XIX Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído
ENTAC 2022

Ambiente Construído: Resiliente e Sustentável
Canela, Brasil, 9 a 11 novembro de 2022

Estimativa de temperaturas internas horárias de um apartamento ocupado em Curitiba (clima Cfb) utilizando regressão linear

Estimation of hourly indoor temperatures of an occupied apartment in Curitiba (Cfb climate) using linear regression

João Adolfo Moreira
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil | UFPR | Curitiba, PR | Brasil | joao.a.moreira@gmail.com
Leandro Carlos Fernandes
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil | UFPR | Curitiba, PR | Brasil | fernandes.ufpr@gmail.com
Rafael Ponce de Leon Amorim
Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo | UFPB | João Pessoa, PB | Brasil | rafael.ponce@ifpb.edu.br
Solange Maria Leder
Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo | UFPB | João Pessoa | Brasil | solangeleder@yahoo.com.br
Pedro Augusto Breda Fontão
Programa de Pós-Graduação em Geografia | UFPR | Curitiba, PR | Brasil | pedrofontao@yahoo.com.br

Resumo
Estimar temperaturas internas horárias de edificações ocupadas com métodos relativamente simples permite avaliar seu desempenho térmico e estimar o consumo energético. No entanto, o tema ainda é pouco explorado. Esta pesquisa teve como objetivo verificar a aplicabilidade do método de regressão linear para a estimativa de temperaturas internas em um apartamento ocupado na cidade de Curitiba. Para isso, foram monitoradas as temperaturas internas e externas do ar por 41 dias e calibradas equações para três situações do clima local. Os resultados mostraram que contextos não contemplados pelo período de calibração representaram um obstáculo para a precisão das estimativas.

Palavras-chave: Estimativa de temperaturas internas de edificações. Modelos preditivos. Desempenho térmico de edificações.

Como citar:
MOREIRA, J. A.; FERNANDES, L. C.; AMORIM, R. P. de L.; LEDER, S. M.; FONTÃO, P. A. B. Estimativa de temperaturas internas horárias de um apartamento ocupado em Curitiba (clima Cfb) utilizando regressão linear. *In*: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 19., 2022, Canela. **Anais**... Porto Alegre: ANTAC, 2022. p. XXX-XXX.

Abstract

Estimating hourly internal temperatures of occupied buildings with relatively simple methods allows evaluating their thermal performance and estimating energy consumption. However, the topic is still little explored. This research aimed to verify the applicability of the linear regression method to estimate internal temperatures in an occupied apartment in the city of Curitiba. For this, internal and external air temperatures were monitored for 41 days and equations were calibrated for three local climate situations. The results showed that contexts not covered by the calibration period represented an obstacle to the accuracy of the estimates.

Keywords: Estimation of building internal temperatures. Predictive models. Thermal performance of buildings.

INTRODUÇÃO

Temperaturas adequadas às demandas humanas são um propósito a ser obtido nas edificações naturalmente ventiladas. Nestas, os seres humanos tendem a preferir intervalos de temperatura restritos. A posição desses intervalos varia no tempo (ao longo das estações do ano) e no espaço (de uma região para a outra, conforme o clima) [1][2]. Para além das preferências, os intervalos de temperaturas e das amplitudes térmicas diárias (DTR) também são questão de saúde [3].

Atualmente, conta-se com normas técnicas que apresentam modelos capazes de predizer os intervalos de temperaturas aceitáveis com alguma precisão [4][5].

Diante do exposto, a possibilidade de se estimar temperaturas internas de edificações ocupadas e as respectivas amplitudes térmicas diárias é de grande interesse para a construção civil. Modelos preditivos de temperaturas internas horárias aliados aos modelos adaptativos possibilitam avaliar o desempenho térmico das edificações e estimar com mais precisão o consumo energético para condicionamento térmico em diferentes contextos climáticos.

De acordo com a teoria que dá sustentação aos modelos adaptativos, os seres humanos tendem a agir para manter as temperaturas internas dos ambientes dentro de intervalos aceitáveis [2].

Dito isso, é de se supor que quando as temperaturas externas estiverem próximas das desejadas para o ambiente interno a ação humana ocorra no sentido de promover a integração entre esses ambientes e de reduzir as diferenças de temperatura. Por outro lado, conforme as temperaturas externas se afastem dos patamares desejados para as internas, espera-se que a ação humana ocorra no sentido de reduzir as trocas com o ambiente externo e de aumentar as diferenças entre as temperaturas dos dois ambientes. Ou seja, para o modelo adaptativo, a intensidade da ação humana para regular as trocas com o ambiente externo não é constante. Em outras palavras, a intensidade da ação humana para isolar o ambiente interno varia conforme a diferença entre as temperaturas internas e externas.

Por motivos diversos, autores apontam dificuldade para se estimar o impacto da ação dos moradores sobre as temperaturas internas das edificações [6]. Em pesquisas com edificações condicionadas mecanicamente, essa dificuldade pode resultar em grandes diferenças quando comparados valores estimados e medidos de energia consumida

para climatização [7]. Consequentemente, o comportamento dos ocupantes dos edifícios está despertando cada vez mais interesse. Uma evidência é o aumento do número de publicações orientadas para o projeto centrado no ocupante (*occupant-centric building design*) [8]. Outra, é o fato da International Energy Agency - Energy in Buildings and Communities Program (IEA-EBC) possuir diversos projetos para investigação desta questão [9].

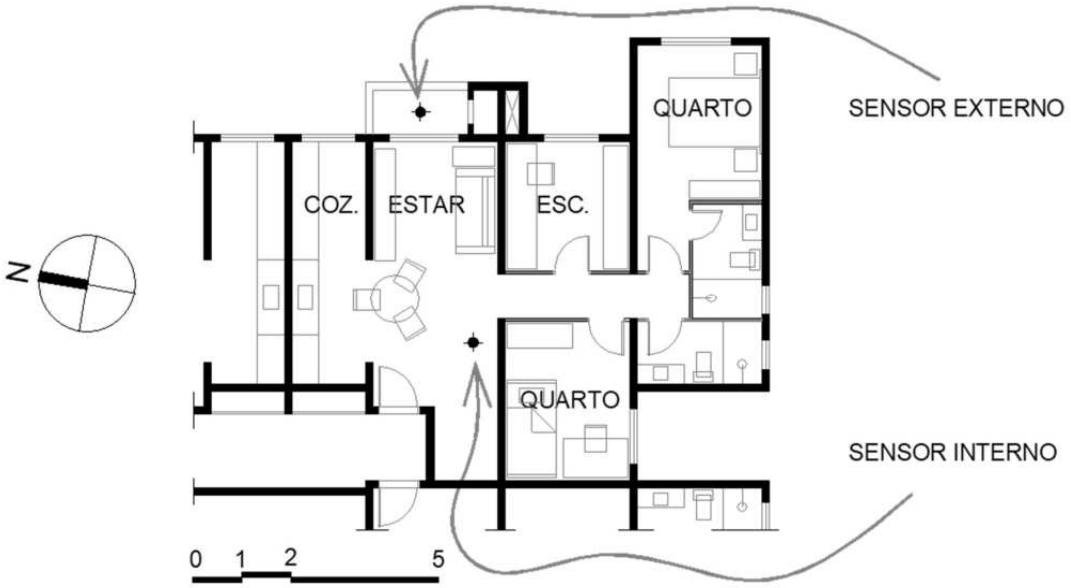
Em se tratando da estimativa de temperaturas internas horárias de edificações condicionadas naturalmente, é razoável supor que a presença dos moradores implique em um maior grau de dificuldade para alcançar estimativas satisfatoriamente precisas. No entanto, apesar das dificuldades relatadas pelas pesquisas com edificações condicionadas mecanicamente listadas anteriormente, Papst [10] registrou resultados promissores em pesquisa com moradias unifamiliares condicionadas naturalmente nas cidades de Florianópolis/SC e Curitiba/PR e utilizando regressão linear. Uma das vantagens desse método é o fato de utilizar períodos curtos para calibração dos modelos de regressão.

Esta pesquisa teve como objetivo verificar a aplicabilidade do método de regressão linear para a estimativa de temperaturas internas em um apartamento ocupado na cidade de Curitiba (clima do tipo Cfb), no Estado do Paraná.

MÉTODO

Os dados foram medidos em um apartamento situado no Bairro Cajuru, na cidade de Curitiba/PR. Na classificação de Köppen-Geiger, o clima de Curitiba é classificado como temperado, sem estação seca e com verão fresco, do tipo Cfb [11].
O apartamento (Figura 1) possui três quartos, está situado no primeiro andar e é voltado para leste. Durante o período de monitoramento, foi ocupado por duas pessoas. Foram instalados dois sensores de temperatura com *data logger*, um na sala de estar (em um ponto no qual não incide radiação solar direta) e outro na sacada, sob a laje do apartamento de cima (abrigado da chuva e da radiação solar direta).

Figura 1: Planta baixa do apartamento com a localização dos sensores de temperatura do ar.



Fonte: Os autores.

Para o monitoramento foi utilizado um *data logger* de temperatura da *Onset Computer Corporation*, do tipo HOBO (Figura 2, à esquerda). O aparelho opera no intervalo de medição de -20 °C até 70 °C, com precisão de mais ou menos 0,35 °C (0 a 50 °C) e com resolução de 0,024 °C. Foi configurado para registrar temperaturas a cada 10 minutos. Após a aquisição dos dados, a partir das médias de cada seis registros, foram gerados dados horários. No interior do apartamento, o data logger foi instalado em uma cesta metálica (Figura 2, ao centro) em um tripé, de maneira que ficasse a 1,10 m do piso (Figura 2, à direita), conforme recomendado pela ISO 7726 [12].

Figura 2: Aparelho utilizado para medir e registrar as temperaturas internas e externas do ar.



Fonte: Os autores.

MÉTODO PARA ESTIMATIVA DAS TEMPERATURAS INTERNAS DO AR

O método proposto por Papst [10] para estimativa de temperaturas internas utiliza regressão linear simples e é fundamentado na relação entre as temperaturas internas e as médias móveis das temperaturas externas.

Para sua aplicação, calculam-se diferentes médias móveis das temperaturas externas (Equação 1). A autora sugere calcular as médias móveis de duas horas anteriores até 72 horas anteriores [10]. Em seguida, mede-se a correlação linear (correlação de

Pearson) entre séries de temperaturas internas horárias e séries de médias móveis de temperaturas externas horárias. Para facilitar esta etapa, a autora sugere plotar os dados em gráficos chamados de correlogramas. A média móvel das temperaturas externas que apresentar a correlação mais forte com as temperaturas internas horárias será utilizada como variável explicativa para determinação do modelo de regressão linear simples (Equação 2).

Equação 1 – Para cálculo da média móvel simples das temperaturas externas horárias do ar.

$$T_{ex\ mms} = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} T_{ex}^{t}}{n}$$

Na qual:

n é o número de horas anteriores considerado para o cálculo da média móvel.

A estimativa das temperaturas internas utiliza a Equação 2.

Equação 2 – Para estimativa das temperaturas internas do ar.

$$T_{in}^{t} = a \times T_{ex\ mms} + b$$

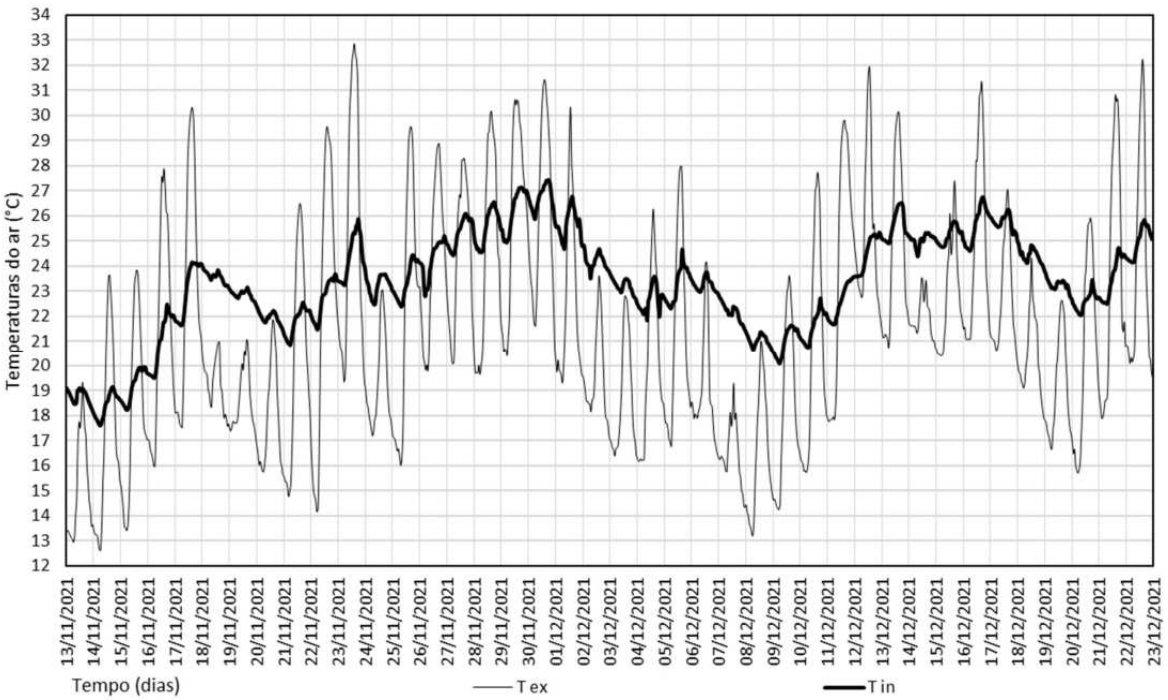
Na qual:

a é o coeficiente angular.

b é o coeficiente linear.

O período de monitoramento considerado nesta pesquisa iniciou no dia 13/11/2021, às 00:00 horas, e terminou no dia 23/12/2021, às 23:00 horas, abrangendo 41 dias (Figura 3). Durante esse período, o apartamento foi habitado por duas pessoas.

Figura 3: Temperaturas internas e externas do ar medidas ao longo dos 41 dias de monitoramento.



Fonte: Os autores.

Nesta pesquisa, para calibração das equações foram utilizados períodos de cinco dias (120 horas). As médias móveis foram calculadas para até 72 horas e os dados restantes

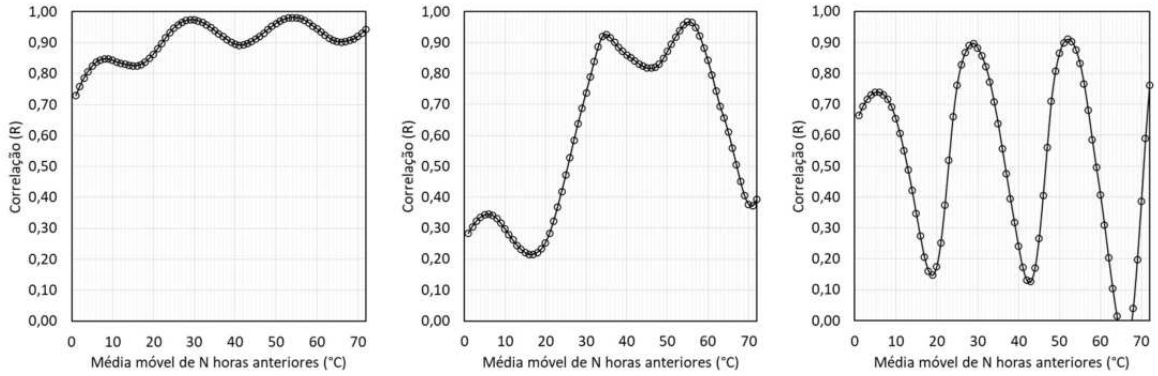
(48 horas) de cada período de cinco dias foram utilizados para medir a correlação das médias móveis das temperaturas externas com as temperaturas internas horárias.
Diante da grande variação das temperaturas no clima de Curitiba, para avaliar com mais segurança a aplicação do método de regressão linear, as médias móveis das temperaturas externas utilizadas para calibração do modelo foram calculadas para três contextos:

A) Com cinco dias com temperaturas médias diárias em ascensão (dias 13, 14, 15, 16 e 17 de novembro de 2021).
B) Com um período misto: dois dias com temperaturas médias diárias em ascensão, seguidos pela entrada de uma frente fria e três dias com temperaturas médias diárias em relativa estabilidade (dias 16, 17, 18, 19 e 20 de novembro de 2021).
C) Com cinco dias com temperaturas médias diárias semelhantes (dias 25, 26, 27, 28 e 29 de novembro de 2021).

RESULTADOS

Após o cálculo das médias móveis das temperaturas externas dos três diferentes períodos (A, B e C), as séries de médias móveis foram correlacionados com os dados medidos. Os valores dos coeficientes de correlação com cada média móvel foram plotados nos correlogramas. Os correlogramas dos três períodos se mostraram bastante diferentes. Para o período A, com valores mais estáveis, a maior correlação aconteceu com a média móvel das últimas 54 horas (R=0,98). Para o período B, no qual os valores das correlações apresentaram um "platô", a média móvel das últimas 55 horas resultou na maior correlação (R=0,97). E para o período C, no qual os valores oscilaram expressivamente, a média móvel que apresentou a maior correlação com os dados horários foi a das últimas 52 horas (R=0,91).

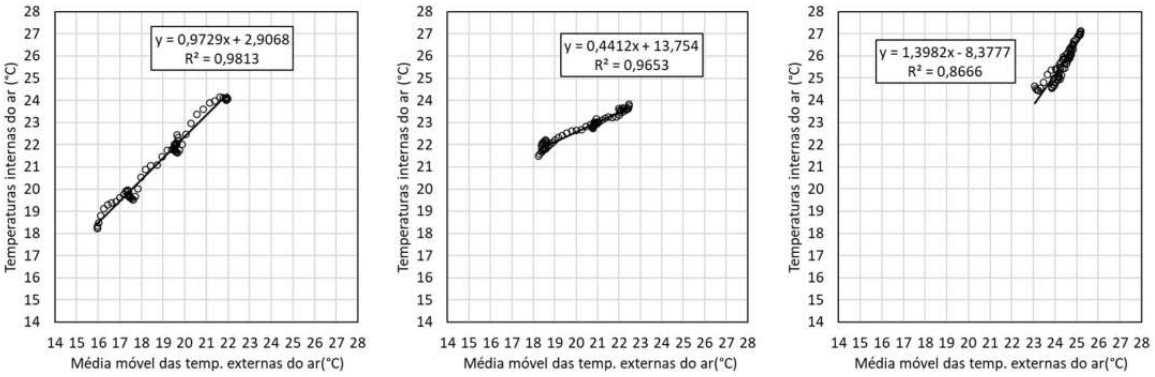
Figura 4: Correlogramas das séries de médias móveis das temperaturas externas versus as séries de temperaturas internas. Período A (à esquerda), período B (ao centro) e período C (à direita).



Fonte: os autores.

Quando foram gerados gráficos de dispersão (Figura 5) considerando as médias móveis com maior correlação e as temperaturas internas medidas, percebeu-se que as equações das retas obtidas apresentavam coeficientes angulares e lineares bastante diferentes.

Figura 5: Diagramas de dispersão relacionando as médias móveis das temperaturas externas com as temperaturas internas para os períodos A (à esquerda), B (ao centro) e C (à direita).



Fonte: Os autores.

As equações 3, 4 e 5 correspondem às equações para estimativas calibradas considerando os períodos para calibração A, B e C.

Equação 3 – Para estimativa das temperaturas internas do ar considerando o período de calibração A.

$$T_{in}^{t} = 0{,}9729 \times T_{ex\,mms} + 2{,}9068$$

Equação 4 – Para estimativa das temperaturas internas do ar considerando o período de calibração B.

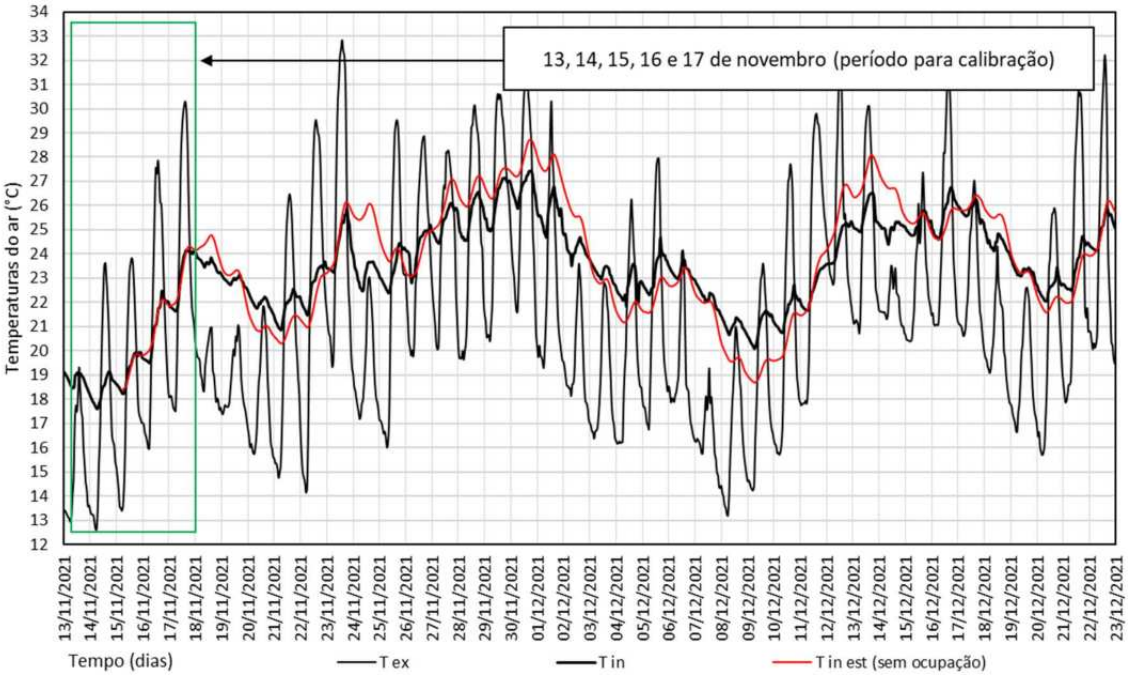
$$T_{in}^{t} = 0{,}4412 \times T_{ex\,mms} + 13{,}754$$

Equação 5 – Para estimativa das temperaturas internas do ar considerando o período de calibração C.

$$T_{in}^{t} = 1{,}3982 \times T_{ex\,mms} - 8{,}3777$$

Quando os dados estimados considerando o período de calibração A foram plotados juntamente com os dados medidos (Figura 6), observou-se que as estimativas foram satisfatórias para o período de calibração. No entanto, posteriormente, conforme as relações entre as temperaturas internas e externa se diferenciavam das condições observadas no período de calibração, as estimativas se tornavam menos precisas.

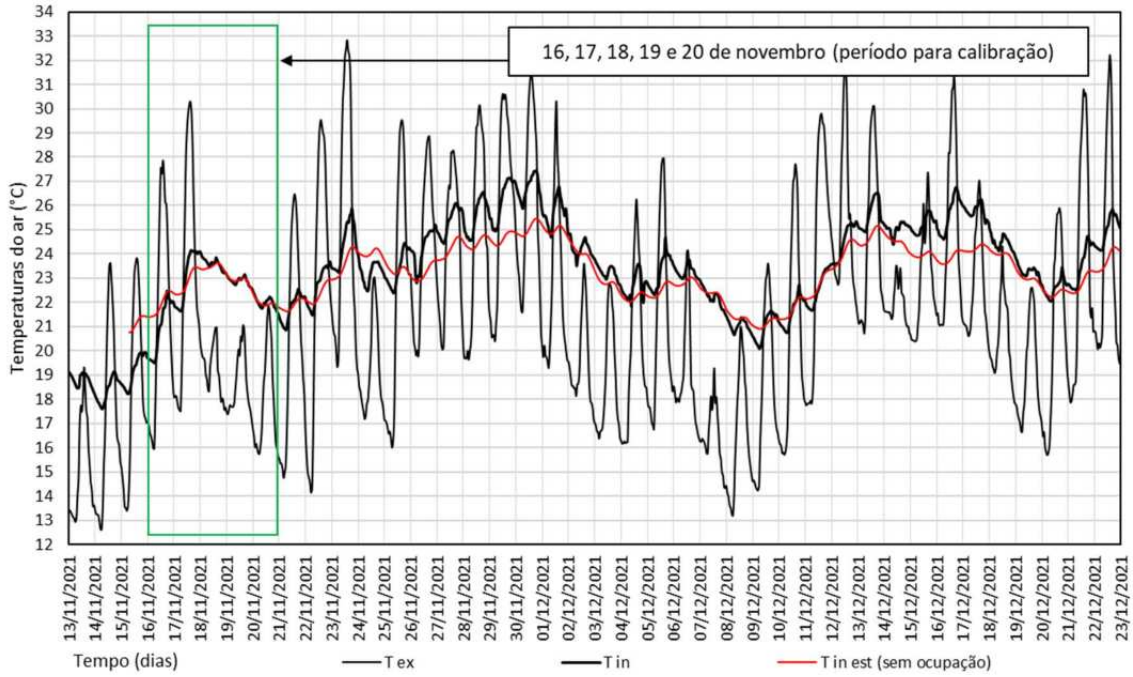
Figura 6: Temperaturas externas e internas medidas e temperaturas internas estimadas considerando o período para calibração A.



Fonte: Os autores.

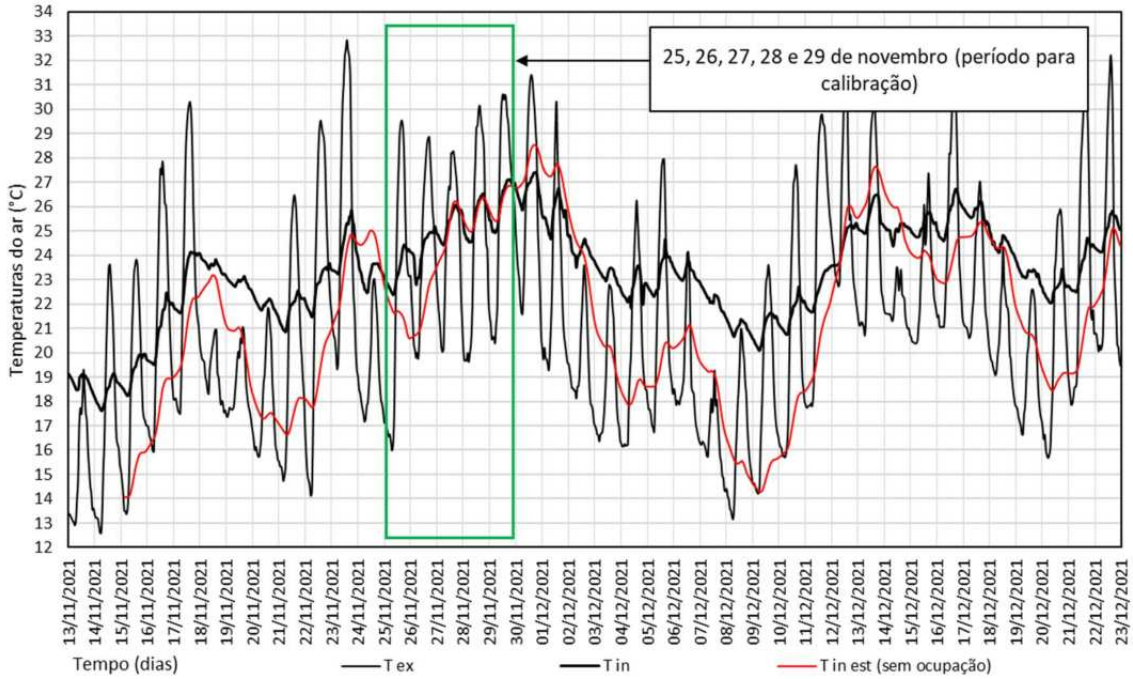
Observando as estimativas considerando o período de calibração B (Figura 7), percebeu-se que ocorreu algo semelhante ao observado quando considerado o período de calibração A. Estimativas precisas para contextos semelhantes ao do período de calibração e menos precisas para contextos diferentes. No entanto, quando a comparação foi feita considerando a equação calibrada com dados do período C (Figura 8), observou-se uma forte deterioração da precisão das estimativas. Aparentemente, a relativa estabilidade observada no período C impactou negativamente a calibração do modelo, resultando em estimativas imprecisas para o restante dos dias, que apresentaram diferenças marcantes entre si.

Figura 7: Temperaturas externas e internas medidas e temperaturas internas estimadas considerando o período para calibração B.



Fonte: Os autores.

Figura 8: Temperaturas externas e internas medidas e temperaturas internas estimadas considerando o período para calibração C.



Fonte: Os autores.

Por fim, para comparações mais objetivas, descontados os dias utilizados para calibração, para cada estimativa foram calculados os seguintes parâmetros: diferença máxima entre dados medidos e estimados; diferença média entre dados medidos e estimados; desvio padrão das diferenças; correlação entre dados medidos e estimados (R) e coeficiente de determinação (dados medidos *versus* estimados, R^2).

Analisando os valores apresentados na Tabela 1, pode-se afirmar que as correlações entre os dados medidos e estimados são satisfatórias (sempre acima de 0,8). Infelizmente, não se pode afirmar o mesmo das diferenças máximas e médias e nem do desvio padrão. Entre outras coisas, isso significa que as médias móveis das temperaturas externas usadas como variáveis explicativas apresentam oscilações nos mesmos momentos que as temperaturas internas horárias. No entanto, não há correspondência nas intensidades. Essa falta de correspondência pode ser devida a diferentes fatores, sendo que a ação dos usuários provavelmente é uma delas. Possivelmente, as estimativas sejam dificultadas pela ação dos usuários variar de intensidade, como a ideia do modelo adaptativo prevê: nos momentos em que as temperaturas externas se encontram em patamares adequados para os ambientes internos, os usuários atuam favoravelmente à integração dos ambientes térmicos; quando as temperaturas externas se encontram em patamares inadequados, os usuários atuam no sentido de diferenciar os ambientes. Por outro lado, as diferenças observadas entre os períodos de calibração e os períodos de aplicação dos modelos também parecem ser determinantes. Deste fato resulta a hipótese de que o modelo preditivo seja adequado para climas relativamente estáveis, mas inadequado para climas sujeitos a variações expressivas e sazonais nas suas temperaturas.

Tabela 1: Parâmetros para comparação entre dados medidos e estimados.

Parâmetro	Calibração a partir do período A	Calibração a partir do período B	Calibração a partir do período C
Diferença máxima entre dados medidos e estimados	3,00	2,63	6,46
Diferença média entre dados medidos e estimados	0,88	0,72	2,52
Desvio padrão das diferenças	0,63	0,56	1,59
Correlação entre dados medidos e estimados (R)	0,93	0,93	0,93
Coef. de determinação: dados medidos versus estimados (R^2)	0,87	0,86	0,86

Fonte: Os autores.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Segundo Papst [10], "A equação estimativa determinada a partir de temperaturas medidas em um ambiente é representativa (...) daquele ambiente, daquela ocupação e daquele clima". O que se observou nesta pesquisa foi que as equações determinadas por regressão linear também são *um produto de um momento específico*. Variações climáticas não contempladas pelo período de calibração podem representar um obstáculo e impactar a precisão das estimativas.

Na pesquisa original de Papst [10], a autora obteve bons resultados para unidades residenciais isoladas localizadas em Florianópolis/SC e em Curitiba/PR. Nesta pesquisa, o objeto de estudo era um apartamento com apenas duas faces em contato com o ambiente externo. As questões levantadas merecem ser investigadas. Ou seja, as diferenças entre os dados medidos e estimados podem estar sendo influenciadas pela dinâmica do clima local, pelo comportamento do usuário e pelas características da unidade habitacional. Para poder avaliar melhor o impacto destes fatores será necessário dar continuidade à pesquisa, contemplando também períodos sem ocupação no imóvel (ou seja, eliminando uma variável).

A descoberta obtida mostra que estimar temperaturas internas em moradias ocupadas é mais desafiador do que os autores previam. No entanto, o método possui grande potencial, como já foi demonstrado em pesquisas anteriores.

Para trabalhos futuros sugere-se verificar a possibilidade de gerar modelos para contextos típicos do clima em questão e automatizar o processo para estimativa fazendo com que a própria planilha eletrônica utilizada altere a equação preditiva conforme o contexto das temperaturas externas.

REFERÊNCIAS

[1] DE DEAR, R; BRAGER, GS; COOPER, D. **Developing an adaptive model of thermal comfort and preference - Final Report on RP-884**. Sydney: 1997. v. 104. Disponível em: <http://sydney.edu.au/architecture/documents/staff/richard_de_dear/RP884_Final_Report.pdf>. Acesso em: 12 jul. 2021.

[2] PARKINSON, T.; DE DEAR, R.; BRAGER, G. Nudging the adaptive thermal comfort model. **Energy and Buildings**, v. 206, n. December 2019, 2020.

[3] ZHENG, Shan et al. The effect of diurnal temperature range on blood pressure among 46,609 people in Northwestern China. **Science of the Total Environment**, v. 730, p. 138987, 2020.

[4] AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS - ASHRAE. Thermal environmental conditions for human occupancy. **ANSI/ASHRAE Standard - 55-2020**. United States of America: ASHRAE, 2020.

[5] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION - CEN. **EN 15251** - Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics. Brussels: CEN, 2007.

[6] CARLUCCI, S. *et al*. Modeling occupant behavior in buildings. **Building and Environment**, v. 174, n. December 2019, p. 106768, 2020.

[7] FAJILLA, G. *et al*. Assessment of the impact of Occupants' Behavior and climate change on heating and cooling energy needs of buildings. **Energies**, v. 13, n. 23, p. 5–7, 2020.

[8] AZAR, Elie et al. Simulation-aided occupant-centric building design: A critical review of tools, methods, and applications. **Energy and Buildings**, v. 224, p. 110292, 2020.

[9] YAN, Da et al. IEA EBC Annex 66: Definition and simulation of occupant behavior in buildings. **Energy and Buildings**, v. 156, p. 258–270, 2017.

[10] PAPST, Ana Lígia**. Método Estimativo da Temperatura Interna de Edificações Residenciais em Uso**. 2004. 179 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina, 2004.

[11] NITSCHE, P. R. *et al*. **Atlas climático do estado do Paraná**. Londrina: IAPAR - Instituto Agronômico do Paraná, 2019.

[12] INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION - ISO. **ISO 7726**, Ergonomics of the Thermal Environment, Instruments for Measuring Physical Quantities. Geneva: International Standard Organization, 1998.