

AFERIÇÃO DE EQUAÇÕES PREDITIVAS DA TEMPERATURA AMBIENTE QUANDO APLICADAS A UMA SÉRIE DE DADOS MAIS RECENTE

Eduardo L. Krüger (1); Ana Lígia Papst (2)

(1) Pós-Graduação em Tecnologia (PPGTE), Departamento de Construção Civil - Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná - CEFET-PR
Av. Sete de Setembro, 3165 Curitiba - PR. CEP 80230-901
Fone: 0xx41 310 4723 Fax: 0xx41 310 4712
e-mail: krueger@ppgte.cefetpr.br

(2) LabEEE / NPC – Departamento de Engenharia Civil
Universidade Federal de Santa Catarina
Campus Universitário – Trindade, Florianópolis – SC - C.P. 476 CEP 88040-900
Fone: 0xx48 331 5185 Fax: 0xx48 331 5191
e-mail: analigia@labeee.ufsc.br

RESUMO

Equações preditivas são desenvolvidas a partir de dados coletados *in loco*, em habitações sob condições reais de uso e exposição ao clima. Assim, pode-se obter por análise de regressão equações que forneçam uma informação expedita quanto à temperatura (mínima, média ou máxima diária) a ser alcançada pelo ambiente interno. A partir dos dados de temperaturas de dois períodos de monitoramento de habitações padrão popular em Curitiba, de 09/07/2000 a 03/08/2000 (inverno) e de 12/12/2000 a 10/01/2001 (verão), foram determinadas equações preditivas das temperaturas internas, e feita uma aferição com base em um terceiro período de monitoramento de temperaturas, de 03/08/2002 a 01/09/2002. Através da análise realizada, pôde-se verificar a eficácia das equações em prever o comportamento de três habitações, para um período diverso do monitoramento original.

ABSTRACT

Predictive formulas are developed based on measured data of houses under real occupation and weather exposure. Thus, by means of regression analysis, it is possible to generate information concerning indoor minimum, average and maximum temperatures. Based on temperature measurements of two monitoring periods in low-cost houses in Curitiba, predictive formulas were determined and compared to measured data of a third monitoring period. The data analysis permitted testing the efficacy of the formulas regarding a monitoring period, different than the original one.

1. INTRODUÇÃO

O procedimento de obtenção de equações preditivas para habitações monitoradas desenvolveu-se a partir de uma pesquisa (GIVONI, 1999), que demonstrou a possibilidade de utilizá-las para se prever as temperaturas internas de moradias não habitadas com dados diários da temperatura externa do ambiente. Essas equações foram obtidas a partir de medições em duas habitações (25m²), localizadas em Pala, no Sul da Califórnia. Demonstrou-se, nessa pesquisa, que as temperaturas

internas máximas e médias diárias das habitações sem moradores de cada sistema construtivo específico poderiam ser preditas com base somente nos dados de temperatura média externa.

Entretanto, sabe-se que as temperaturas internas de moradias com ocupação sofrem influências de seus moradores, em razão de sua ocupação e uso de equipamentos e operação de aberturas. Aplicando-se a mesma metodologia a casas ocupadas, Givoni *et al.* (2002) verificaram que estas mesmas fórmulas poderiam ser utilizadas para residências habitadas e sem o uso de aparelhos de ar condicionado. O monitoramento da temperatura interna foi realizado em habitações populares habitadas.

A partir dessas equações é possível prever a temperatura interna: máxima, média e mínima, de posse de poucos dados da temperatura externa.

A partir de um monitoramento de casas de baixo custo construídas na Vila Tecnológica de Curitiba (DUMKE, 2002), foram geradas equações para três habitações (GIVONI *et al.*, 2002; GIVONI e KRÜGER, artigo submetido) e os resultados das equações preditivas foram comparados a simulações computacionais (KOMENO, 2002), utilizando-se o software ARQUITROP. A comparação entre os resultados de ambos os métodos mostrou-se satisfatória, comprovando-se a eficácia das equações quando se trata de valores diários da temperatura ambiente.

Outra aferição possível da eficácia das equações na determinação de temperaturas internas pode ser realizada considerando-se o comportamento térmico de uma mesma moradia num outro período de monitoramento de temperaturas, posterior ao monitoramento através do qual gerou-se as equações através de análise de regressão. Uma vez que não tenham sido realizadas modificações na tipologia construtiva ou nos materiais componentes e que o padrão de ocupação permaneça inalterado, o resultado das equações, dada a sua característica de fornecer dados de temperatura interna com base unicamente nas condições climáticas externas, deverá se assemelhar aos dados monitorados, qualquer que seja o período analisado.

2. METODOLOGIA

Neste artigo, equações preditivas geradas para três moradias distintas padrão popular em Curitiba - PR, foram aferidas quanto a sua aplicação a um período de monitoramento da temperatura ambiente realizado cerca de um ano e meio após o monitoramento original. Os pontos de medição das temperaturas nas moradias foram exatamente os mesmos, bem como os sensores adotados para monitorar a temperatura interna e externa. Descreve-se primeiro as moradias consideradas neste artigo, a seguir os métodos de aferição empregados: MBE, RMSE e o parâmetro somatório dos grau-dia. Apresenta-se em seguida as equações preditivas resultantes do primeiro monitoramento das temperaturas internas, e ao final, a aferição propriamente dita das equações preditivas.

2.1 Descrição das moradias com temperaturas monitoradas

As medições de temperaturas (DUMKE, 2002) foram realizadas em 18 moradias de diferentes sistemas construtivos na Vila Tecnológica de Curitiba, e em dois períodos de 09/07 a 03/08/2000 (inverno) e de 12/12/2000 a 10/01/2001 (verão). Os sensores de temperatura usados foram data-loggers marca HOBO da Onset Corporation.

Destas 18 moradias, três foram utilizadas para obtenção de equações preditivas da temperatura interna: máxima, média e mínima.

As moradias são aqui denominadas pelo nome da construtora responsável: Kuerten, MLC, Castellamare. A tabela 1 apresenta as características de cada uma delas, quanto aos materiais empregados nas paredes externas e nas coberturas e quanto a padrões de uso das moradias, para as condições de inverno e verão, respectivamente.

Tabela 1 - Características termo-físicas e de ocupação das moradias

INVERNO								
MORADIA	U_{par}	U_{cob}	ϕ_{par}	ϕ_{cob}	FS_{par}	FS_{cob}	Tx ocupação	Tx ventilação
Kuerten	3,30	2,80	1,06	0,80	15,20	8,70	0,08	1,95
MLC	2,96	2,50	3,37	3,90	8,90	7,30	0,10	3,80
Castellamare	3,53	2,82	3,03	0,80	12,20	8,20	0,04	1,20
VERÃO								
MORADIA	U_{par}	U_{cob}	ϕ_{par}	ϕ_{cob}	FS_{par}	FS_{cob}	Tx ocupação	Tx ventilação
Kuerten	3,30	2,01	1,06	1,00	15,20	6,30	0,09	3,40
MLC	2,96	1,80	3,37	4,50	8,90	5,20	0,10	5,42
Castellamare	3,53	2,02	3,03	0,90	12,20	5,90	0,04	4,13

Onde: U , ϕ e FS são: a transmitância [$W.m^{-2}.K^{-1}$], o atraso térmico [h] e o fator de calor solar, calculados para as paredes e coberturas, respectivamente; Tx ocupação é calculada a partir da média diária dos percentuais horários de ocupação, multiplicada pelo número de moradores e dividida pela área construída da moradia; e Tx ventilação é obtida através da média diária da área de aberturas dividida pela área de piso.

A medição posterior foi feita no período de 03/08/2002 a 01/09/2002 para aferir as equações preditivas. A tabela abaixo apresenta as características da temperatura externa nos três períodos considerados.

Tabela 2 - Características da temperatura externa nos três períodos monitorados

Período	Tmax ext [°C]	Tmed ext [°C]	Tmin ext [°C]
09/07 a 03/08/2000	32,9	22,2	11,5
12/12/2000 a 10/01/2001	26,6	10,5	-3,3
03/08/2002 a 01/09/2002	29,7	16,7	5,2

2.2 Método de aferição

A aferição das equações preditivas foi feita com dois testes estatísticos, o MBE (Mean Bias Error) e o RMSE (Root Mean Square Error). O MBE é uma indicação do desvio médio dos valores preditos dos valores medidos, enquanto o RMSE é uma medida da variação dos valores preditos ao redor dos valores medidos. O ideal é que o valor de MBE e o de RMSE seja o mais próximo a zero. A Eq. 1 mostra como se determina o MBE e a Eq. 2 mostra como se determina o RMSE.

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - x_i)}{N} \quad [\text{Eq. 1}]$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - x_i)^2}{N}} \quad [\text{Eq. 2}]$$

Onde:

y_i = é o valor da temperatura predita

x_i = é o valor da temperatura medida

N = número de observações

Uma outra forma de aferição utilizada foi o somatório de graus-dia, junto com o número de dias com temperatura média interna superior a uma temperatura base. A temperatura base adotada neste artigo será de 21°C. Ou seja, foi feito o cálculo do número de dias que a temperatura média interna medida e predita ultrapassaram os 21°C e também o cálculo do somatório de graus-dia da temperatura média interna medida e predita acima dos 21°C.

3. AS EQUAÇÕES PREDITIVAS

O primeiro passo para a criação de equações preditivas é observar graficamente qual o padrão de relação existente entre as curvas de temperatura interna e externa, definindo-se, assim, a partir de qual variável se efetuará a regressão. Nos casos analisados, verificou-se que:

- na moradia Kuerten, conforme observado nas curvas de temperatura interna e externa diárias relativas aos períodos de monitoramento (verão e inverno): a temperatura mínima interna aproxima-se mais da mínima externa; a temperatura média interna da média externa; e a temperatura máxima interna da máxima externa.
- Na moradia MLC, as temperaturas internas máxima, média e mínima acompanham a temperatura média externa.
- Na moradia Castellamare, a mínima interna acompanha a mínima externa; e a média interna e a máxima interna acompanham a média externa.

Na análise de regressão, as variáveis adotadas foram, de acordo com a situação, a temperatura mínima, média ou máxima diária externa e as temperaturas médias dos períodos (GT). Assim, se obteve as equações apresentadas na tabela 3.

Tabela 3 - Equações preditivas para a temperatura mínima, média e máxima diária interna das moradias das construtoras Kuerten, MLC e Castellamare.

Moradia	Temperatura interna	Equação Preditiva
Kuerten	Máxima	$T(\text{in}) \text{ max} = \text{GTmax} + 0,6 + 0,69*(\text{Tmax} - \text{GTmax})$
	Média	$T(\text{in}) \text{ avg} = \text{GTavg} + 4,1 - 0,067*\text{GTavg} + 0,74*(\text{Tavg} - \text{GTavg})$
	Mínima	$T(\text{in}) \text{ min} = \text{GTmin} + 5,4 - 0,116*\text{GTmin} + 0,75*(\text{Tmin} - \text{GTmin}) + 0,1374*(\text{Tavg}(n-1) - \text{Tmin})$
MLC	Máxima	$T(\text{in}) \text{ max} = \text{Tavg} + 4,9 + 0,065*\text{GTavg} - 0,3176*(\text{Tavg} - \text{GTavg})$
	Média	$T(\text{in}) \text{ avg} = \text{GTavg} + 2,5 + 0,0336*\text{GTavg} + 0,74*(\text{Tavg} - \text{GTavg})$

	Mínima	$T(\text{in}) \text{ min} = T_{\text{avg}} + 0.3 - 0.2233 * (T_{\text{avg}} - GT_{\text{avg}})$
Castellamare	Máxima	$T(\text{in}) \text{ max} = GT_{\text{avg}} + 3,9 + 0,108 * GT_{\text{avg}} + 0,8 * (T_{\text{avg}} - GT_{\text{avg}})$
	Média	$T(\text{in}) \text{ avg} = GT_{\text{avg}} + 1.7 + 0.05 * GT_{\text{avg}} + 0.7 * (T_{\text{avg}} - GT_{\text{avg}})$
	Mínima	$T(\text{in}) \text{ min} = GT_{\text{min}} + 4,9 - 0,068 * GT_{\text{min}} + 0,75 * (T_{\text{min}} - GT_{\text{min}}) + 0,23 * (T_{\text{avg}}(n-1) - T_{\text{min}})$

Onde:

T_{min} , T_{avg} e T_{max} : temperatura mínima, média e máxima externa do dia analisado

GT_{min} , GT_{avg} e GT_{max} : temperatura mínima, média e máxima externa no período analisado

$T_{\text{avg}}(n-1)$: temperatura média externa do dia anterior

4. AFERIÇÃO DAS EQUAÇÕES

Antes de apresentar os resultados numéricos, a figura 1 exemplifica num gráfico de dispersão as temperaturas máximas medidas com as temperaturas máximas previstas para a moradia Kuerten.

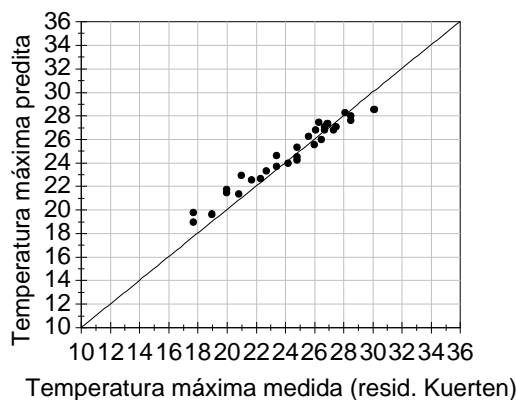


Figura 1 - Gráfico de dispersão das temperaturas máximas medidas do período de 03/08/2002 a 01/09/2002 com as temperaturas máximas previstas para a moradia da construtora Kuerten.

A figura 2 mostra num gráfico de dispersão as temperaturas máximas medidas com as temperaturas máximas previstas para a moradia MLC.

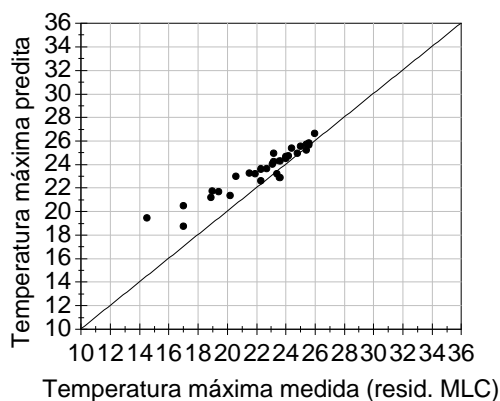


Figura 2 - Gráfico de dispersão das temperaturas máximas medidas do período de 03/08/2002 a 01/09/2002 com as temperaturas máximas previstas para a moradia da construtora MLC.

As figuras 1 e 2, que representam as moradias Kuerten e MLC, foram escolhidas por serem a maior e a menor dispersão, respectivamente, das temperaturas máximas previstas em relação às temperaturas máximas medidas. Na figura 1, fica claro que a equação preditiva para estimar a temperatura máxima da moradia Kuerten teve melhores resultados do que a equação preditiva para estimar a temperatura máxima da moradia MLC. Esta maior ou menor dispersão dos valores medidos em relação aos valores estimados é representada pelo RMSE, erro médio quadrático.

A tabela 4 mostra os valores de MBE e RMSE dos resultados das temperaturas previstas com relação às temperaturas medidas.

Tabela 4 – Valores de MBE e RMSE das temperaturas previstas com relação às temperaturas medidas

Moradia	Temperatura	MBE (°C)	RMSE (°C)
Kuerten	Máxima	0,36	0,92
	Média	0,91	1,16
	Mínima	1,40	1,62
MLC	Máxima	1,15	1,65
	Média	0,85	1,35
	Mínima	0,42	1,54
Castellamare	Máxima	0,98	1,47
	Média	-0,81	1,08
	Mínima	1,47	1,57

Pelos resultados da tabela 4, observa-se que o erro médio quadrático (RMSE) máximo encontrado foi em torno de 1,6°C para determinar a temperatura mínima da moradia Kuerten e da moradia Castellamare e a temperatura máxima da moradia MLC. Na figura 2, observa-se que o erro máximo encontrado entre temperatura máxima medida e temperatura máxima prevista foram 5°C na moradia da construtora MLC.

Os menores valores do erro médio quadrático (RMSE) são observados nas equações preditivas da temperatura mínima e média da moradia Kuerten, e na determinação da temperatura média da moradia Castellamare.

As equações preditivas das temperaturas médias das moradias MLC e Castellamare apresentaram melhores resultados do que as equações preditivas das temperaturas máximas e mínimas para as mesmas moradias. Só que na moradia MLC o pior resultado da equação preditiva foi para a determinação da temperatura máxima interna, e na moradia Castellamare o pior resultado foi na determinação da mínima interna. Ambos os valores desfavoráveis obtidos, para a máxima e para a mínima, respectivamente, podem ser explicados ao se analisar as características e o padrão de uso de cada moradia. Assim, a moradia MLC, de alta ocupação no período de verão (fundamental para a determinação das máximas internas), alta inércia e baixa transmitância das paredes externas, acompanha pouco as condições externas, comparativamente às demais. Da mesma forma, a moradia

Castellamare, de baixa ocupação no inverno e com baixa taxa de ventilação resultou em uma situação na qual o ambiente interno tem pouca interação com o exterior.

As equações preditivas das temperaturas internas máximas da moradia Kuerten apresentaram melhores resultados do que as equações preditivas das temperaturas médias e mínimas. Esta moradia tem alta ocupação e bastante ventilação no período de verão (fundamental para a determinação das máximas internas). Além disso, o pequeno atraso térmico das paredes e cobertura fazem com que a temperatura interna acompanhe as condições externas. No período noturno, a diminuição da taxa de ventilação e os ganhos de calor interno fazem com que a temperatura mínima interna tenha menor interação com o ambiente externo.

A tabela 5 apresenta os valores do somatório de graus-dia e dias com as temperaturas médias medidas e preditas acima de 21°C.

Tabela 5 – Somatório de graus-dia e dias com as temperaturas médias medidas e preditas acima de 21°C

	Σ Graus-dia > 21°C		Número de dias com Tmed > 21°C	
	Tmed medida	Tmed Predita	Tmed medida	Tmed Predita
Kuerten	7.4	16.5	8.0	14.0
MLC	10.6	18.9	12.0	15.0
Castellamare	4.0	0.5	6.0	1.0

Verifica-se que nas moradias Kuerten e MLC as equações preditivas da temperatura média tenderam a superestimar os valores das temperaturas medidas, enquanto que, na moradia Castellamare, ocorreu o inverso.

Usando-se o somatório de graus-dia para aferição das equações preditivas, a moradia Kuerten aparece com um erro de 123% entre somatório de graus-dia medido e estimado, a construtora MLC tem uma diferença de 78%. A moradia Castellamare apresentou uma diferença de 83% na diferença dos dois somatórios, mas em valores absolutos isso corresponde a somente 3,5°C dia. A diferença no número de dias com temperatura média medida e predita acima de 21°C foi de 3 dias na moradia MLC, 5 dias na moradia Castellamare e 6 dias na moradia Kuerten.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As equações preditivas das temperaturas internas máximas, médias e mínimas consideradas neste artigo foram desenvolvidas através de análise de regressão multivariada para três moradias populares localizadas na cidade de Curitiba. Estas habitações tiveram suas temperaturas internas medidas em condições reais de uso e exposição ao clima. Este artigo afere estas equações através do monitoramento da temperatura interna num período posterior ao período de monitoramento que gerou as equações preditivas.

Foram adotados três métodos para aferição dos resultados das equações preditivas com relação as temperaturas medidas: MBE (desvio padrão), RMSE (erro médio quadrático) e parâmetro somatório dos grau-dia.

O valor máximo do erro médio quadrático resultante da diferença entre temperaturas preditas e medidas foi de 1,65°C na determinação da temperatura máxima de uma das moradias analisadas. Isto significa que, em média, a diferença máxima entre as temperaturas máximas preditas das temperaturas máximas medidas é de 1,65°C. A menor diferença verificada, em média, entre as temperaturas

máximas preditas das temperaturas máximas medidas foi de 0,92°C em outra moradia. Isto mostra que os erros em média variam em torno de 1°C a 1,6°C.

Foi utilizado o método do somatório de graus-dia para comparar as temperaturas medidas com as temperaturas preditas, adotando-se como temperatura base o valor de 21°C. Verificou-se o quanto a temperatura média interna medida e predita estava acima desta base e, também, o número de dias em que isto ocorria. Os resultados mostraram que, para duas moradias, as equações preditivas superestimaram os valores das temperaturas médias e, na terceira moradia, este valor foi subestimado. As diferenças em porcentagem encontradas mostram que os resultados obtidos pelas equações preditivas não corresponderam ao somatório de graus-dia efetivamente obtido pelas edificações no período adotado para a aferição. Desta forma, uma aferição das equações conforme a que foi realizada neste artigo, adotando-se equações preditivas a uma moradia submetida a um monitoramento térmico decorrido algum tempo desde seu monitoramento original, pode trazer erros consigo. Tais erros podem estar relacionados principalmente a ocupação, ventilação e uso de equipamentos por parte dos usuários, uma vez que a moradia não tenha sofrido reformas. Neste sentido, sabe-se que tanto a ocupação quanto a operação de aberturas podem provocar grandes alterações na temperatura ambiente.

Os resultados mostraram que, apesar das diferenças entre predito e medido serem pequenas em termos de temperatura absoluta, a avaliação de desempenho térmico realizado com as duas séries de dados apresentou discrepâncias, possivelmente em razão do comportamento dos usuários no período considerado para monitoramento térmico. Tal fato, entretanto, não invalida o uso das equações preditivas na avaliação de desempenho de determinada moradia submetidas a condições climáticas diversas das originais.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- DUMKE, E.M.S. (2002) Avaliação do Desempenho Térmico de Sistemas Construtivos da Vila Tecnológica de Curitiba como Subsídio para o Estudo de Tecnologias Apropriadas em Habitação de Interesse Social. 2002. 210p. Dissertação (Mestrado em Programa de Pós Graduação Em Tecnologia) - Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná.
- GIVONI, B. (1999) Minimum Climatic Information Needed to Predict Performance of Passive Buildings in Hot Climates. In: Plea'99 Conference, Florianópolis, Brasil. Anais. p 197-202.
- GIVONI, B., KRÜGER, E. (artigo submetido) Predicting Thermal Performance in Occupied Dwellings: A Case-Study in Curitiba, Brazil. Energy and Buildings.
- GIVONI, B., VECCHIA, F., KRÜGER, E. (2002) Predicting Thermal Performance of Housing Types in Developing Countries with Minimum Climatic Data. In: World Renewable Congress VII, Alemanha. Anais. Editado por A.A.M. Sayigh.
- KOMENO, M.H. (2002) Avaliação do desempenho térmico de sistemas construtivos para habitações de interesse social com a utilização de equações preditivas e simulação por meio de software. 2002. 145p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Fundação Universidade de Brasília.