ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE PARÂMETROS TERMOFÍSICOS DE HABITAÇÕES BRASILEIRAS SOB A INFLUÊNCIA DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Gustavo Henrique Nunes (1); Thalita Gorban Ferreira Giglio (2)
(1) Mestre em Engenharia Civil, Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, gustavo.henrique.nunes@uel.br
(2) Doutora em Engenharia Civil, Professora do Departamento de Construção Civil, thalita@uel.br

Universidade Estadual de Londrina, Centro de Tecnologia e Urbanismo, Departamento de Construção Civil, Londrina–PR, CEP 86051-990, Caixa Postal 6001, Telefone: (43) 3371-4649

RESUMO
Este estudo é focado no desempenho térmico de habitações brasileiras frente às mudanças climáticas. O objetivo da pesquisa foi analisar índices de sensibilidade global de parâmetros termofísicos de habitações em Belém e São Paulo, considerando os efeitos das mudanças climáticas. Para tanto, uma habitação de interesse social teve seu desempenho térmico simulado em diferentes condições ambientais, a partir de progressões de arquivos climáticos, obtidos por meio da ferramenta *CCWorldWeatherGen*, para os períodos 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 resultados dos índices de sensibilidade de Morris comprovaram que as mudanças climáticas, além de influenciarem no desempenho térmico de ambientes residenciais, influenciam na importância dos parâmetros termofísicos, principalmente no clima de São Paulo. Em Belém, os parâmetros mais importantes ao longo dos períodos simulados foram o fator de ventilação, e a transmitância e capacidade térmica das paredes. Em São Paulo, a orientação solar, a absortância solar da cobertura e o fator de ventilação foram mais importantes nas simulações até o período 2050, e no período 2080, o fator de ventilação passou a ser o parâmetro mais influente. De modo geral, conclui-se que o projeto de edificações deve, necessariamente, considerar projeções de mudanças climáticas, de modo 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 study focused on the thermal performance of Brazilian dwellings in view of climate change. The aim of this research was to analyze global sensitivity indexes of thermophysical parameters of dwellings in Belém and São Paulo, according to the effects of climate change. For this purpose, the thermal performance of a low-income housing was simulated in different environmental conditions, from progressions of weather files, obtained through the CCWorldWeatherGen tool, for the periods of the years 2020 (comprises 2011 to 2040), 2050 (comprises 2041 to 2070) and 2080 (comprises 2071 to 2100), according to the A2 emissions scenario of the Intergovernmental Panel on Climate Change. The Morris indexes proved that climate change, besides impacting the thermal performance of residential environments, influence the importance of the thermophysical parameters, especially in São Paulo climate. In Belém, the most important parameters over the simulated periods were the ventilation factor, and the transmittance and thermal capacity of the walls. In São Paulo, the solar orientation, the solar absorptance of the roof, and the ventilation factor were most important in the simulations until the period 2050, and in the period 2080, the ventilation factor became the most influential parameter. In general, it is concluded that buildings design must necessarily consider projections of climate change, for the built environment to be resilient in its performance.

Keywords: adaptive thermal comfort, building simulation, global warming, Morris method, thermal performance of buildings.

1. 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 (2021), 2020 foi o ano mais quente da história, com anomalia de temperatura 1,02 ºC 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 (IPCC, 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 OF SOUTHAMPTON, 2020) foi elaborada para a progressão de arquivos climáticos futuros, referentes aos períodos 2020 (que compreende o intervalo de anos entre 2011 e 2040), 2050 (que compreende o intervalo de anos entre 2041 e 2070) e 2080 (que 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 SRES-A2 do IPCC (IPCC, 2007). Este 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. No entanto, embora alguns estudos no exterior já busquem avaliações mais aprofundadas, baseadas em análises de sensibilidade de variáveis projetuais, por exemplo, no Brasil ainda há carência de investigações com esse nível de aplicação.

Esta pesquisa contribui para o avanço das discussões e do conhecimento científico sobre os efeitos das mudanças climáticas nas edificações. No trabalho, são apresentados índices de sensibilidade de parâmetros termofísicos relacionados ao desempenho térmico de habitações. As 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.

2. OBJETIVO

O objetivo deste artigo foi analisar os índices de sensibilidade global de parâmetros termofísicos de desempenho de habitações em Belém e São Paulo, considerando os efeitos das mudanças climáticas no desempenho térmico de uma habitação de interesse social.

3. MÉTODO

Para atender ao objetivo, por meio de simulações computacionais paramétricas e análises de sensibilidade global com os Efeitos Elementares de Morris, observou-se a influência de parâmetros termofísicos no desempenho térmico do ambiente construído, frente à 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 parâmetros termofísicos da edificação.

3.1. Objeto de estudo

O objeto de estudo consiste em uma residência unifamiliar isolada com tipologia baseada nos padrões de habitações de interesse social, conforme ilustra-se 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.

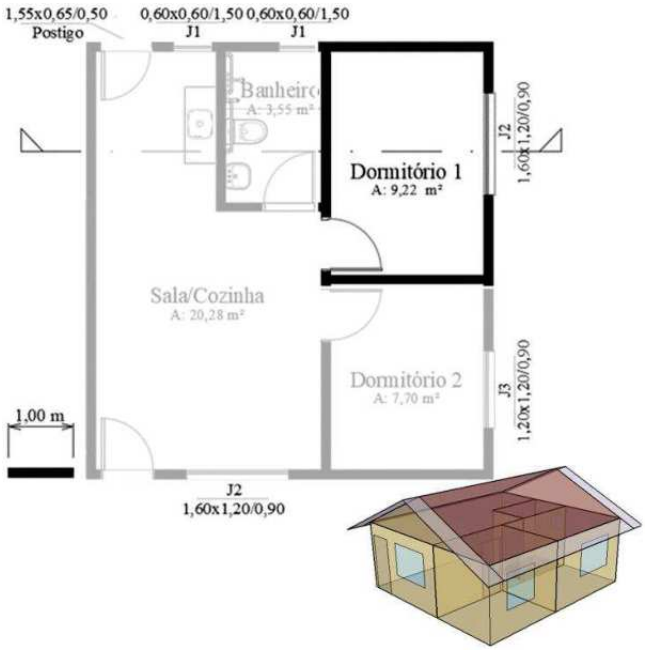

Figura 1 – Planta baixa e modelo 3D da habitação

3.2. 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 (IPCC, 2014; NASA, 2021). A fim de se obter resultados para climas com comportamentos distintos, esta pesquisa foi desenvolvida para duas cidades estratégicas para representação do cenário brasileiro: Belém e São Paulo. 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, segundo o último relatório de avaliação do IPCC (IPCC, 2014).

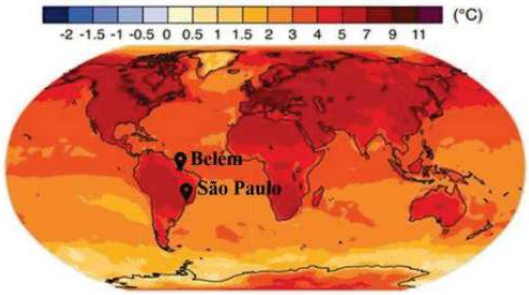

Figura 2 – Localização de Belém e São Paulo, em um mapa de previsão de aumento da temperatura máxima diária do ar até 2100 (2081–2100), em relação a 1986–2005

Conforme a classificação climática mundial de Köppen-Geiger, Belém está inserida no tipo climático Af (clima equatorial), e São Paulo pertence ao tipo climático Cwa (clima subtropical) (ALVARES et al., 2013; PEEL; FINLAYSON; MCMAHON, 2007). Ademais, Belém está situada na zona bioclimática 8 da NBR 15220 (ABNT, 2005), que abrange 53,7% do território brasileiro, apresentando um clima quente e úmido, com altas temperaturas e precipitações ao longo de todo o ano; e São Paulo está situada na zona bioclimática 3 da NBR 15220 (ABNT, 2005), que abrange 6,5% do Brasil – principalmente as regiões sul e sudeste, onde se concentra a maior parte da população (IBGE, 2019) –, possuindo um clima ameno, com verões quentes e úmidos, e invernos pouco secos e frios.

As condições climáticas aplicadas nesta pesquisa, foram baseadas, primeiramente, nos arquivos dos anos climáticos de referência (TRY) de Belém (1964) e São Paulo (1954). Além disso, 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 SRES-A2 do IPCC. A ferramenta de progressão climática foi validada para um clima brasileiro, como se descreve em Nunes (2021).

3.3. 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) (CB3E, 2018), e referências técnicas da Sociedade Americana de Engenheiros de Aquecimento, Refrigeração e Ar Condicionado (ASHRAE) (ASHRAE, 2017a; ASHRAE, 2017b) e do Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE) (DOE, 2015). Na Figura 3, apresentam-se as rotinas com o padrão de ocupação e de acionamento da iluminação dos ambientes de permanência prolongada, e na Tabela 1, apresentam-se os parâmetros de fontes de calor para as simulações.

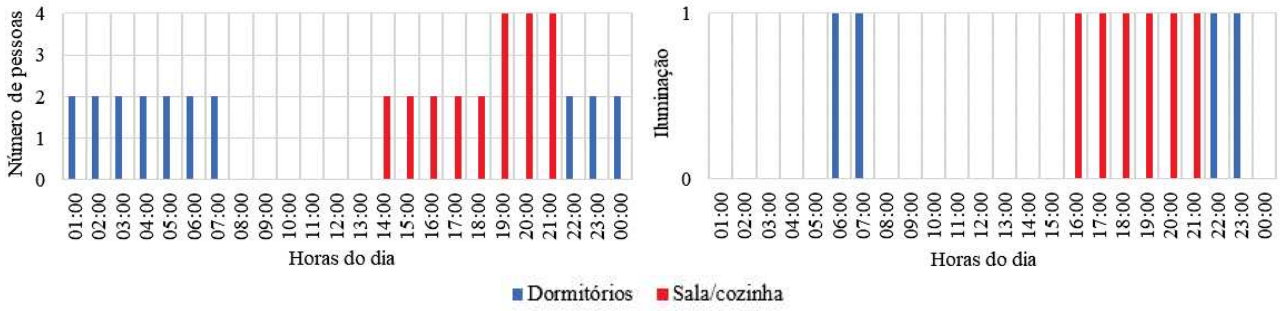

Figura 3 – Rotinas de ocupação e de acionamento da iluminação dos ambientes de permanência prolongada

Tabela 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/m²	5,0 W/m²
	Fração radiante	0,72	0,72
	Fração visível	0,18	0,18
Equipamentos	Densidade de cargas internas	–	120 W
	Fração radiante	–	0,5

Com relação à configuração do sistema de ventilação, foram considerados os critérios de operação da ventilação natural estabelecidos pela proposta da INI-R (CB3E, 2018), desconsiderando a possibilidade de acionamento de um sistema de ar-condicionado. Entende-se que essa decisão é 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 à 19 °C 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 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 do tipo 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.

3.4. Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade global, na fonte das incertezas de variáveis termofísicas, foi desenvolvida por meio do método de Morris (MORRIS, 1991), 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 da habitação, diante das mudanças climáticas em Belém e São Paulo.

Os índices de sensibilidade de Morris conseguem captar a influência das variáveis independentes na resposta do modelo (variáveis dependentes), possibilitando identificar parâmetros que possuem efeitos: (a) desprezíveis ou negligenciáveis (média baixa, desvio padrão baixo), (b) lineares e aditivos (média alta, desvio padrão baixo), e (c) não-lineares ou de segunda ordem (desvio padrão alto), quando estão em níveis distantes, como no caso dos parâmetros termofísicos 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 4, apresenta-se um esquema de classificação, em termos de linearidade, monoticidade 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).

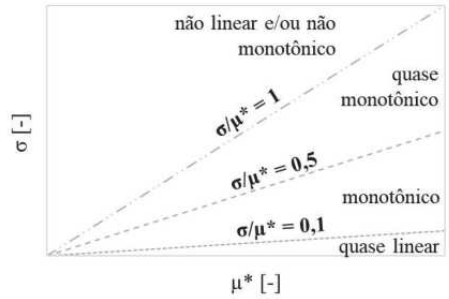

Figura 4 – Esquema genérico de classificação de parâmetros, a partir da relação σ/μ*

$$\mu = \frac{1}{r}\sum_{i=1}^{r} d_i \qquad \text{Equação 1}$$

$$\mu^* = \frac{1}{r}\sum_{i=1}^{r} |d_i| \qquad \text{Equação 2}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{(r-1)}\sum_{i=1}^{r} (d_i - \mu)^2} \qquad \text{Equação 3}$$

Em que, nas Equações 1, 2 e 3:
i é cada uma das variáveis independentes;
r é o número de trajetórias da amostra;
μ é a média dos efeitos elementares da i-ésima variável independente;
μ* 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;
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 (Tabela 2), gerando-se um tamanho de amostra igual a 168 para cada cidade e para cada um dos arquivos de períodos climáticos (TRY, 2020, 2050 e 2080). Dessa forma, um total de 1.344 simulações foram realizadas. Os procedimentos relacionados à análise de sensibilidade foram desenvolvidos com auxílio da linguagem de programação R, a partir de algoritmos desenvolvidos por Silva (2016).

3.4.1 Variáveis independentes (parâmetros de 'entrada')

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. Na Tabela 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.

Tabela 2 – Descrição das variáveis independentes para a análise de sensibilidade de Morris

Parâmetros termofísicos	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/m²K]	CTcob	{11 | 568}	185,67
Capacidade térmica das paredes [kJ/m²K]	CTpar	{40 | 445}	135,00
Capacidade térmica do piso [kJ/m²K]	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 [º]	OS	{0 | 270}	90
Transmitância solar e visível das venezianas das janelas (sombreamento) [-]	tvenez	{0,2 | 0,9}	0,23
Transmitância térmica da cobertura [W/m²K]	Ucob	{0,53 | 2,30}	1,36
Transmitância térmica das paredes externas [W/m²K]	Upar	{0,27 | 4,40}	1,38
Transmitância térmica do piso [W/m²K]	Upis	{0,72 | 4,67}	1,32

3.4.2 Variáveis dependentes (parâmetros de 'saída')

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 conforto térmico adaptativo 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* (ASHRAE, 2017), e admitindo-se a proposta de fixação do limite inferior em 19,5 ºC quando a temperatura média mensal do ar externo excede 16,5 °C, segundo a ABNT/CB-55 (2017). Na Figura 5, ilustra-se o intervalo de temperatura de conforto térmico, conforme os limites de aceitabilidade superior (LS) e inferior (LI).

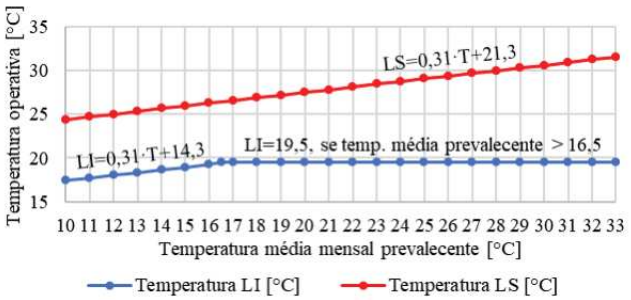

Figura 5 – Intervalo de temperatura de conforto térmico

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.

$$GHA_{dormit1} = \sum_{i=1}^{n} \left(T_{LI,mês} - T_{op_i,dormit1}\right), \text{se } T_{op_i,dormit1} < T_{LI,mês} \quad \text{Equação 4}$$

$$GHR_{dormit1} = \sum_{i=1}^{n} \left(T_{op_i,dormit1} - T_{LS,mês}\right), \text{se } T_{op_i,dormit1} > T_{LS,mês} \quad \text{Equação 5}$$

Em que, nas Equações 4 e 5:

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

4. RESULTADOS

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

4.1. Progressões climáticas

Nos subitens desta seção, apresentam-se as características das variáveis climáticas temperatura de bulbo seco, umidade relativa do ar, radiação solar global e velocidade do vento, de Belém e São Paulo, 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 SRES-A2 do IPCC.

4.1.1. Clima de Belém

As características das principais variáveis climáticas de Belém são ilustradas nos gráficos da Figura 6.

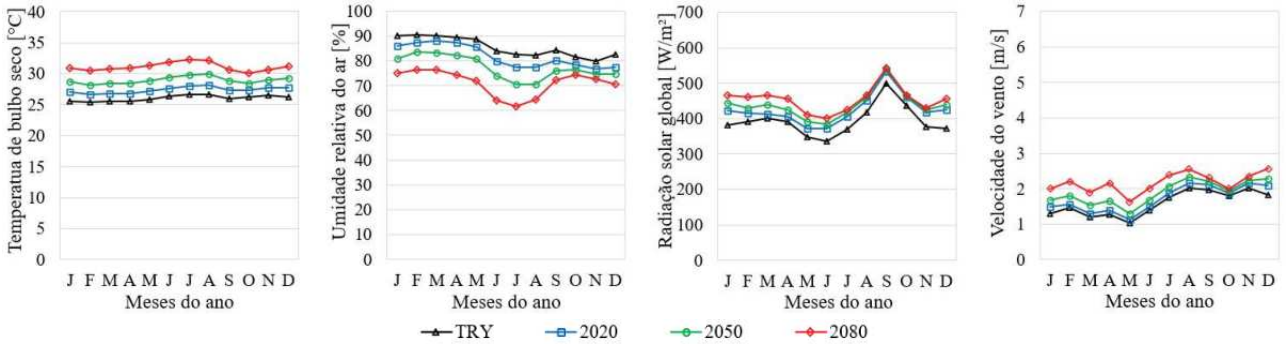

Figura 6 – Variáveis climáticas de Belém, conforme arquivo climático TRY e progressões para 2020, 2050 e 2080

Conforme as progressões, a temperatura média anual do ar aumentará, em relação aos dados TRY, 1,33 ºC no período 2020, 2,88 ºC no período 2050, e 5,06 ºC 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 períodos, alcançando 42,83 ºC 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 indicaram 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).

4.1.2. Clima de São Paulo

As características das principais variáveis climáticas de São Paulo são ilustradas nos gráficos da Figura 7.

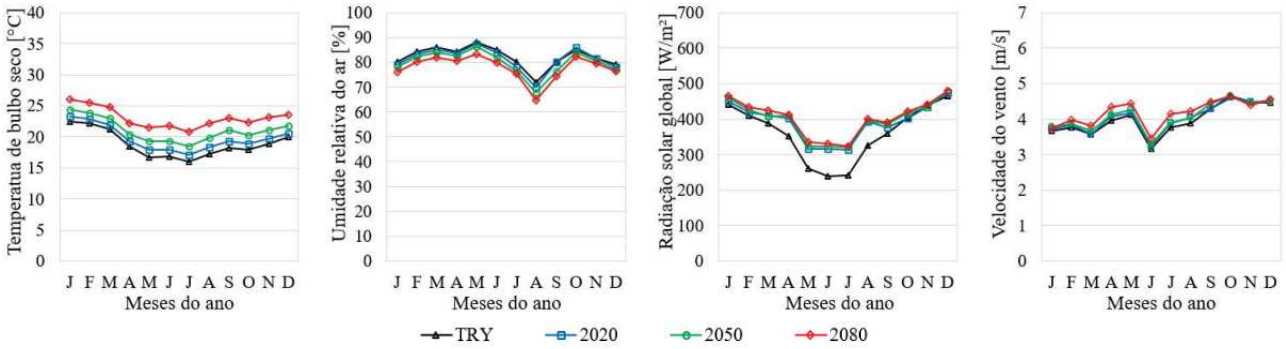

Figura 7 – Variáveis climáticas de São Paulo, conforme arquivo climático TRY e progressões para 2020, 2050 e 2080

Em relação aos dados do arquivo TRY de São Paulo, o aumento da temperatura média anual do ar foi estimado em 0,91 °C no período 2020, 2,24 °C no período 2050, e 4,23 °C no período 2080. Percebe-se que as mudanças sugerem ser mais relevantes no período de inverno. Com relação à umidade relativa, nota-se um declínio relativamente constante, conforme o passar dos anos. Estima-se que a média anual passará de 82,17%, no arquivo TRY, para 77,84%, até 2100. Já 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, sobretudo no período 2020. Por último, a média anual a 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.

4.2. Influência das mudanças climáticas na sensibilidade dos parâmetros termofísicos

Nos subitens desta seção, apresentam-se os resultados dos Efeitos Elementares de Morris para os parâmetros termofísicos investigados, de acordo com cada cidade e período climático.

4.2.1. Clima de Belém

Na Figura 8 e na Tabela 3, apresentam-se os resultados das análises de sensibilidade para Belém. Devido ao clima preponderantemente quente, os indicadores GHA foram nulos em todos os períodos considerados.

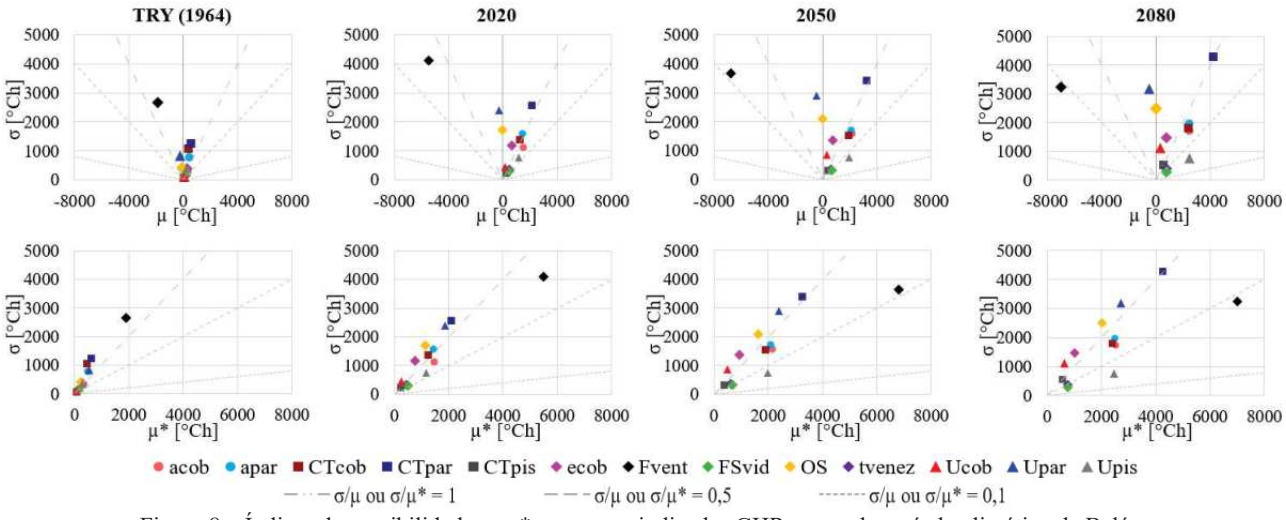

Figura 8 – Índices de sensibilidade μ, μ* e σ para o indicador GHR, em cada período climático de Belém

Conforme os resultados apresentados na Figura 8 e na Tabela 3, nota-se que o fator de ventilação foi o parâmetro com maiores médias em todos os quatro períodos climáticos analisados. Isso significa que esta 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 monoticidade 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 absortância 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 monoticidade 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.

Tabela 3 – Medida de sensibilidade μ* dos parâmetros termofísicos, para cada período climático de Belém

Par. termof.	GHR [°Ch]			
	TRY	2020	2050	2080
acob	313,23	1437,49	2124,73	2515,68
apar	445,61	1423,41	2071,58	2504,41
CTcob	424,12	1237,40	1900,33	2405,07
CTpar	601,19	2105,23	3247,39	4271,61
CTpis	48,32	232,43	375,63	582,27
ecob	272,86	782,67	940,52	1027,48
Fvent	1889,03	5503,40	6791,34	7013,77
FSvid	127,47	507,20	666,19	759,90
OS	215,84	1152,75	1620,95	2024,35
tvenez	108,91	440,97	632,45	761,98
Ucob	55,19	276,90	499,64	632,27
Upar	540,64	1876,20	2388,41	2712,38
Upis	266,21	1165,31	1971,45	2467,28

4.2.2. Clima de São Paulo

Nas Figuras 9 e 10 e na Tabela 4, apresentam-se os resultados das análises de sensibilidade para São Paulo.

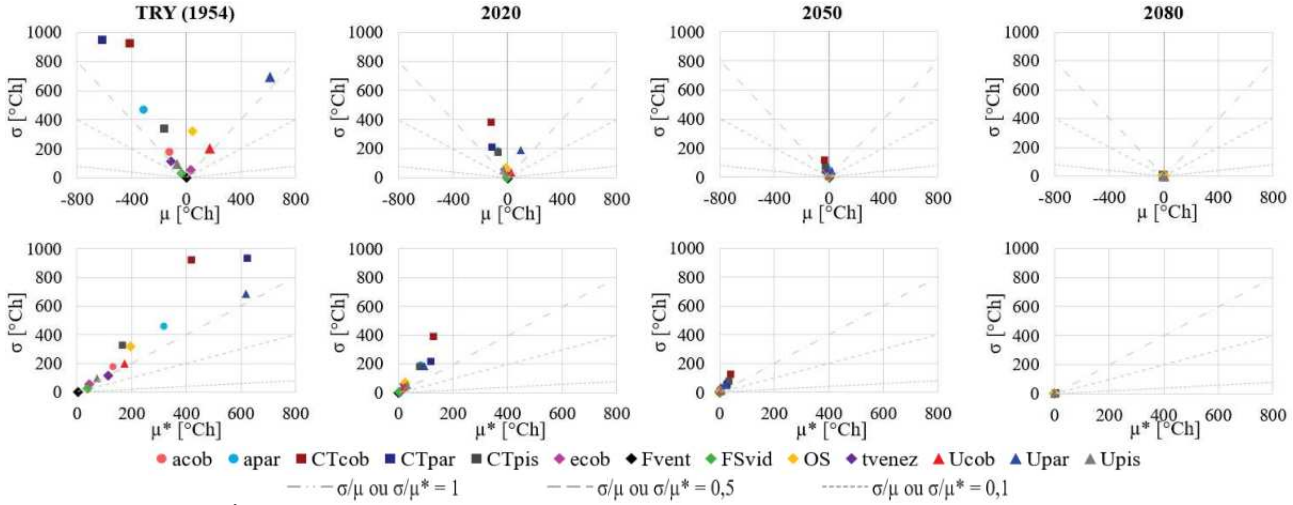

Figura 9 – Índices de sensibilidade μ, μ* e σ para o indicador GHA, em cada período climático de São Paulo

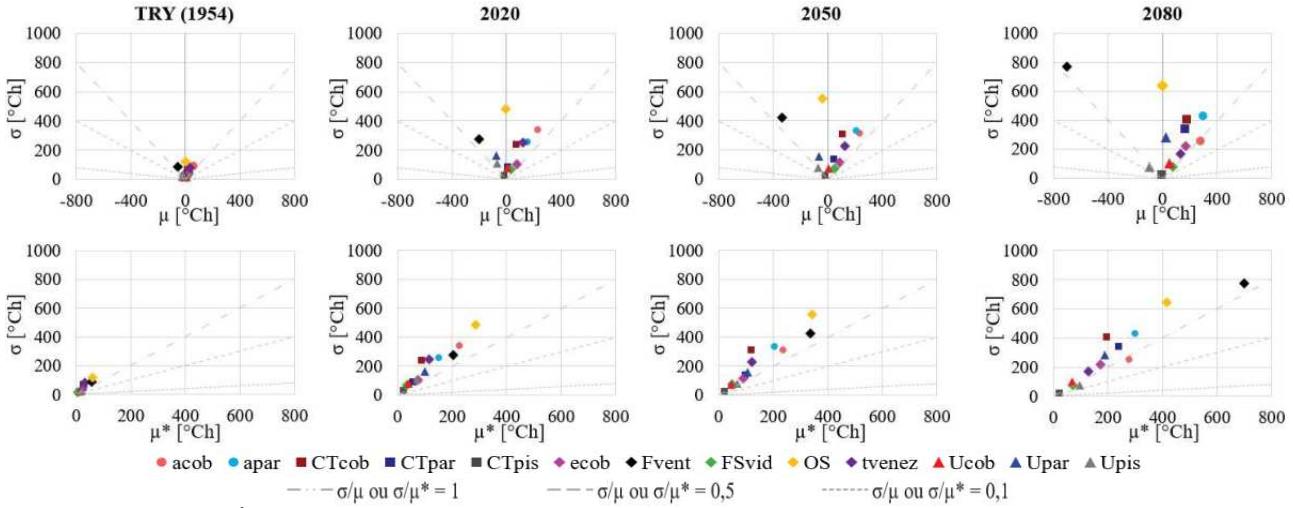

Figura 10 – Índices de sensibilidade μ, μ* e σ para o indicador GHR, em cada período climático de São Paulo

Os resultados apresentados na Figura 9 e na Tabela 4, 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.

Tabela 4 – Medida de sensibilidade μ* dos parâmetros termofísicos, para cada período climático de São Paulo

Par. termof.	GHA [°Ch]				GHR [°Ch]			
	TRY	2020	2050	2080	TRY	2020	2050	2080
acob	128,46	20,19	3,95	0,18	58,46	228,24	235,18	276,57
apar	312,78	77,21	22,36	2,10	28,80	151,69	205,64	298,40
CTcob	417,74	123,41	38,25	2,82	24,65	89,30	118,81	196,15
CTpar	618,90	117,62	24,70	1,40	12,94	57,48	98,40	239,39
CTpis	163,52	74,20	28,57	2,96	9,07	21,12	20,63	20,64
ecob	45,25	5,61	1,05	0,00	21,66	75,08	89,85	172,20
Fvent	2,43	0,26	0,04	0,00	56,92	203,91	337,30	698,59
FSvid	36,68	4,14	0,41	0,00	7,02	33,99	48,57	72,70
OS	196,73	25,62	2,69	0,06	60,63	287,42	342,80	414,93
tvenez	112,95	24,14	8,73	0,94	30,64	117,24	122,80	129,26
Ucob	171,74	23,31	4,05	0,00	11,26	39,35	45,11	67,63
Upar	618,22	94,92	20,63	0,92	20,20	100,99	105,31	188,15
Upis	70,97	30,73	7,59	0,38	17,77	72,04	67,98	95,81

Por sua vez, por meio da Figura 10 e Tabela 4, 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 absortância 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 absortância solar das paredes. Nota-se que, diferente de Belém, a influência da orientação solar na resposta do modelo se destaca, devido à latitude na qual São Paulo está situada.

Por último, os resultados dos índices de sensibilidade para os indicadores GHA e GHR do dormitório 1, em São Paulo, sugerem que a maioria dos parâmetros termofísicos 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.

5. CONCLUSÕES

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. Em relação aos dados meteorológicos dos arquivos climáticos TRY, no período atual, 2020 (2011–2040), a temperatura média anual do ar de Belém e São Paulo, é superior em 1,33 ºC e 0,91 ºC. Além disso, estima-se que, até 2100, será superior em 5,06 ºC e 4,23 ºC, respectivamente;
b) as mudanças no clima local influenciam na sensibilidade de parâmetros termofísicos que refletem o desempenho térmico do ambiente construído. Para o indicador GHR, em Belém, o fator de ventilação e a capacidade e transmitância térmica das paredes se destacaram, sem variações significativas na ordem de influência no modelo simulado nos diferentes períodos climáticos. Por outro lado, em São Paulo, a orientação solar, a absortância solar da cobertura e o fator de ventilação 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 no clima de São Paulo, que deverá 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) o projeto de edificações deve, necessariamente, considerar projeções de mudanças climáticas, de modo que o ambiente construído possua resiliência em seu desempenho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. 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.

_____. **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.

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.; 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.

ASHRAE. American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers. **Standard 55 – Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy**. Atlanta, GA, 2017a.

_____. **Fundamentals** (SI Edition). Atlanta, GA, 2017b.

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.

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.

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.

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.

DOE. United States Department of Energy. **EnergyPlus Input Output Reference**. 2015.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Estimativas da população residente com data de referência 1 de julho de 2019**. Brasília: IBGE, 2019. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/informacoes-por-cidade-e-estado. Acesso em: 08 fevereiro 2021.

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.

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.

_____. **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.

JENTSCH, M. F.; JAMES, P. A. B.; BAHAJ, A. S. **CCWorldWeatherGen software: Manual for CCWorldWeatherGen climate change world weather file generator**. University of Southampton. 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.

MCKINSEY & COMPANY. **Pathways to a Low-Carbon Economy**. 2009.

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

NASA. National Aeronautics and Space Administration. **Global Temperature**. 2021. Disponível em: <https://climate.nasa.gov/vital-signs/global-temperature/>. 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. H. **Influência das mudanças climáticas na sensibilidade global de parâmetros termofísicos de habitações brasileiras**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2021.

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.

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.

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.

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

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.

AGRADECIMENTOS

À CAPES, pelo apoio financeiro.