XIX Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído
ENTAC 2022

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

Avaliação de um modelo preditivo de temperaturas do ar interno no clima semiárido

A predictive model of indoor air temperature evaluation in a semi-arid climate

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

Resumo

Modelos preditivos de temperatura do ar podem ser usados para melhorar a qualidade térmica em ambientes internos e o desempenho térmico do edifício. Este estudo avaliou um método simples de previsão de temperatura do ar no qual a temperatura do ar é estimada considerando a média móvel das temperaturas externas das horas anteriores através da implementação de regressão linear. Uma moradia naturalmente ventilada foi monitorada por 89 dias em Aracati/CE, localizada em clima semiárido. As estimativas foram avaliadas considerando a raiz quadrática média das diferenças e a diferença de viés médio. Por fim, observou-se um bom ajuste do método avaliado.

Palavras-chave: Desempenho térmico. Inércia térmica. Regressão Linear.

Como citar:
AMORIM, R. P. de L.; FERNANDES, L. C.; LEDER, S. M.; MOREIRA, J. A.; FONTÃO, P. A. B. Avaliação de um modelo preditivo de temperatura do ar interno no clima semiárido. *In*: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 19., 2022, Canela. **Anais**... Porto Alegre: ANTAC, 2022. p. XXX-XXX.

Abstract

Predictive models for air temperature can be used to improve the thermal quality in indoor environments and the building's thermal performance. This study evaluated a simple air temperature predictive method. The air temperature is estimated considering the moving average of the outdoor temperatures of previous hours by implementing linear regression. For this purpose, a naturally ventilated dwelling was measured for 89 days in Aracati/CE, located in a semi-arid climate. The results were evaluated considering the root mean square error and the mean bias error. It was evidenced the good adjustment of the estimated values to the measured data.

Keywords: Thermal performance. Thermal inertia. Linear Regression.

INTRODUÇÃO

Em edifícios naturalmente ventilados, a qualidade dos ambientes térmicos internos resulta da interação entre o usuário, o edifício e o clima. As propriedades térmicas dos materiais construtivos utilizados, a forma e a orientação, são determinantes para o desempenho térmico do edifício. Mas, quando em uso, o tipo de ocupação, considerando-se desde a operação das aberturas até as cargas térmicas internas geradas por equipamentos e usuários ganham importância.

Um dos aspectos afetados pelas características da edificação e da sua ocupação é a sua inércia térmica. A inércia térmica pode ser entendida como a capacidade do edifício de restringir a flutuação das temperaturas internas frente à flutuação das externas. Em ambientes com pouca inércia térmica a variação da temperatura externa e da radiação solar repercutem rapidamente no interior. Em ambientes com alta inércia térmica, esta influência é percebida mais lentamente devido ao atraso térmico [1]. Neste sentido, a inércia térmica é um fenômeno central no desempenho térmico do edifício e sua compreensão é fundamental para a proposição de modelos preditivos de temperatura do ar interno [2], objeto desta pesquisa.

Nos métodos preditivos de temperaturas internas do ar baseados em análises estatísticas, a inércia térmica é incorporada ao modelo sem a necessidade da caracterização minuciosa das propriedades termofísicas do edifício, pois as equações podem ser ajustadas considerando apenas dados estatísticos sobre a interação entre variáveis dos ambientes térmicos medidas *in loco* (temperatura do ar interno *versus* temperaturas do ar externo).

Nos modelos computacionais de simulação termo energética, os diversos parâmetros envolvidos podem ser especificados e avaliados individualmente. Assim, permitem a realização de uma análise paramétrica do edifício, desenvolvendo um importante papel nas etapas projetuais. Estes modelos são ferramentas importantes para a compreensão do desempenho dos edifícios, possibilitam uma investigação aprofundada sobre os fluxos de energia térmica na escala dos diversos elementos construtivos, identificando e quantificando as trocas de energia e assim, auxiliando a tomada de decisões projetuais. No entanto, a simulação computacional é um procedimento complexo que exige a identificação dos materiais, da geometria e do uso do edifício, além de demandar o domínio de softwares bastante específicos e sofisticados. Por outro lado, os modelos para estimativa de temperaturas internas, baseados em equações simplificadas, permitem uma investigação rápida e mais

abrangente. Ambas as ferramentas são importantes e úteis, mas cada uma delas tem seu foco.

Modelos preditivos de temperatura do ar interna possuem inúmeras aplicações, como a antecipação de picos energéticos nas edificações. Um modelo facilmente reprodutível pode ser aplicado a um conjunto de vários edifícios, permitindo predições de picos energéticos a nível urbano [3]. Esses modelos podem, também, ser particularmente importantes para verificação das condições térmicas das habitações de populações mais vulneráveis ao calor, como as crianças, os idosos, as pessoas com condições crônicas de saúde e a população de baixa renda. De acordo com o Centers for Disease Control and Prevention, a população idosa é a mais afetada por ter mais dificuldade em se adaptar às mudanças bruscas de temperatura e por ser mais propensa a ter uma condição médica crônica que altera as respostas normais do corpo ao calor e a tomar medicamentos que afetam a capacidade do corpo de controlar sua temperatura ou suor [3].

Um estudo tido como referência na proposição de equação para estimar temperaturas internas de edificações a partir de análises da estatística descritiva foi desenvolvido por Givoni [4]. Recentemente, as investigações sobre os modelos preditivos foram retomadas com o intuito de auxiliar a gestão do uso de energia elétrica em edifícios automatizados e de aprimorar a previsão de demanda energética em nível urbano. Grande parte desses métodos são bastante complexos, utilizam diversas variáveis e tem como base modelos RNA - Rede Neural Artificial [5][6][7][8][9][10].

Por outro lado, modelos mais simples e gerados a partir de variáveis facilmente obtidas resultam em boas estimativas de temperatura do ar em edifícios naturalmente ventilados e podem exercer um importante papel na proposição de políticas públicas habitacionais ao permitir a verificação do desempenho térmico das habitações de interesse social de maneira menos invasiva, e assim, contribuindo na avaliação pós-ocupacional dos edifícios. No Brasil, os modelos mais utilizados são: os baseados em regressão linear, como o modelo proposto por Papst [1][11]; e o baseado em taxas de variação das temperaturas [2][11][12].

Considerando o exposto, o presente estudo avaliou a adequabilidade do modelo preditivo baseado em regressão linear para a predição de temperaturas do ar interno em uma unidade habitacional localizada na cidade de Aracati / Ceará, que é caracterizada pelo clima semiárido, durante o período desocupado.

MODELO PREDITIVO DE PAPST

O modelo de Papst foi concebido para estimar a temperatura interna horária em edificações ocupadas [7]. Neste método, assume-se que cada edificação possui uma "assinatura térmica", conceito que está relacionado à inércia térmica, representando o comportamento térmico individual de cada ambiente em relação ao clima, às características construtivas e à ocupação.

A primeira etapa deste método consiste em calcular as médias móveis estatísticas (Mms) da temperatura externa (T_{ex}) para diferentes intervalos (número de horas anteriores) e na verificação de qual dessas médias móveis resulta na correlação mais forte com a temperatura interna (T_{in}) (Equação 1). Na segunda etapa, determina-se

uma equação de temperatura interna em função da média móvel das temperaturas externas através da análise de regressão (Equação 2). As variáveis utilizadas são: a temperatura interna como variável dependente e a média móvel das temperaturas externas de horas anteriores (T^t_{ex}), conforme Equação 1.

$$Mms = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} T_{ex}^{t}}{n} \qquad \text{Equação 1}$$

Onde:

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

$$T_{in}^{t} = a \times Mms + b \qquad \text{Equação 2}$$

Onde:
a é o coeficiente angular.
b é o coeficiente linear.

Este modelo foi validado considerando oito ambientes em três residências localizadas na cidade de Florianópolis/Santa Catarina (clima Cfa), e em 14 habitações de interesse social na Vila Tecnológica de Curitiba (clima Cfb) (PAPST, 2004). A autora concluiu que em todos os ambientes a temperatura interna horária apresentou correlação mais forte com a média da temperatura externa de horas anteriores do que com a média da radiação solar de horas anteriores. Por fim, sugere que o modelo deva ser aplicado e aferido em outros climas para verificação de sua adequabilidade.

MÉTODO

CONTEXTO CLIMÁTICO DE ARACATI

Localizada na região Nordeste Brasileira, Aracati é um município do estado do Ceará caracterizado pelo clima tropical de savana (As), de acordo com a classificação climática de Köppen-Geiger. Devido à inexistência de estações meteorológicas oficiais na cidade, optou-se por utilizar as normais climatológicas da cidade de Jaguaruana, que dista, aproximadamente 30 km, como referência para caracterização climática do local de estudo. Na Figura 1 pode-se observar a localização das referidas cidades.

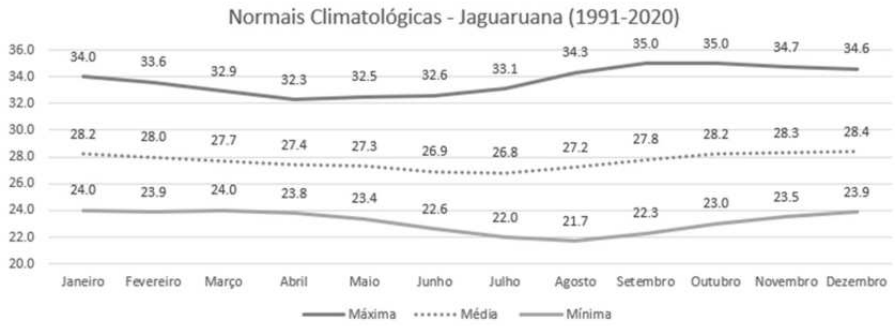
Figura 1: Localização das cidades Aracati e Jaguaruana.



Fonte: Editado a partir de https://pt.wikipedia.org/ e https://www.google.com.br/maps.

De acordo com as normais climatológicas (1991-2020) da cidade de Jaguaruana, a temperatura média anual é 27,7°C e amplitude média mensal é de 10,5°C. O trimestre mais frio é composto por junho, julho e agosto e os mais quentes por novembro, dezembro e janeiro. O mês mais seco é setembro e o mais úmido abril, resultando nos meses com maior e menor amplitude térmica, respectivamente, 12,7°C e 8,5°C, como pode ser visualizado no gráfico da Figura 2.

Figura 2: Variação mensal de temperatura do ar de acordo com as normais climatológicas para cidade de Jaguaruana no período de 1991 e 2020.



Fonte: https://portal.inmet.gov.br/normais.

EDIFICAÇÃO MONITORADA

Para esta pesquisa, tomou-se como objeto um apartamento no segundo piso de um edifício multifamiliar com dois pavimentos. A unidade tem cobertura em laje mista e telha de fibrocimento sem beiral. A envoltória é de alvenaria de tijolo cerâmico com 8 furos pintada na cor branca, todas as paredes externas estão soltas dos limites do lote. A unidade avaliada tem 67 m^2 e é composta por dois quartos, dois banheiros, sala, cozinha, área de serviço e varanda. O ambiente monitorado é a sala de estar, onde apenas a parede sudeste tem exposição ao ambiente externo, atenuada pela varanda, conforme pode ser visualizado na Figura 3.

Figura 3: Planta Baixa da unidade habitacional avaliada.



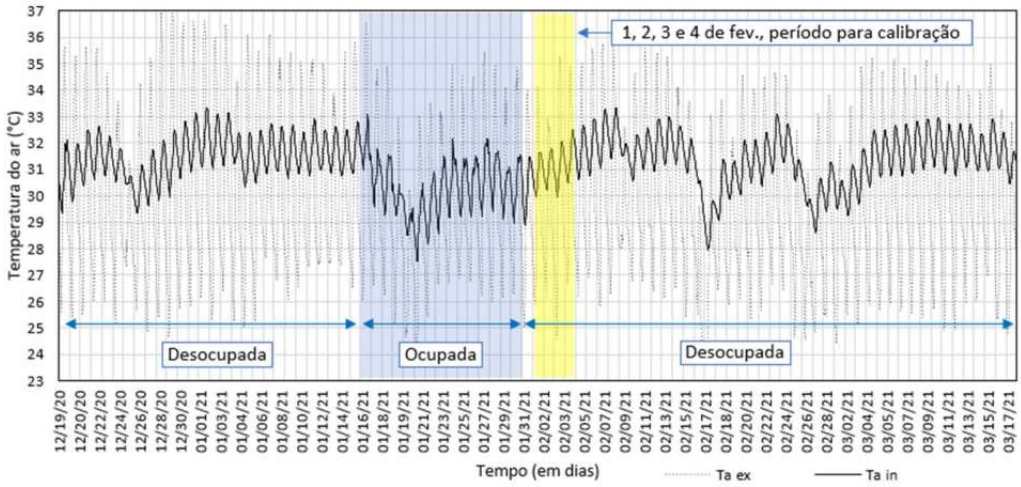
Fonte: Os autores.

PERÍODOS MONITORADOS

O monitoramento higrotérmico da habitação teve início no dia 18/12/2020 e foi concluído no dia 18/03/2021. Desconsiderando os dados dos dias de instalação e de retirada dos equipamentos, obteve-se uma sequência de 89 dias completos de dados.

Dessa sequência, do dia 19/12/2020 até o dia 15/01/2021 a residência permaneceu desocupada. Houve ocupação do dia 16/01/2021 até o dia 30/01/2021. O apartamento permanecendo desocupado durante o restante do período monitorado, conforme pode ser visto na Figura 4.

Figura 4: Temperaturas internas e externas monitoradas em Aracati/CE.



Fonte: Os autores.

EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

Para a coleta dos dados foram utilizados dois *dataloggers* de temperatura e umidade da marca ONSET, modelo HOBO U12. No ambiente interno o equipamento foi instalado à 80 cm do piso, no ambiente externo o equipamento foi instalado a 1,50 cm do piso, protegido por um abrigo meteorológico de PVC, marca ONSET, modelo RS1.

AVALIAÇÃO DOS DADOS ESTIMADOS

A verificação da adequação do modelo preditivo de Papst ao clima semiárido foi realizada a partir da análise estatística dos valores estimados de temperatura do ar durante o período desocupado. Incialmente foram avaliados os coeficientes de determinação. Em seguida, para avaliação da eficiência das predições foram utilizados os estimadores: raiz quadrática média das diferenças (RMSE) e diferença de viés médio (MBE). O valor do RMSE possibilita verificar a eficiência do modelo, considerando que quanto menor a variância melhor será o ajuste. Enquanto o valor do MBE indica a assimetria das diferenças, permite avaliar quanto o modelo subestima ou superestima a temperatura do ar.

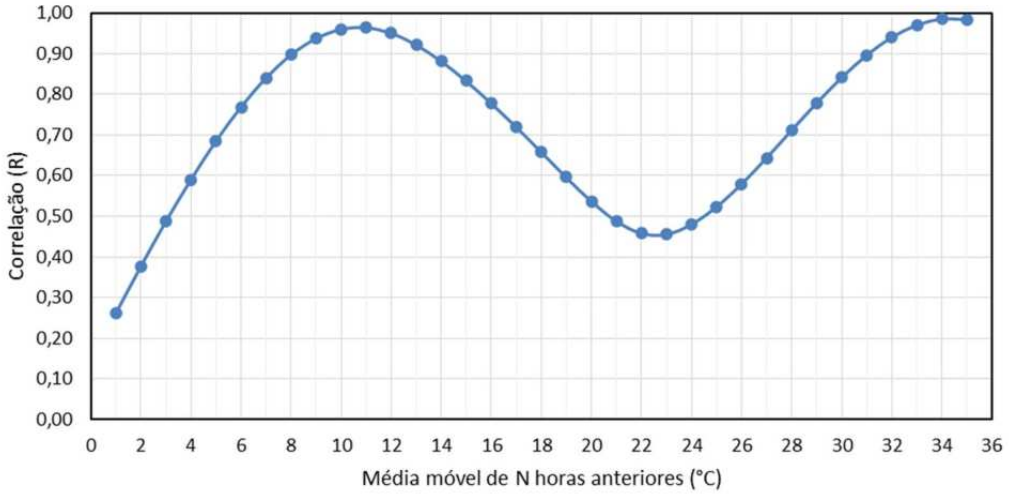
RESULTADOS

CALIBRAÇÃO DO MODELO

Incialmente foi realizada a definição do período para a calibração do modelo. Os dias 01, 02, 03 e 04 de fevereiro foram escolhidos por representarem um trecho central representativo de todo o período medido, buscando assim, reduzir a distância entre os dias utilizados para calibração e os dias utilizados para a predição.

Em seguida, foram calculadas as médias móveis das temperaturas externas, considerando os intervalos de duas horas anteriores, três, quatro, até alcançar a média móvel de 35 horas anteriores. Os resultados foram plotados no gráfico da Figura 5. É possível observar a variação da correlação dos valores das médias móveis das temperaturas externas com os valores das temperaturas internas do ar. Os valores de correlação oscilaram suavemente e registraram dois picos, referentes à média móvel das últimas 11 horas (R: 0,96) e à média móvel das últimas 34 horas (R: 0,98).

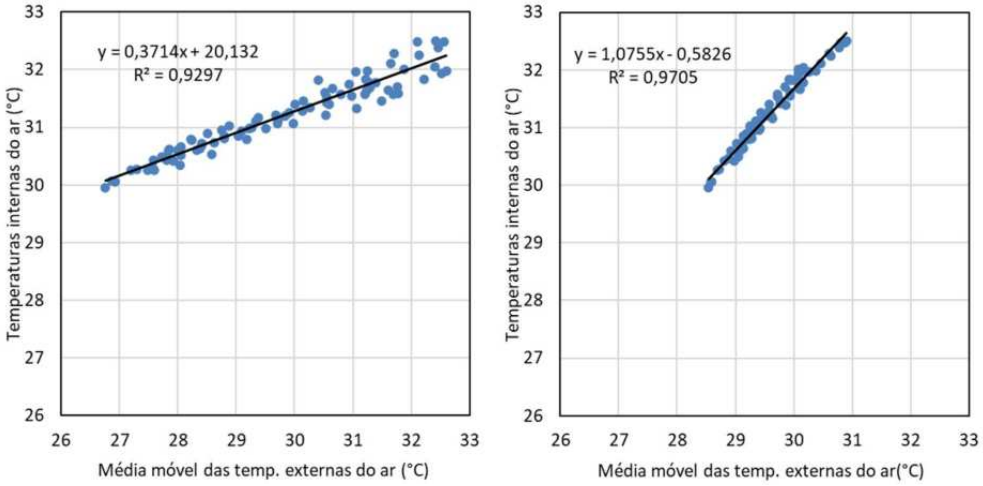
Figura 5: Correlograma: média móvel das temperaturas externas de N horas anteriores × temperaturas internas horárias.



Para este estudo, optou-se por considerar os dois picos observados de correlação para a realização das estimativas. Foram utilizadas as duas médias móveis representativas das 11 e 34 horas anteriores, com o objetivo de investigar a possibilidade da obtenção de resultados divergentes.

Conforme os valores de coeficiente de determinação (R^2) apresentados na Figura 6, verifica-se que os dois picos observado no gráfico correlograma obtiveram forte correlação entre as médias móveis de temperatura externa e a temperatura interna. O modelo referente ao período de 34 horas anteriores obteve maior valor de R^2, cerca de 0,97, enquanto a média das últimas 11 horas obteve R^2 de aproximadamente 0,93.

Figura 6: Correlações das médias móveis das últimas 11 (esquerda) e 34 (direita) horas das temperaturas externas com as temperaturas internas do ar.



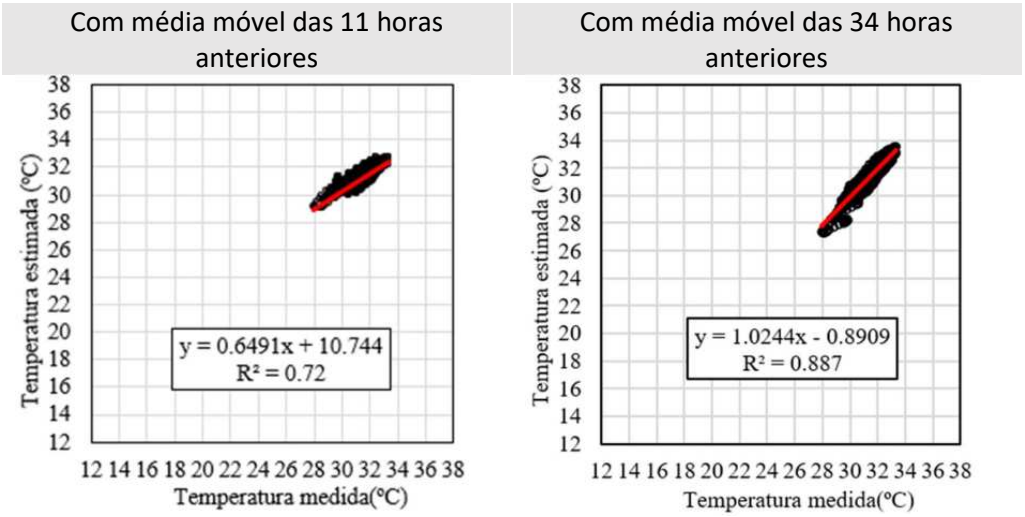
Observando os gráficos da Figura 6, referentes à dispersão das temperaturas internas em função das médias móveis, percebe-se que as médias móveis das últimas 11 horas apresentam valores mais dispersos (26,8 °C até 32,6 °C) do que a média móvel das últimas 34 horas (28,5 °C até 30,9 °C). Dessa forma, é possível conjeturar que as estimativas serão diferentes, especialmente quando as médias móveis das temperaturas externas apresentarem valores muito altos ou baixos.

VALIDAÇÃO DO MODELO

A primeira etapa de validação do modelo consistiu na verificação do coeficiente de determinação entre os dados medidos e os dados estimados. Para esta análise foram considerados os períodos desocupados entre 21/12/2020 e 15/01/2021 e entre 05/02/2021 e 17/03/2021.

No gráfico da Figura 7 é possível observar que os dados estimados a partir da média móvel das 34 horas anteriores no ambiente externo registrou melhor ajuste aos valores reais medidos no ambiente interno da residência, obtendo valor de R^2 de aproximadamente 0,89, enquanto ao utilizar a média móvel das últimas 11 horas obteve-se valor de R^2 de apenas 0,72. Esta diferença apresentada, indica a influência da inércia térmica no desempenho do edifício, demonstrando a importância da observação do atraso térmico no processo estimativo.

Figura 7: Gráficos de dispersão relacionando as temperaturas internas do ar no período monitorado (medidas e estimadas).



Na segunda etapa, foram avaliados dois indicadores, a raiz quadrática média das diferenças e a diferença de viés médio. A análise da raiz quadrática média das diferenças ratificou que o modelo referente à média das últimas 34 horas obteve melhor ajuste, alcançando valor de RMSE de 0,131, enquanto com à média das últimas 11 horas obteve-se RMSE de 0,326. Considerando os valores da diferença de viés médio verificou-se que ao utilizar a média das 34 horas anteriores, obteve-se valores de temperatura do ar interno levemente superestimados, MBE de 0,123, assim como com a média das 11 horas anteriores, que alcançou 0,282, conforme pode ser visto na Tabela 1.

Tabela 1: Valores calculados de RMSE e MBE para as médias móveis das 11 e 34 horas anteriores.

	RMSE	MBE
Média móvel das 11 horas anteriores.	0,326	0,282
Média móvel das 34 horas anteriores	0,131	0,123

Os resultados obtidos ratificaram a importância da inserção do efeito da inércia térmica no modelo preditivo, uma vez que o modelo que incorporou a média móvel das 34 horas anteriores obteve melhor ajuste aos dados medidos do que o modelo que considerou apenas a média móvel das últimas 11 horas.

CONCLUSÕES

Neste estudo, foi avaliada a adequação da aplicação do modelo preditivo de temperaturas do ar interno a partir das temperaturas do ar externo proposto por Papst [7] para uma unidade habitacional localizada na cidade de Aracati/CE, de clima semiárido. Apesar de ter sido proposto e validado para edificações nas cidades de Florianópolis/SC e Curitiba/PR, que tem clima subtropical úmido (Cfa e Cfb, respectivamente), o método apresentou bons resultados para a edificação em questão, localizada no clima semiárido. Devido à sua simplicidade, o modelo de Papst [7] constitui uma ferramenta viável e com potencial para a verificação da

adequabilidade térmica das edificações construídas e assim, auxiliar na proposição de políticas públicas relacionadas à energia, saúde e moradia.

O experimento também serviu para destacar a importância de se utilizar pelo menos quatro dias de dados medidos para a verificação de qual média móvel das temperaturas externas deve ser utilizada como variável explicativa para a estimativa dos dados horários das temperaturas internas. No experimento, ocorreram dois picos de correlação: com a média móvel das temperaturas externas das últimas 11 horas (0,93) e com a média móvel das últimas 34 horas (0,97). A segunda opção, que demandou mais horas de monitoramento, pois as primeiras 34 são descartadas, resultou em estimativas bem mais precisas do que a primeira.

Como sugestão para trabalhos futuros, aponta-se a possibilidade de utilizar o modelo do método de Papst [1], calibrado com os dados de uma edificação desocupada, para estimar dados para uma edificação ocupada. A comparação entre os dados medidos (com a edificação ocupada) e os dados estimados (considerando a edificação desocupada) podem retornar informações interessantes sobre o impacto da ocupação nas temperaturas internas da edificação.

AGRADECIMENTOS

Esta pesquisa foi apoiada com recursos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - Cnpq e as Pró-Reitorias de Pesquisa e de Pós-Graduação da Universidade Federal da Paraiba - PROPESQ/PRPG/UFPB. Os autores agradecem as bolsas CAPES, o financiamento do CNPQ pelo edital MCTIC / CNPq nº 28/2018 - Universal / Faixa B - Processo: 434583 / 2018-9 e o financiamento obtido através da Chamada Produtividade PROPESQ/PRPG/UFPB Nº 03/2020.

REFERÊNCIAS

[1] PAPST, A. L. **Método Estimativo da Temperatura Interna de Edificações Residenciais em Uso**. PhD Thesis (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

[2] FERNANDES, L. C. **Experimentos de campo com teto-reservatório: desempenho térmico e percepção do usuário.** 2018. Tese (Doutorado em Tecnologia) - Programa de Pós-Graduação em Tecnologia e Sociedade, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2018.

[3] Centers for Disease Control and Prevention. Protecting Vulnerable Groups from Extreme Heat. **Heat and Older Adults**. 2017. Disponível em: https://www.cdc.gov/disasters/extremeheat/older-adults-heat.html. Acesso em: 03 abril 2022.

[4] GIVONI, B. Minimum Climatic Information Needed To Predict. *In*: THE INTERNATIONAL CONFERENCE ON PASSIVE AND LOW ENERGY ARCHITECTURE – PLEA'99 1999, Brisbane. **Proceedings...** Brisbane: PLEA, 1999.

[5] HIETAHARJU, Petri; RUUSUNEN, Mika; LEIVISKÄ, Kauko. A dynamic model for indoor temperature prediction in buildings. **Energies**, v. 11, n. 6, p. 1477, 2018.

[6] JIN, J.; SHU, S.; LIN, F. Prediction of Indoor Air Temperature Based on Deep Learning. **Sensors and Materials**, v. 31, n. 6, p.2029-2042, 2019.

[7] LI, X.; ZHAO, T., ZHANG, J., CHEN, T. Predication control for indoor temperature time-delay using Elman neural network in variable air volume system. **Energy and Buildings**, v. 154, p.454-552, 2017.

[8] SHI, X.; LU, W., ZHAO, Y.; QIN, P. Prediction of Indoor Temperature and Relative Humidity Based on Cloud Database by Using an Improved BP Neural Network in Chongqing. **IEEE Access Multidisciplinary Open Access Journal**, v.6, p.30559-30566, 2018.

[9] SONG, J.; XUE, G.; MA, Y.; LI, H.; PAN, Y.; HAO, Z. An Indoor Temperature Prediction Framework Based on Hierarchical Attention Gated Recurrent Unit Model for Energy Efficient Buildings. **IEEE Access Multidisciplinary Open Access Journal**, v.7, p.157268-157283, 2019.

[10] XU, Chengliang et al. Improving prediction performance for indoor temperature in public buildings based on a novel deep learning method. **Building and Environment**, v. 148, p. 128-135, 2019.

[11] KRÜGER, E. L. et al. Proposition of a simplified method for predicting hourly indoor temperatures in test cells. **Ambiente Construído**, v. 17, p. 57-70, 2017.

[12] FERNANDES, L. C. et al. Estimativa de temperaturas internas horárias de edificações a partir de temperaturas externas: proposta de método alternativo. In: XIII Encontro Nacional e IX Encontro Latino-americano de Conforto no Ambiente Construído – Campinas. **Anais...** Campinas: ENCAC e ELACAC, 2015.