmico, conforme os limites de aceitabilidade superior (LS) e inferior (LI).

A partir das definições dos limites de conforto térmico para cada localidade e período climático, os indicadores GHA e GHR caracterizaram o desempenho térmico do dormitório 1. Por meio das Equações 4 e 5, descrevem-se os procedimentos para os cálculos dos graus-hora.

$$GHA_{\text{dormit1}} = \sum_{i=1}^n (T_{LI,mês} - T_{\text{opi,dormit1}}), \text{ se } T_{\text{opi,dormit1}} < T_{LI,mês} \quad \text{Eq. 4}$$

$$GHR_{\text{dormit1}} = \sum_{i=1}^n (T_{\text{opi,dormit1}} - T_{LS,mês}), \text{ se } T_{\text{opi,dormit1}} > T_{LS,mês} \quad \text{Eq. 5}$$

Em que:

GHA_{dormit1} é o indicador de graus-hora para aquecimento do dormitório 1 [°Ch];

GHR_{dormit1} é o indicador de graus-hora para resfriamento do dormitório 1 [°Ch];

i é cada uma das horas de ocupação do dormitório 1 no ano;

n é o total de horas de ocupação do dormitório 1 no ano;

$T_{LI,mês}$ é a temperatura limite inferior mensal de conforto térmico [°C];

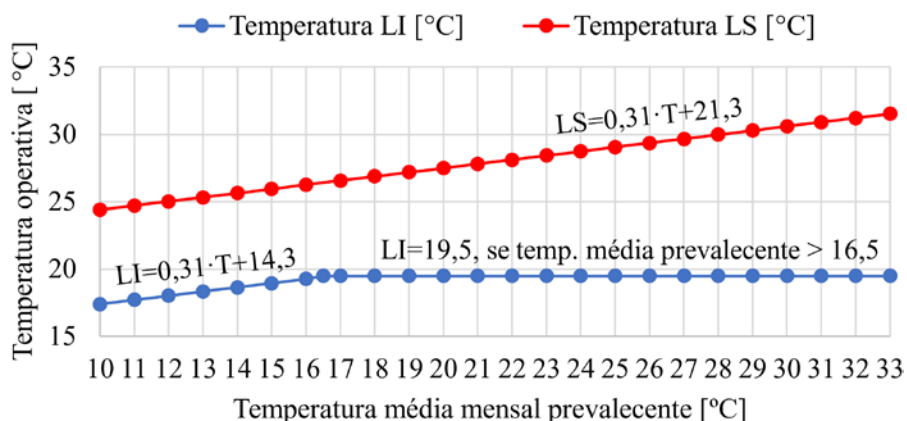
$T_{LS,mês}$ é a temperatura limite superior mensal de conforto térmico [°C]; e

$T_{\text{opi,dormit1}}$ é a temperatura operativa horária do dormitório 1 [°C].

Resultados

A seguir, apresentam-se os resultados das progressões climáticas para Belém, Brasília, São Paulo e Curitiba, e os resultados das análises de sensibilidade global das variáveis termofísicas do objeto de estudo para as respectivas cidades, em cada período climático.

Figura 6 - Intervalo de temperatura de conforto térmico



Fonte: adaptado de ABNT/CB-55 (ASSOCIAÇÃO...; COMITÊ..., 2017) e ASHRAE (AMERICAN..., 2017a).

Progressões climáticas

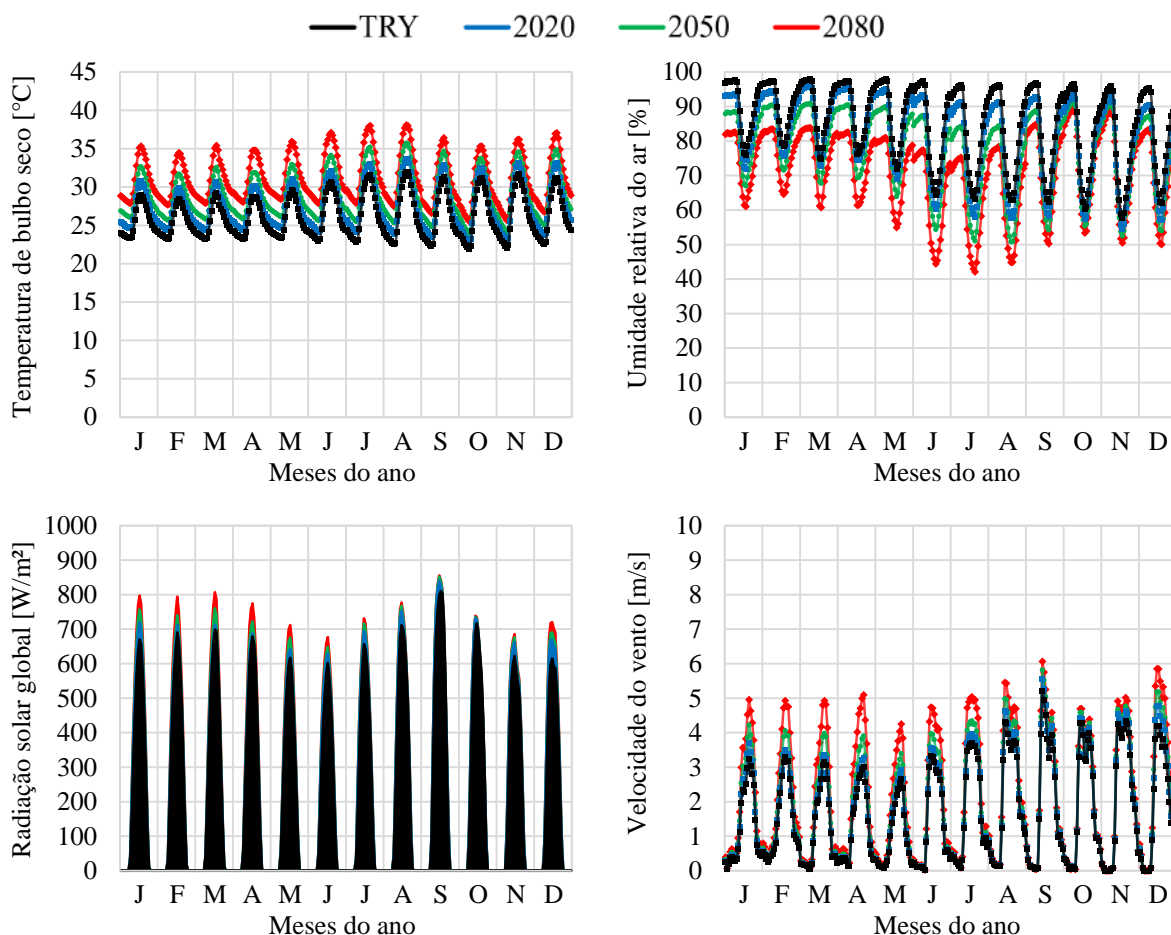
Nos subitens desta seção, apresentam-se algumas características das variáveis climáticas temperatura de bulbo seco, umidade relativa do ar, radiação solar global e velocidade do vento, de Belém, Brasília, São Paulo e Curitiba, conforme os dados TRY e as progressões para os períodos 2020, 2050 e 2080. Ressalta-se que os dados futuros foram obtidos por meio do CCWorldWeatherGen, para o cenário de emissões A2 do IPCC.

Belém

As médias mensais horárias (dia típico) das principais variáveis climáticas de Belém são ilustradas nos gráficos da Figura 7.

Conforme as progressões ilustradas nos gráficos, a temperatura média anual do ar de Belém 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 as temperaturas médias mais elevadas, é em janeiro que continuarão sendo observadas as temperaturas horárias mais altas em todos os períodos, alcançando 42,83 °C até 2100. Com relação à umidade relativa, a média anual passará de 85,48% (TRY), para 81,90% (2020), 77,31% (2050) e 71,15% (2080), sendo que os meses com umidade relativa mais baixa serão junho, julho e agosto. Por sua vez, a média anual da radiação solar aumentará de 393,48 W/m² (TRY) para 424,26 W/m² (2020), 437,93 W/m² (2050) e 453,60 W/m² (2080). Por último, as progressões do clima de Belém indicaram grandes aumentos na velocidade do vento nos meses de janeiro a julho, principalmente, sendo que a média anual da velocidade do vento passará de 1,59 m/s (TRY), para 1,72 m/s (2020), 1,89 m/s (2050) e 2,17 m/s (2080).

Figura 7 - Médias mensais horárias de variáveis climáticas de Belém, conforme arquivo climático TRY e progressões para 2020, 2050 e 2080

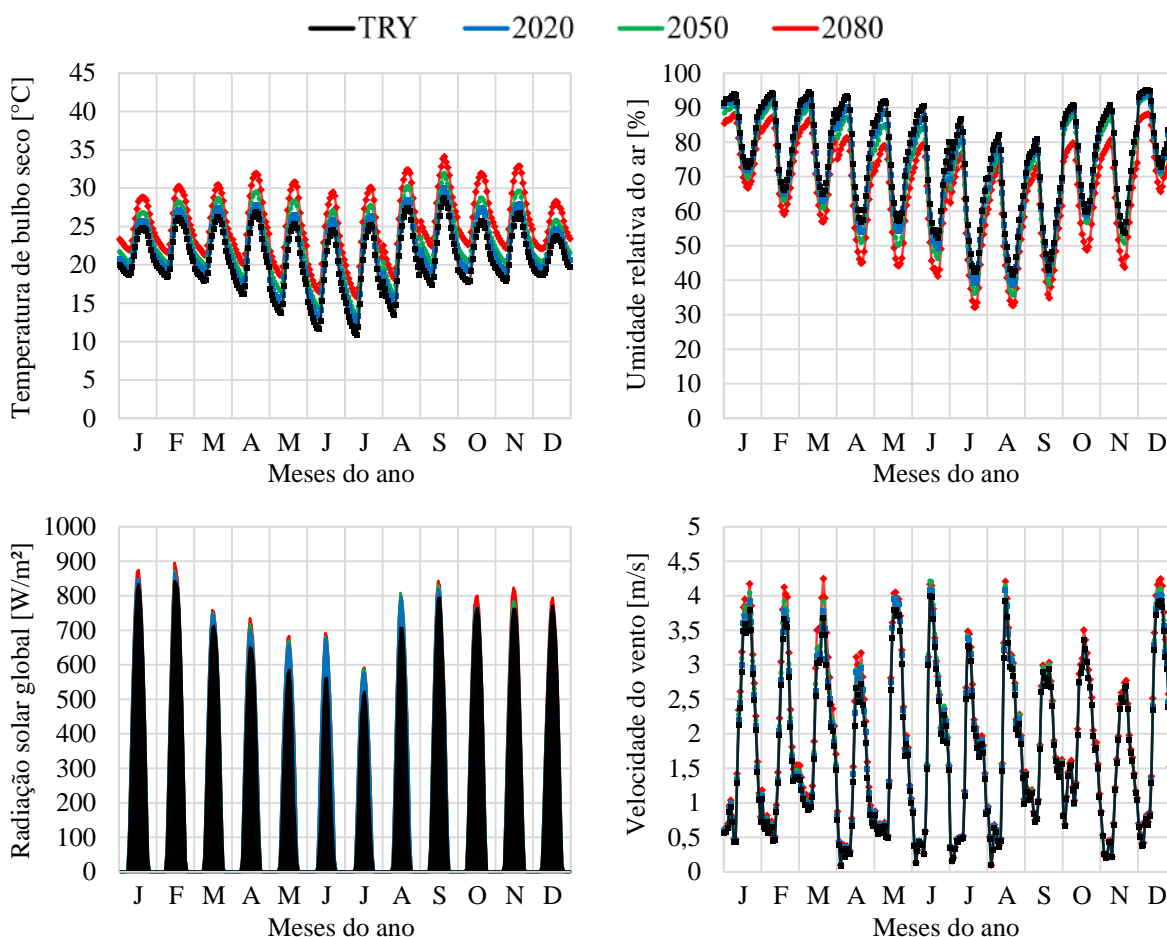


Brasília

As médias mensais horárias das principais variáveis climáticas de Brasília são ilustradas nos gráficos da Figura 8.

As progressões indicaram que, em Brasília, a temperatura média anual do ar aumentará, em relação aos dados TRY, 1,14 °C no período 2020, 2,46 °C no período 2050, e 4,60 °C no período 2080. Setembro e novembro são os meses mais quentes nos quatro períodos, sendo que a máxima horária, que é 32,96 °C no arquivo TRY, poderá chegar a 38,46 °C até 2100. A umidade relativa sofrerá redução, com média anual 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 – pelo arquivo TRY, observou-se que a umidade relativa da cidade alcança números inferiores a 30% nos meses mais secos; e, conforme as progressões climáticas, estimou-se que a umidade relativa alcance valores inferiores a 10%, em setembro. Com relação à radiação solar, destaca-se que as mudanças foram mais acentuadas de abril a setembro, para o período 2020, e pouco expressivas nos meses de outubro a fevereiro. Observou-se que a média anual da radiação solar 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. Por sua vez, as progressões da velocidade do vento mostraram razoável estabilidade, indicando que a média anual 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.

Figura 8 - Médias mensais horárias de variáveis climáticas de Brasília, conforme arquivo climático TRY e progressões para 2020, 2050 e 2080

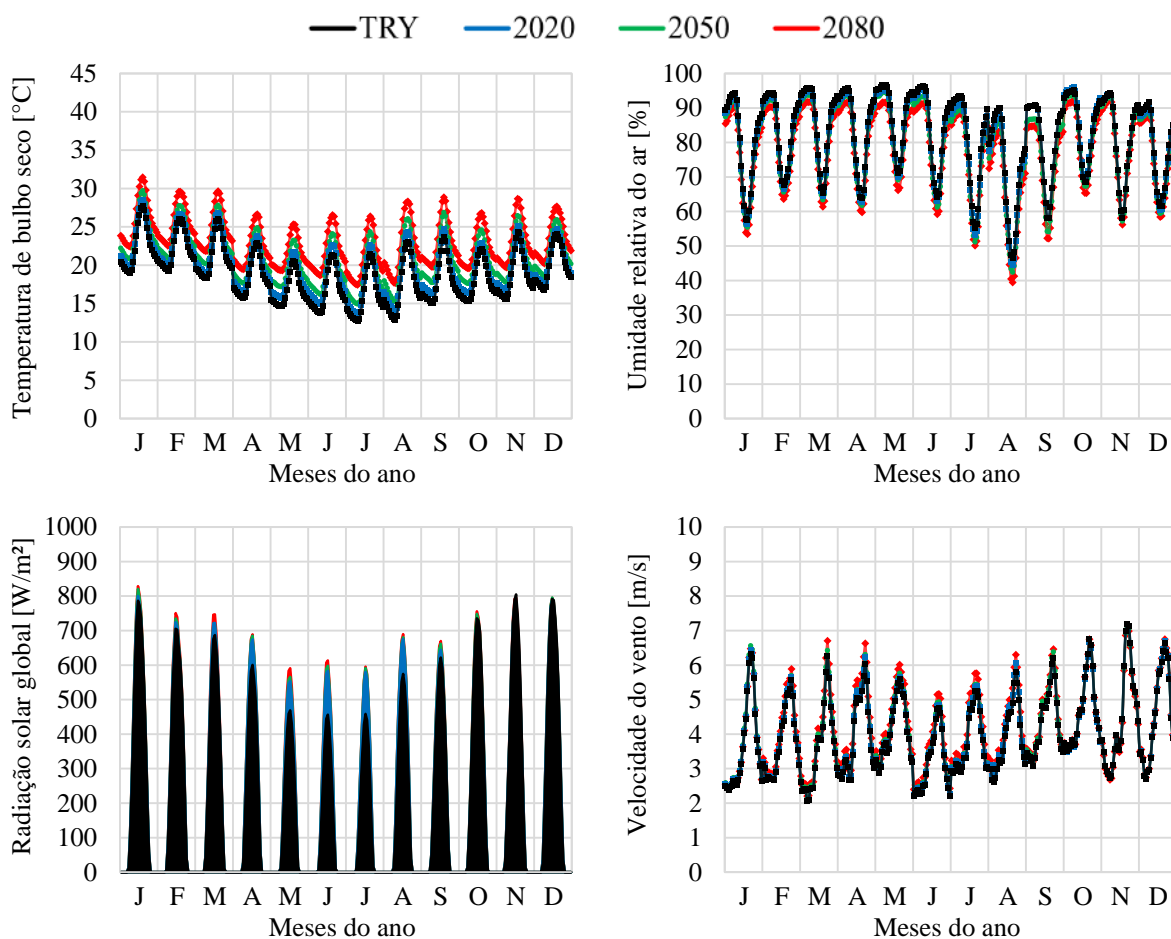


São Paulo

As médias mensais horárias das principais variáveis climáticas de São Paulo são ilustradas nos gráficos da Figura 9.

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. Nesse sentido, assim como em Curitiba, percebeu-se que as mudanças na temperatura serão mais relevantes no período de inverno. Com relação à umidade relativa, existe tendência de um declínio razoavelmente constante, conforme o passar dos anos. Estima-se que a média anual passará de 82,17%, no arquivo TRY, para 77,84%, até 2100. Além disso, as médias anuais de radiação solar global obtidas para os períodos analisados, foram de 360,74 W/m² (TRY), 392,53 W/m² (2020), 398,65 W/m² (2050) e 404,91 W/m² (2080). A elevação nesta variável climática também foi mais acentuada no período mais frio do ano (maio a agosto), sobretudo no período 2020. Por último, observou-se que a média anual da velocidade do vento passará de 3,98 m/s, conforme 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.

Figura 9 - Médias mensais horárias de variáveis climáticas de São Paulo, conforme arquivo climático TRY e progressões para 2020, 2050 e 2080



Curitiba

As médias mensais horárias das principais variáveis climáticas de Curitiba são ilustradas nos gráficos da Figura 10.

De modo geral, as progressões climáticas, sobretudo de temperatura, alertam para uma mudança significativa no comportamento climático de Curitiba, conhecida por ser uma cidade fria durante o ano todo. Estimou-se que 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. Destaca-se que as temperaturas máximas do arquivo TRY não chegam a 30 °C, mas poderão alcançar até 35 °C no período 2080. Quanto à umidade relativa do ar, a média anual 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. Embora o clima de Curitiba mantenha umidade relativamente elevada, percebeu-se que os valores de umidade horária poderão atingir mínimas de cerca de 20%, em setembro do período 2080. As progressões mostraram, 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, com mudanças mais acentuadas em meses mais frios, como maio, junho e julho. Por último, as análises indicaram 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. Nesse sentido, as previsões sugeriram um relativo aumento da velocidade do vento nos meses de fevereiro a julho, enquanto nos demais meses as variações foram menos significativas.

Figura 10 - Médias mensais horárias de variáveis climáticas de Curitiba, conforme arquivo climático TRY e progressões para 2020, 2050 e 2080

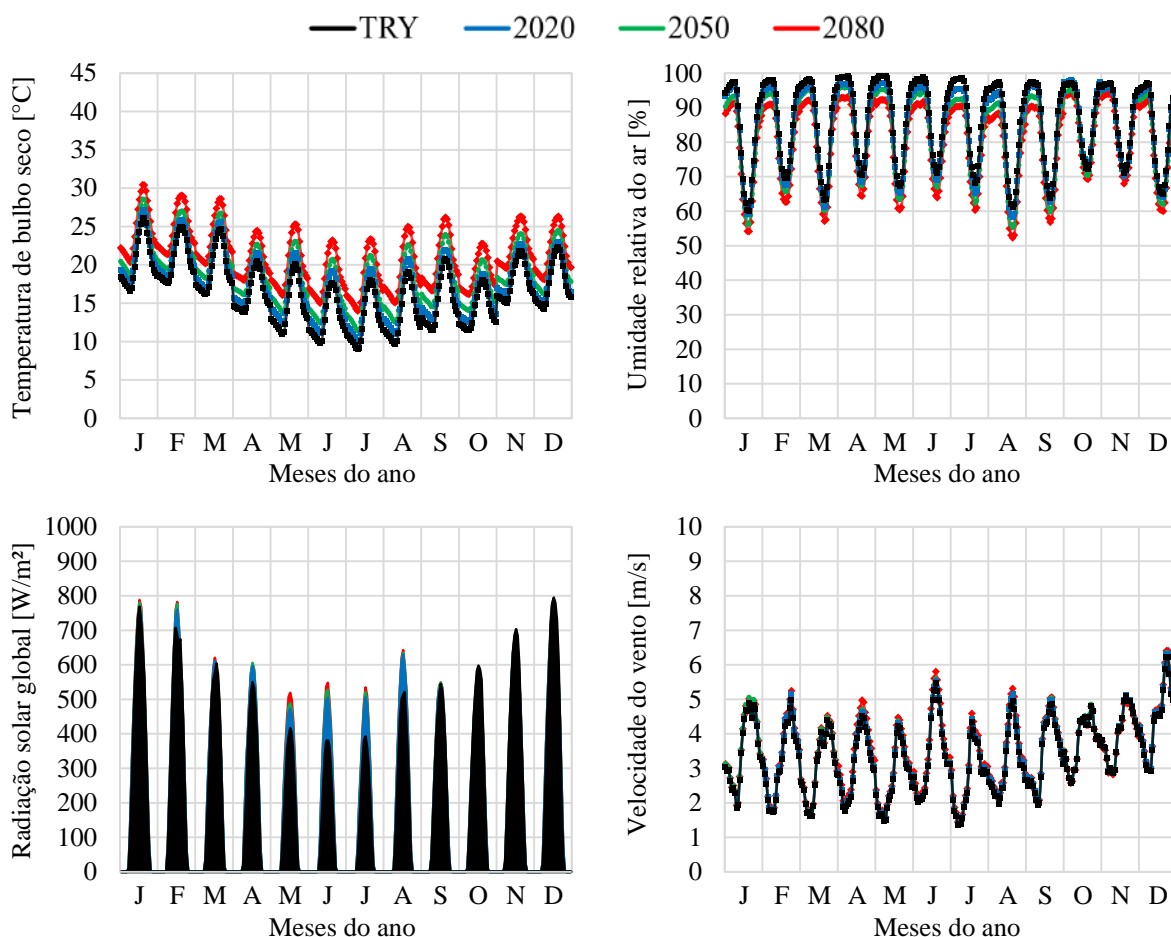
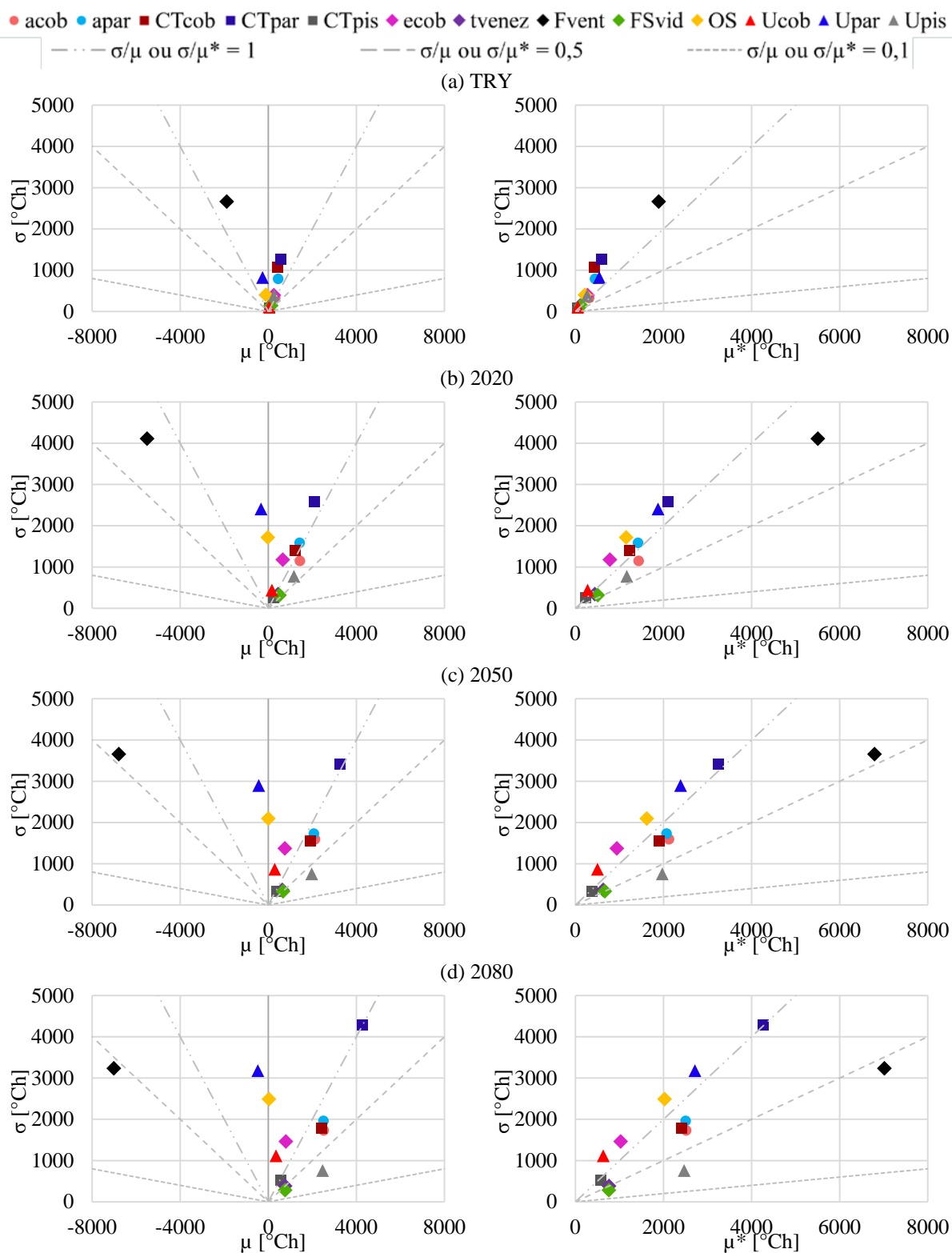


Figura 11 - Índices de sensibilidade para o indicador GHR, em Belém



Influência das mudanças climáticas na sensibilidade das variáveis termofísicas

Nos subitens desta seção apresentam-se os resultados dos efeitos elementares de Morris para as variáveis termofísicas investigadas, de acordo com cada cidade e período climático. Complementando os resultados,

também detalham-se os indicadores de desempenho de cada modelo da amostra em cada clima, para cada período considerado.

Belém

Na Figura 11 apresentam-se os resultados das análises de sensibilidade e, na Figura 12, detalham-se os indicadores de desempenho de cada modelo da amostra, para Belém. Devido ao clima preponderantemente quente, os indicadores GHA foram nulos em todos os períodos considerados.

Conforme os resultados apresentados na Figura 11, o fator de ventilação foi o parâmetro com maiores médias em todos os quatro períodos climáticos investigados. Isso significa que essa foi a variável de entrada que provocou maior variação no desempenho do ambiente e, portanto, possui maior importância para o cálculo do indicador GHR, que retrata o desempenho térmico do ambiente. Além disso, analisando-se as médias μ e μ^* – principalmente do período 2020 em diante – pode-se perceber a monotonicidade dessa variável: os gráficos demonstram que o aumento do fator de ventilação do dormitório 1 provocou redução do indicador GHR. As propriedades das paredes externas, como capacidade e transmitância térmica, também se sobressaíram, contudo exibiram maiores não linearidades na resposta do modelo, observada pelo desvio padrão alto e pela maior relação do desvio padrão com a média, nos quatro períodos climáticos. Por sua vez, parâmetros como a absorvância solar da cobertura e das paredes externas, transmitância térmica do piso, fator solar dos vidros e transmitância solar e visível das venezianas, embora com menores médias de sensibilidade, apresentaram monotonicidade parecida com a do fator de ventilação. De modo geral, como as mudanças climáticas promovem a elevação da temperatura de Belém, que já possui um clima predominantemente quente, a sensibilidade das variáveis tende a manter a ordem de importância, sem sofrer alterações significativas no arranjo da classificação, por exemplo.

Brasília

Nas Figuras 13 e 14, apresentam-se os resultados das análises de sensibilidade e, na Figura 15, detalham-se os indicadores de desempenho de cada modelo da amostra, para Brasília.

Os resultados para o indicador GHA (gráficos da Figura 13) indicaram que ao longo dos períodos climáticos considerados todas as variáveis termofísicas são classificadas como não lineares e/ou não monotônicas, sendo que os mais influentes na resposta do modelo se alternam entre a capacidade térmica da cobertura, das paredes e do piso. Ficaram evidentes, ainda, alterações nos valores dos índices, 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.

Figura 12 - Indicadores de desempenho de cada modelo da amostra, para os diferentes períodos climáticos de Belém

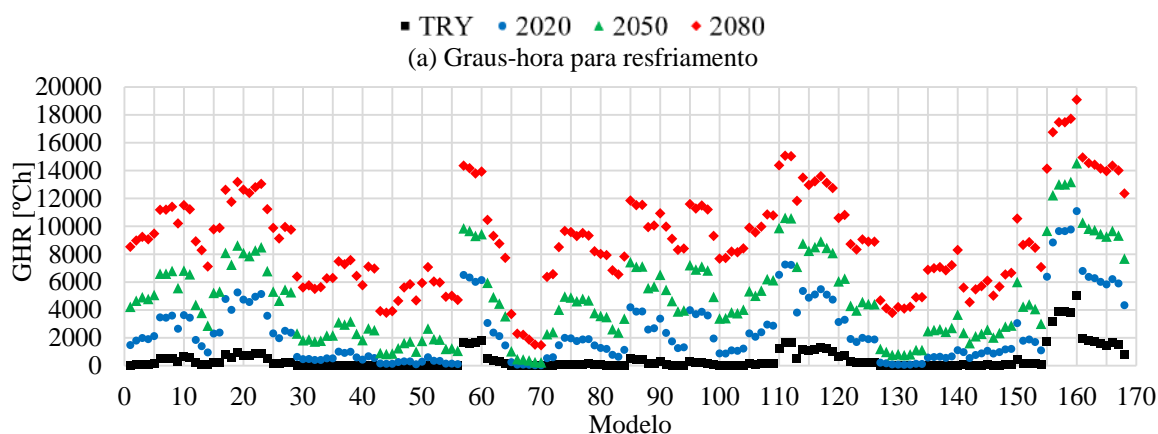


Figura 13 - Índices de sensibilidade para o indicador GHA, em Brasília

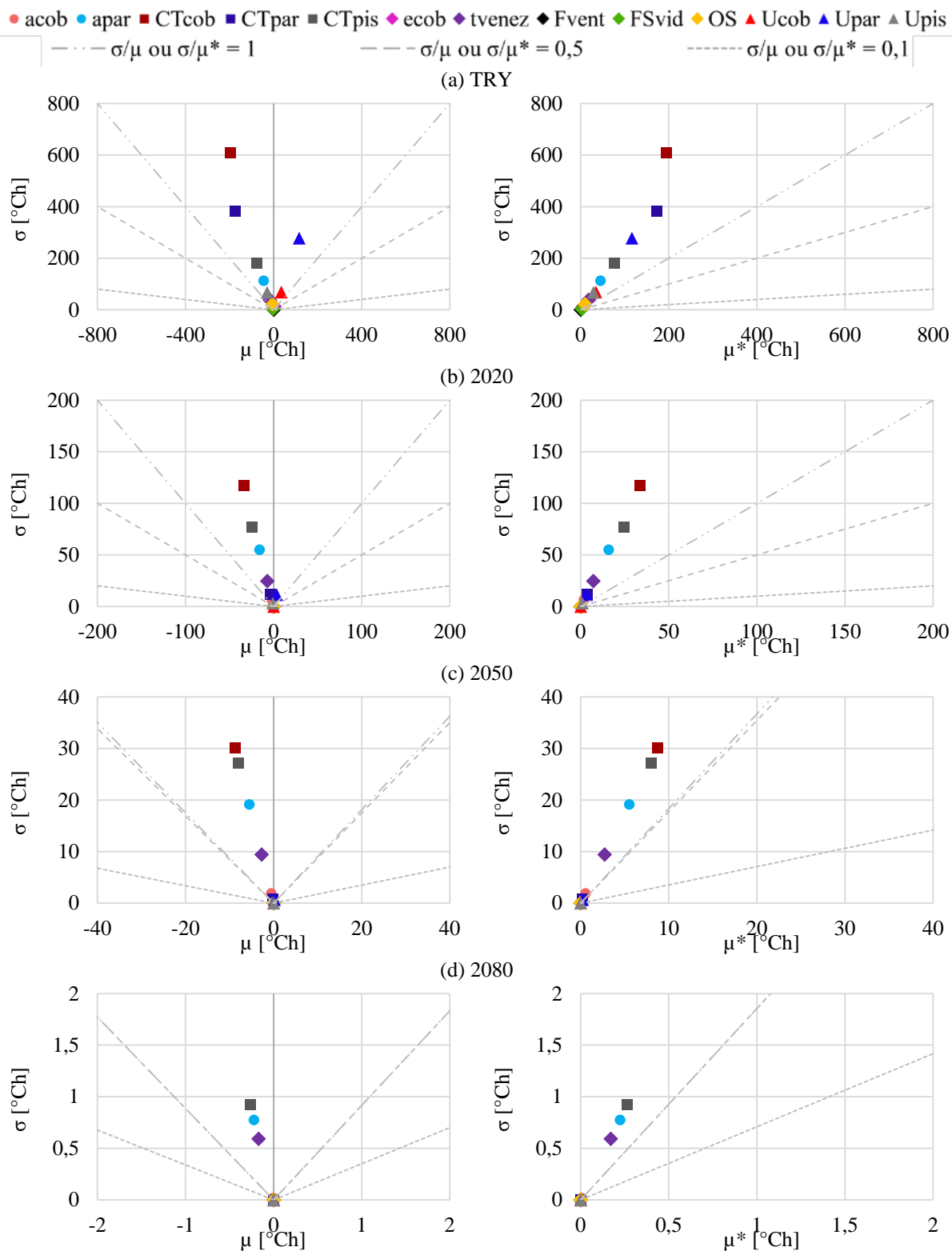


Figura 14 - Índices de sensibilidade para o indicador GHR, em Brasília

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

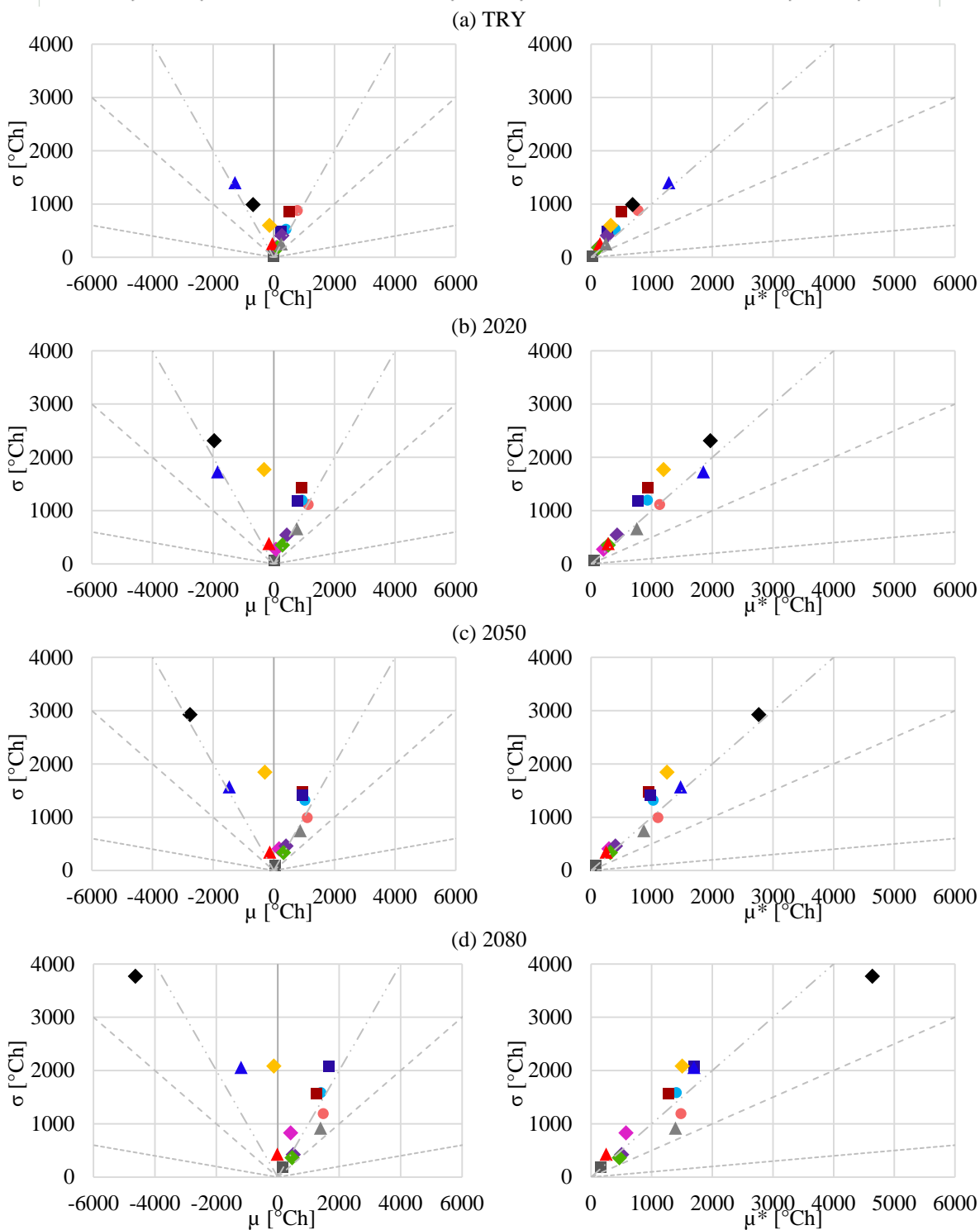
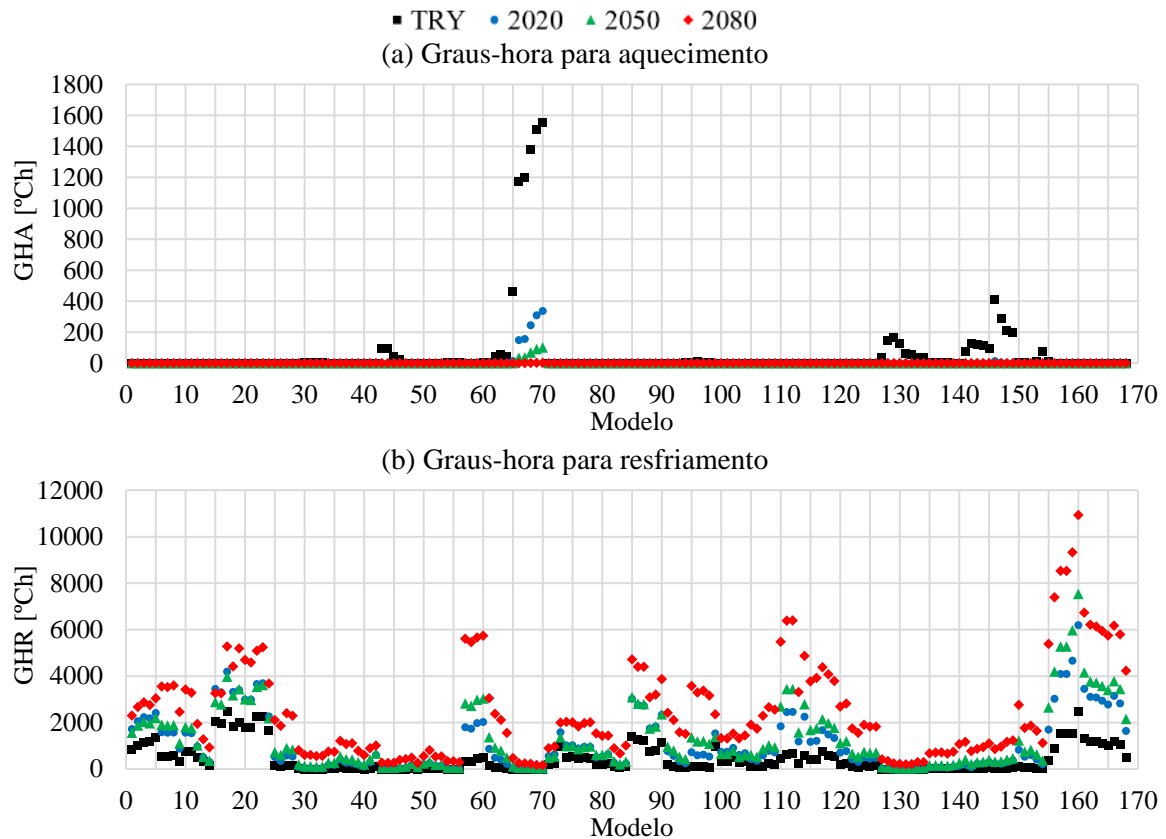


Figura 15 - Indicadores de desempenho de cada modelo da amostra, para os diferentes períodos climáticos de Brasília



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 14), 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 pela absorvância solar da cobertura e pelo fator de ventilação. Quando se consideraram as progressões climáticas para os períodos 2020, 2050 e 2080, embora essas variáveis se mantenham entre as mais influentes no desempenho, a ordem de importância mudou, ao passo que o fator de ventilação passou a ser o principal parâmetro termofísico a causar variação na resposta do modelo.

São Paulo

Nas Figuras 16 e 17 apresentam-se os resultados das análises de sensibilidade e, na Figura 18, detalham-se os indicadores de desempenho de cada modelo da amostra, para São Paulo.

Os resultados apresentados nos gráficos da Figura 16 evidenciam os efeitos do aquecimento em São Paulo, de acordo com a notável redução dos índices de sensibilidade para o indicador GHA do dormitório 1 nas condições climáticas de 2050 e 2080. Os índices de sensibilidade mostram que a capacidade térmica das paredes e da cobertura, além da transmitância térmica das paredes, foram mais importantes para a resposta do modelo na condição de desconforto por frio, sobretudo até o período 2020.

Por sua vez, por meio dos gráficos ilustrados na Figura 17, percebe-se que, com a elevação da temperatura nos períodos futuros, ocorrem aumentos nos indicadores GHR, refletidos nos índices de sensibilidade. Nesse caso, a orientação solar, a absorvância solar da cobertura e o fator de ventilação foram os parâmetros mais importantes para o desempenho do modelo nas simulações para os períodos TRY, 2020 e 2050. No período 2080, é interessante perceber que o fator de ventilação passou a ser o parâmetro mais influente no resultado, seguido da orientação solar e da absorvância solar das paredes. Nota-se que, diferentemente de Belém, a influência da orientação solar na resposta do modelo se destacou, devido à latitude na qual São Paulo está situada.

Por último, compete enfatizar que os resultados dos índices de sensibilidade para os indicadores GHA e GHR do dormitório 1, em São Paulo, sugerem que a maioria das variáveis termofísicas possuem maiores não linearidades e/ou interações de parâmetros (efeitos de segunda ordem). Isso indica que as combinações entre as variáveis termofísicas acarretam maiores alterações no comportamento do modelo.

Figura 16 - Índices de sensibilidade para o indicador GHA, em São Paulo

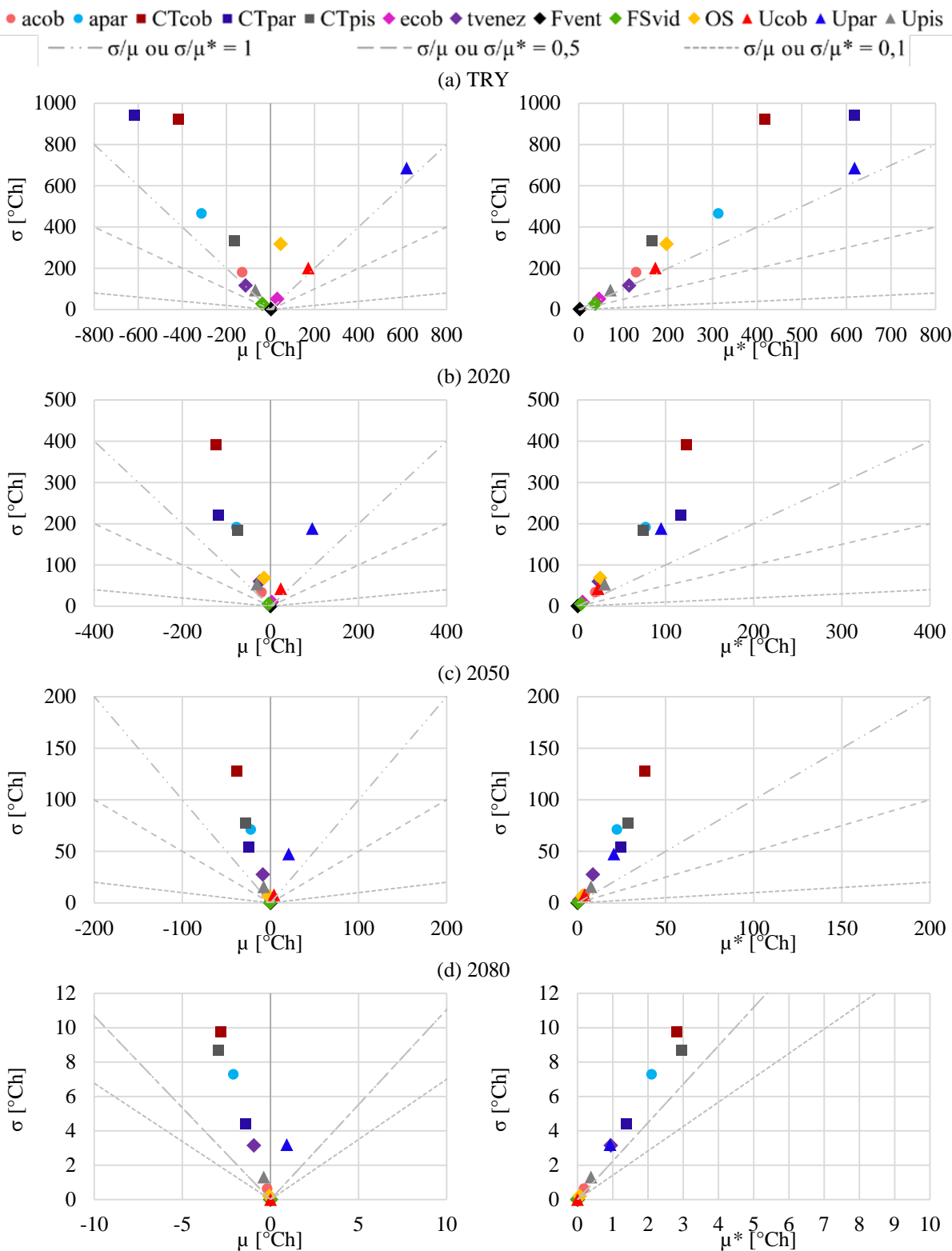


Figura 17 - Índices de sensibilidade para o indicador GHR, em São Paulo

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

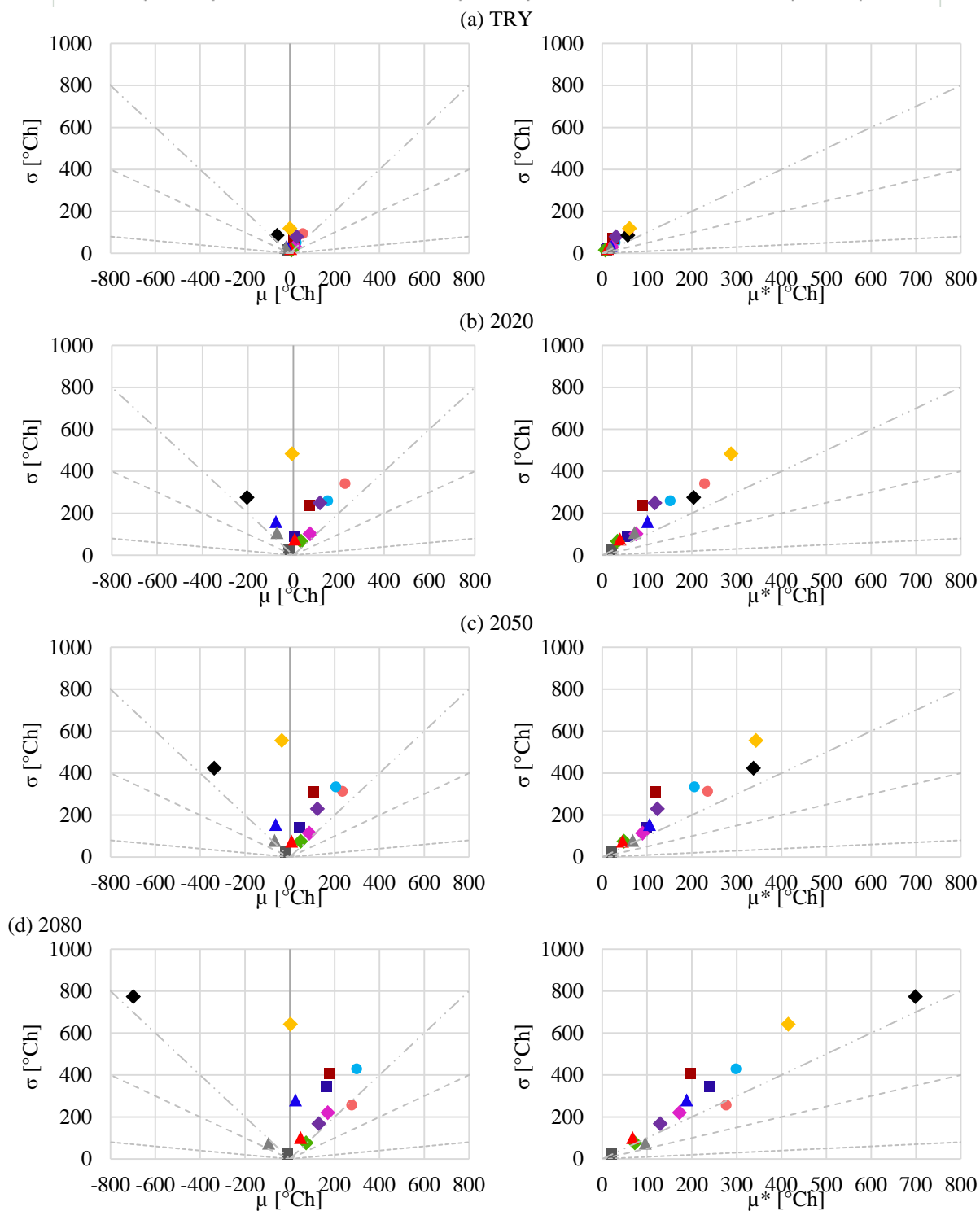
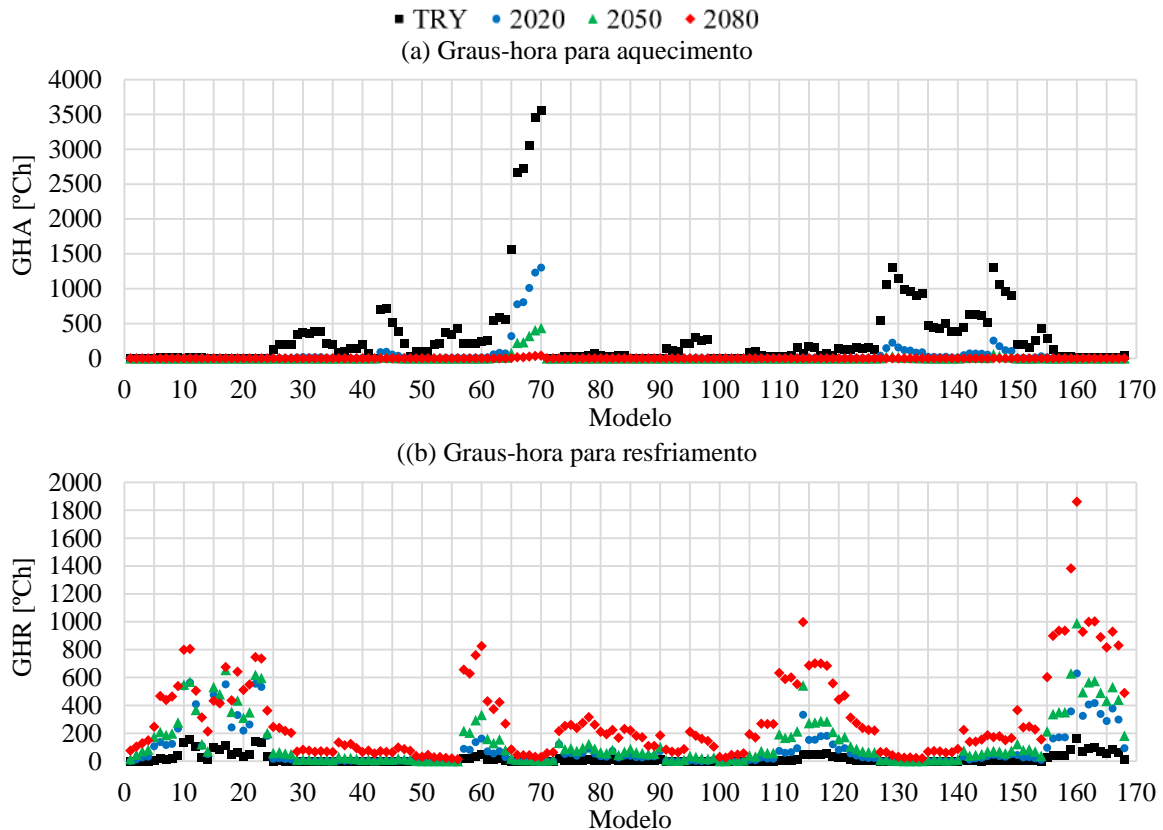


Figura 18 - Indicadores de desempenho de cada modelo da amostra, para os diferentes períodos climáticos de São Paulo



Curitiba

Nas Figuras 19 e 20 apresentam-se os resultados das análises de sensibilidade e, na Figura 21, detalham-se os indicadores de desempenho de cada modelo da amostra, para Curitiba.

Por meio dos gráficos para o indicador GHA (Figura 19), nota-se redução nos índices de sensibilidade, devido aos efeitos das mudanças no clima de Curitiba. Embora haja reduções nos valores dos seus índices, as variáveis termofísicas mais importantes para a resposta do modelo foram as mesmas nos quatro períodos analisados: transmitância térmica das paredes e capacidade térmica da cobertura e das paredes. A transmitância térmica das paredes foi a variável mais influente em todos os períodos. Ademais, ao longo dos anos, a transmitância térmica das paredes teve 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 e orientação solar.

Para o indicador GHR (Figura 20), o parâmetro termofísico mais importante variou, conforme o arquivo (período) climático da simulação: para o TRY, foi a absorvância solar da cobertura; para 2020 e 2050, foi a orientação solar; e para 2080, foi o fator de ventilação. Nesse sentido, é interessante observar nos gráficos que, com a elevação da temperatura, os graus-hora para resfriamento aumentarão, fazendo com que a importância da ventilação natural também aumente ao longo dos anos, até 2100. De modo geral, para as condições adotadas neste trabalho, os índices de sensibilidade para os diferentes períodos indicaram que estratégias que considerem a orientação solar, baixa absorvância solar e o uso da ventilação natural serão importantes para provimento de conforto térmico no ambiente construído em Curitiba, diante de temperaturas mais altas no futuro.

Figura 19 - Índices de sensibilidade para o indicador GHA, em Curitiba

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

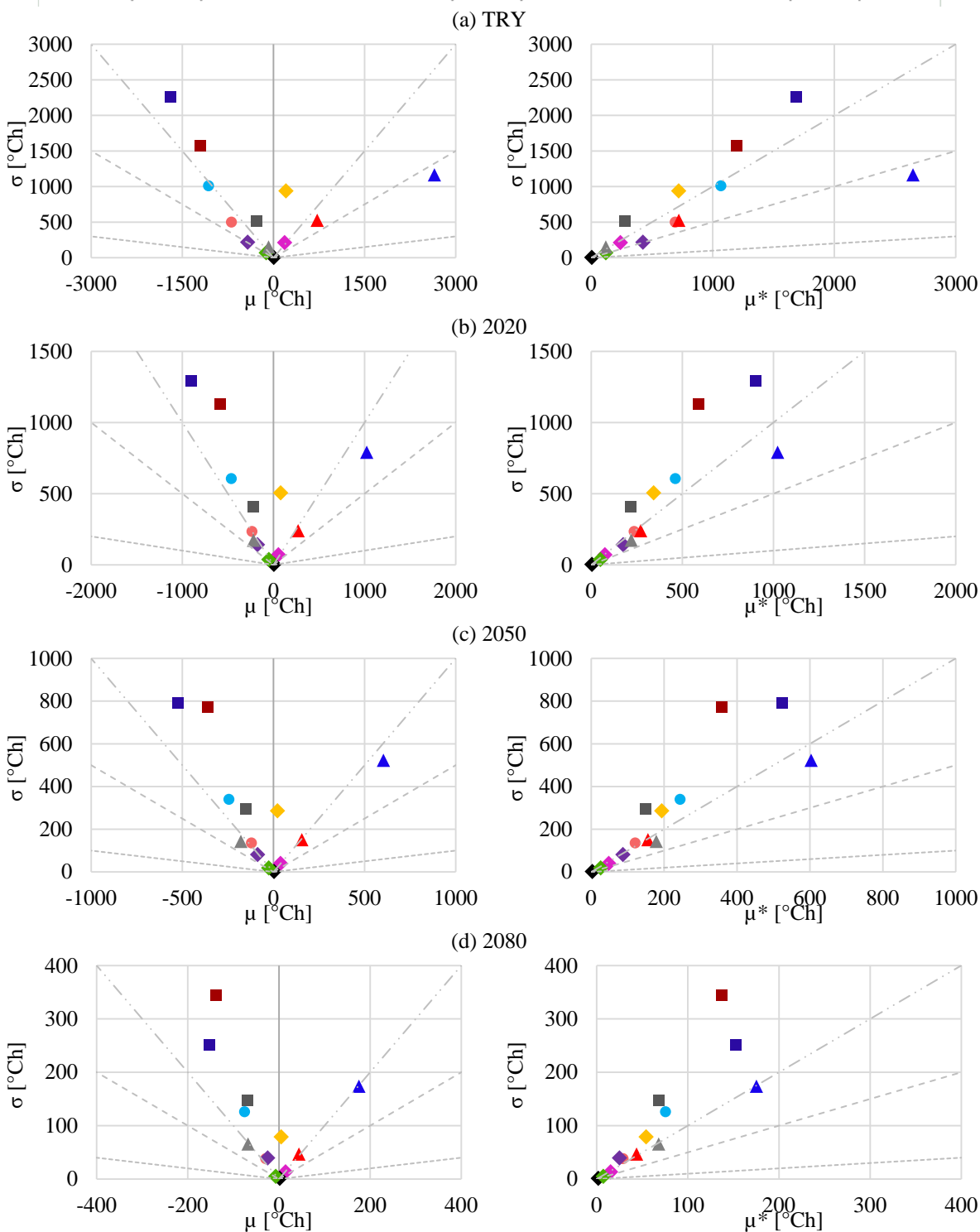


Figura 20 - Índices de sensibilidade para o indicador GHR, em Curitiba

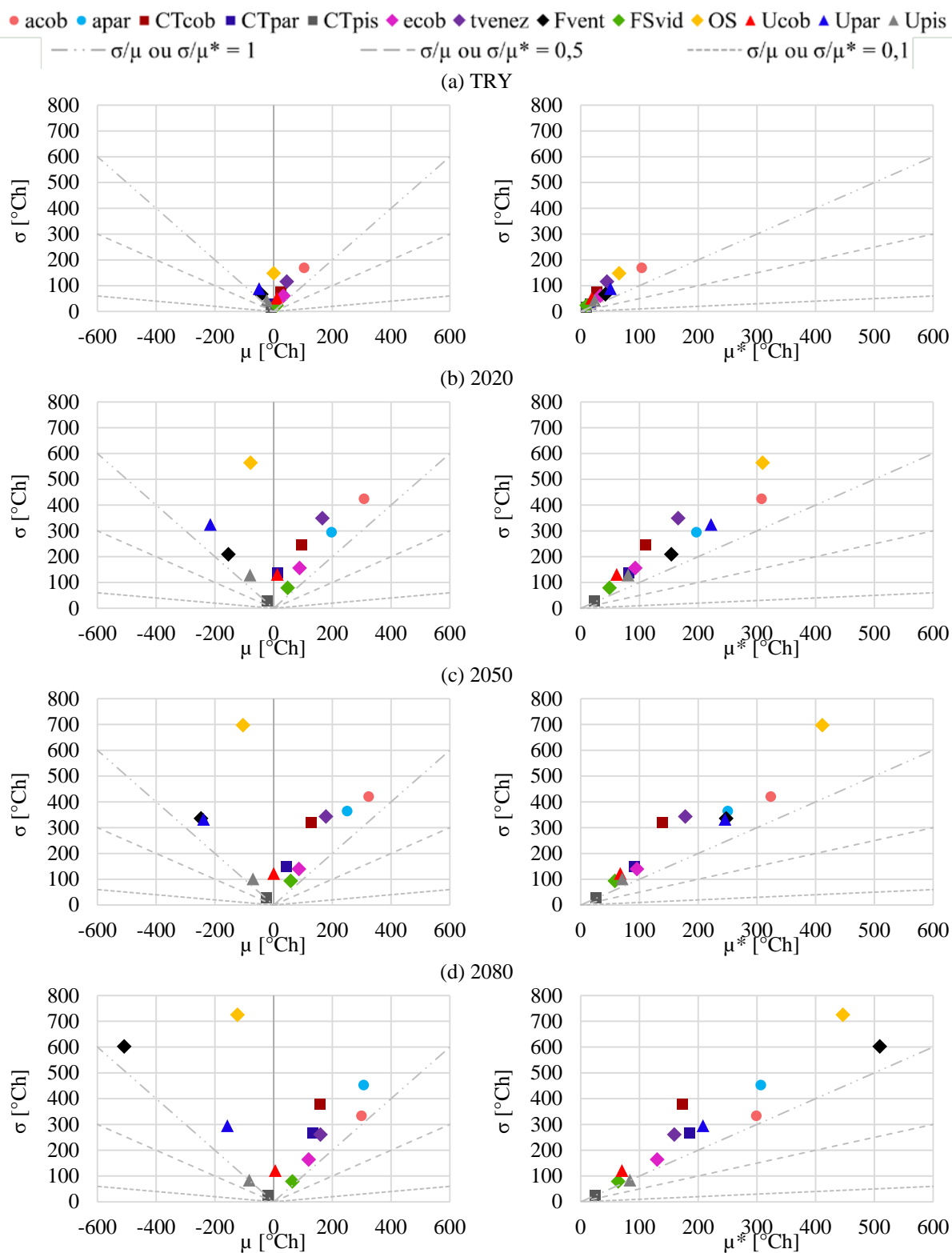
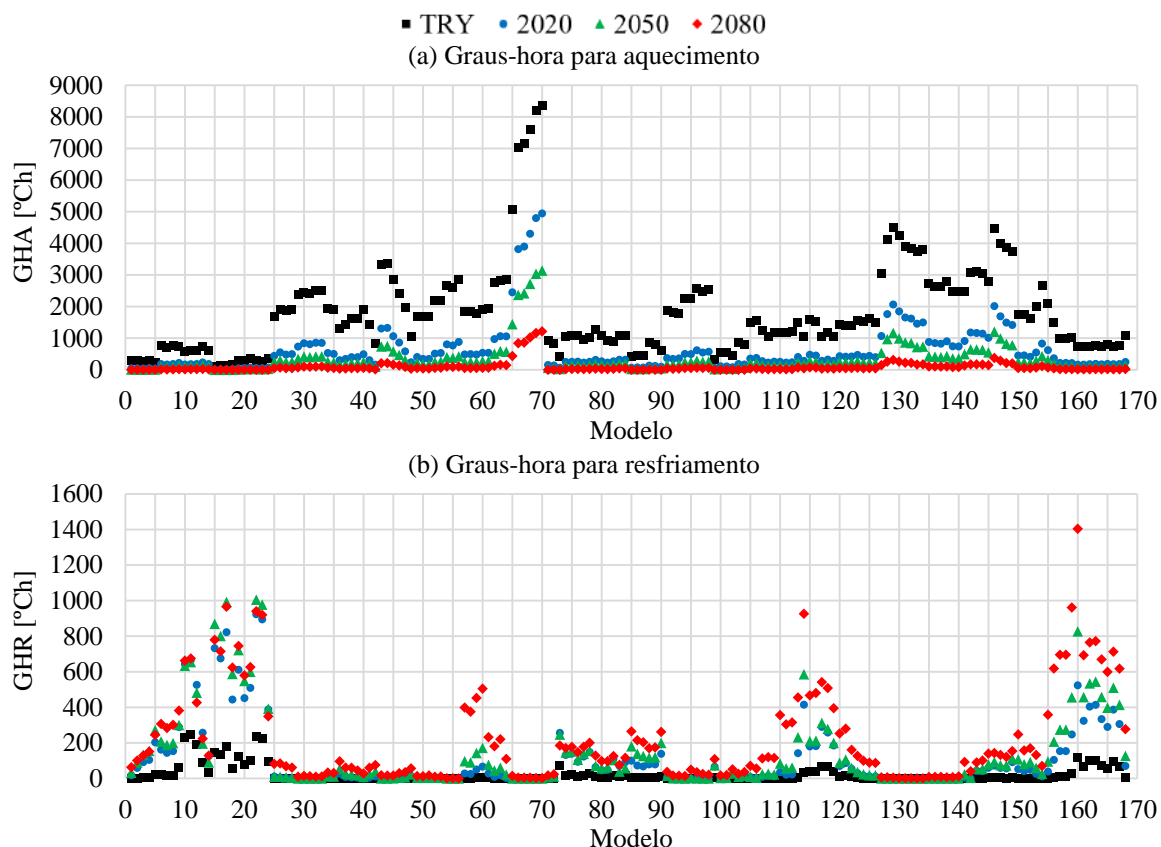


Figura 21 - Indicadores de desempenho de cada modelo da amostra, para os diferentes períodos climáticos de Curitiba



Discussão

Nesta seção, analisam-se as progressões de variáveis climáticas, em particular a temperatura do ar, e os índices de sensibilidade obtidos na pesquisa, confrontando-os com alguns resultados observados em trabalhos correlatos disponíveis na bibliografia. Nesse contexto, 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.

As progressões de variáveis climáticas conduzem informações importantes – e preocupantes – a respeito de alterações no clima ao qual edificações brasileiras estarão sujeitas nos próximos anos, durante sua vida útil. A elevação da temperatura, principalmente, é um fator crucial que deve afetar o conforto térmico dos usuários das edificações, influenciando em sua qualidade de vida. Em relação aos dados meteorológicos dos arquivos climáticos TRY, nas projeções para o período atual, 2020 (2011–2040), a temperatura média anual do ar de Belém, Brasília, São Paulo, e Curitiba, é superior em 1,33 °C, 1,14 °C, 0,91 °C, e 1,08 °C. Além disso, estima-se que, até 2100, será superior em 5,06 °C, 4,60 °C, 4,23 °C e 4,65 °C, respectivamente. Os resultados obtidos nas progressões corroboram o relatório “Mudanças Climáticas e Cidades”, do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (PAINEL..., 2016), que expõe impactos esperados em cidades brasileiras e aponta que a resiliência das edificações é um ponto-chave para alternativas de adaptação e mitigação frente ao contexto climático nacional.

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 (SILVA, 2016; SILVA; ALMEIDA; GHISI, 2016; ZARA, 2019). Adicionalmente, como observado previamente no estudo de De Wilde e Tian (2010), a importância das variáveis termofísicas é muito sensível às mudanças climáticas, 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, especialmente nos períodos futuros, os índices de sensibilidade mostram que a absorvância 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 Silva, Almeida e Ghisi (2016), que pesquisaram o desempenho termoenergético de uma habitação em Belém, por meio do arquivo climático TRY da cidade; também empregando o método de Morris para as análises de sensibilidade, mas ponderando os indicadores de desempenho de cada ambiente de permanência prolongada. 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 ponderado da edificação. Nesse sentido, há que se considerar que, além do fato de os autores terem ponderado os graus-hora, 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 observada neste estudo, focado em um ambiente.

Em São Paulo e Curitiba, que apresentaram mudanças mais expressivas em suas características climáticas, os índices de sensibilidade mais importantes para o GHR, que representam o conforto térmico, incluem a orientação solar e o fator de ventilação. Quanto ao fator de ventilação, cabe mencionar que o aumento da sua importância em períodos futuros, principalmente para o indicador GHR no clima de São Paulo, corrobora os resultados de Tateoka e Duarte (2017), que também perceberam a relevância da ventilação natural em cenários de mudanças climáticas na capital paulista. Além disso, acerca da importância da orientação solar, é interessante notar que, devido ao fato de São Paulo e Curitiba possuírem latitudes mais elevadas, a parede orientada para o norte fica mais exposta à radiação solar (sol mais baixo durante o inverno); logo, essa situação e os índices de sensibilidade permitem constatar a interação entre a orientação solar e as propriedades das paredes.

A partir dos índices de sensibilidade para os graus-hora de aquecimento e resfriamento, de acordo com o exposto na bibliografia, como em Invidiata e Ghisi (2016) e Triana, Lamberts e Sassi (2018), entende-se que o consumo de energia para aquecimento de edificações brasileiras em climas amenos, como São Paulo e Curitiba, tende a diminuir muito nos períodos futuros, enquanto o consumo de energia para resfriamento tende a aumentar. Ressalta-se que os trabalhos da bibliografia analisaram o consumo de energia com aquecimento, não tendo levado em consideração os graus-hora para aquecimento (edificação naturalmente ventilada).

Por fim, convém esclarecer que este artigo não pretendeu determinar quais parâmetros específicos proporcionam o melhor desempenho ao ambiente construído, porém, por meio dos índices de sensibilidade, pôde-se perceber, por exemplo, a relevância da ventilação natural, absorvância solar, e orientação solar na concepção da construção, em detrimento de temperaturas mais elevadas no futuro. Apenas com o método aplicado, não é possível afirmar quais valores de variáveis termofísicas devem ser praticados para garantir a melhor resposta térmica do ambiente construído; mas as saídas dos modelos da amostra, ilustradas nas Figuras 12, 15, 18 e 21, sugeriram que, considerando algumas variáveis que se destacaram nos diferentes cenários, os melhores indicadores de desempenho térmico frente a temperaturas mais elevadas ocorreram em combinações com fator de ventilação de 0,43 a 0,9; absorvância solar de 0,2 a 0,4; e orientação solar 0° ou 180° (janela voltada para o norte ou sul). Há que se ponderar que os valores citados são intrínsecos à amostragem criada, no âmbito do método aplicado nesta pesquisa.

Conclusões

Diante da necessidade e relevância de estudos referentes ao desempenho térmico de habitações brasileiras, considerando-se os efeitos das mudanças climáticas, este trabalho contribuiu com resultados para dois tópicos principais, de acordo com as etapas de pesquisa: ao analisar projeções de climas futuros em quatro cidades brasileiras; e ao determinar a sensibilidade de parâmetros construtivos frente a essas variações de climas.

Os resultados desta pesquisa permitem concluir que:

- (a) as mudanças climáticas podem provocar alterações determinantes nas condições às quais as edificações brasileiras estão sujeitas durante sua vida útil.
- (b) as mudanças no clima local influenciam na sensibilidade de variáveis termofísicas que refletem o desempenho térmico do ambiente construído. Para o indicador GHR, em Belém e Brasília, o fator de ventilação e a capacidade e transmitância térmica das paredes se destacaram, sem muitas variações na ordem de influência no modelo simulado nos diferentes períodos climáticos. Por outro lado, em São Paulo e Curitiba, a orientação solar e a absorvância solar da cobertura foram mais importantes nas simulações para os

períodos TRY, 2020 e 2050, enquanto no período 2080 o fator de ventilação passou a ser o parâmetro mais influente, além de outras variações;

(c) os efeitos das mudanças climáticas impactam significativamente o desempenho térmico de ambientes residenciais, sobretudo nos climas de São Paulo e Curitiba, que deverão passar por mudanças mais impactantes, fazendo com que o desconforto por frio diminua, e o desconforto por calor aumente;

(d) diante de temperaturas mais elevadas no futuro, principalmente, a ventilação natural caracteriza uma relevante estratégia de aumento de desempenho térmico; e

(e) o projeto de edificações deve, necessariamente, considerar projeções de mudanças climáticas, de modo que o ambiente construído possua resiliência em seu desempenho.

Convém destacar que este artigo se limitou a analisar apenas um ambiente de permanência prolongada, para maior aprofundamento e coerência no entendimento dos dados – com a análise isolada, evitam-se resultados médios de todos os ambientes. O artigo compõe uma pesquisa mais ampla e abrangente, onde se analisa o desempenho térmico e energético de toda a edificação. Em complemento às limitações do trabalho, os resultados de desempenho térmico são válidos para as características de um ambiente de uma tipologia residencial típica, segundo as considerações adotadas de arquitetura, uso, ocupação e operação, situada sob as condições climáticas descritas de Belém, Brasília, São Paulo e Curitiba. Adicionalmente, cumpre reiterar que as progressões climáticas consideraram o cenário A2 de emissões, segundo o IPCC, e, nesse âmbito, 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.

De modo a ampliar o conhecimento científico acerca do tema e rever as limitações deste trabalho, pesquisas futuras são importantes. Estudos complementares poderiam considerar, por exemplo, outras variáveis que contemplam o projeto de edificações e que são abrangidas pelas simulações. Além disso, esses estudos poderiam analisar outros cenários climáticos, bem como outros períodos e, ainda, diferentes tipologias de edificações, buscando entender se, e como, essas variações metodológicas afetariam a importância de parâmetros construtivos ao longo da vida útil do ambiente construído.

Referências

ALVARES, C. A. *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.

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.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **Standard 55**: thermal environmental conditions for human occupancy. Atlanta, GA, 2017a.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **Fundamentals**. Atlanta, GA, 2017b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS; COMITÊ BRASILEIRO DE REFRIGERAÇÃO, AR-CONDICIONADO, VENTILAÇÃO E AQUECIMENTO-055. **NBR 16401-2**: instalações de ar-condicionado: sistemas centrais e unitários: parte 2: parâmetros de conforto térmico. São Paulo, 2017. 3º projeto de revisão (novembro de 2017).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-3**: desempenho térmico de edificações: parte 3: zoneamento bioclimático brasileiro e estratégias de condicionamento térmico passivo para habitações de interesse social. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575**: edificações habitacionais: desempenho. Rio de Janeiro, 2013.

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.

BRANGER, F. *et al.* Global sensitivity analysis of an energy-economy model of the residential building sector. **Environmental Modelling & Software**, v. 70, p. 45–54, 2015.

- CAMPOLONGO, F.; CARIBONI, J.; SALTELLI, A. An effective screening design for sensitivity analysis of large models. **Environmental Modelling & Software**, v. 22, n. 10, p. 1509–1518, 2007.
- CARLO, J. C.; LAMBERTS, R. **Processamento de arquivos climáticos para simulação do desempenho energético de edificações**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2005. Eletrobrás/PROCEL, AET N 02/04, Laboratório de Eficiência Energética em Edificações.
- CASAGRANDE, B. G. **Cenários climáticos futuros: diagnóstico prospectivo do desempenho termoenergético de edifícios comerciais no Brasil para o século XXI**. Vitória, 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2013.
- 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.
- 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, n. 10, p. 1674–1684, 2010.
- 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.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2007: synthesis report**. Geneva, 2007. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2014: synthesis report**. Geneva, 2014. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- 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.
- JENTSCH, M. F. *et al.* 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.
- JENTSCH, M. F.; JAMES, P. A. B.; BAHAI, A. S. **CCWorldWeatherGen software: manual for CCWorldWeatherGen climate change world weather file generator**. Southampton: University of Southampton, 2012.
- 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, p. 111–142, 1997.
- MCKINSEY & COMPANY. **Pathways to a Low-Carbon Economy**. Atlanta, 2009.
- MORRIS, M. D. Factorial sampling plans for preliminary computational experiments. **Technometrics**, v. 33, n. 2, p. 161–173, 1991.
- NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. **Global Temperature**. 2021. Disponível em: <https://climate.nasa.gov/vital-signs/global-temperature/>. Acesso em: 21 jan. 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**, v. 48, p. 46–61, 2020.
- PAINEL BRASILEIRO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS. **Mudanças climáticas e cidades**. Rio de Janeiro, 2016. Relatório Especial do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas.
- PEEL, M. C.; FINLAYSON, B. L.; MCMAHON, T. A. Updated world map of the Koppen-Geiger climate classification. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 11, p. 1633–1644, 2007.
- 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.
- SALTELLI, A. *et al.* **Global sensitivity analysis: the primer**. Chichester: John Wiley and Sons Ltd., 2008.
- SILVA, A. S. **Desenvolvimento de um método para avaliação do desempenho térmico e energético de edificações aplicando análise de incertezas e sensibilidade**. Florianópolis, 2016. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

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.

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

TATEOKA, S. S.; DUARTE, D. H. Adaptação às mudanças climáticas: desafios para requalificação de edifícios existentes em São Paulo. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 14.; ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 10., Balneário Camboriú, 2017. **Anais [...]** Balneário Camboriú, 2017.

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

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.

UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY. **EnergyPlus input output reference**. Washington, 2015.

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

WILLIAMS, D. *et al.* 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.

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

Agradecimentos

À CAPES, pelo apoio financeiro que contribuiu para o desenvolvimento desta pesquisa.

Gustavo Henrique Nunes

Departamento de Construção Civil | Universidade Estadual de Londrina | Rod. Celso Garcia Cid, PR 445, Km 380, Campus Universitário | Londrina - PR - Brasil | CEP 86057-970 | Tel.: (43) 3371-4649 | E-mail: gustavo.henrique.nunes@uel.br

Thalita Gorban Ferreira Giglio

Departamento de Construção Civil | Universidade Estadual de Londrina | E-mail: thalita@uel.br

Ambiente Construído

Revista da Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído

Av. Osvaldo Aranha, 99 - 3º andar, Centro

Porto Alegre - RS - Brasil

CEP 90035-190

Telefone: +55 (51) 3308-4084

www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido

www.scielo.br/ac

E-mail: ambienteconstruido@ufrgs.br



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License.