

ESTIMATIVA DE TEMPERATURAS INTERNAS HORÁRIAS DE EDIFICAÇÕES A PARTIR DE TEMPERATURAS EXTERNAS: PROPOSTA DE MÉTODO ALTERNATIVO

Leandro C. Fernandes (1); José Mario V. Grzybowski (2) Eduardo L. Krüger (3); Francine A. Rossi (4); Sérgio C. Lange (5).

(1) Arquiteto, Doutorando do PPGTE-UTFPR, Professor da UFPR, fernandes.ufpr@gmail.com.

(2) Matemático, Doutor, Professor do PPGCTA-UFFS, jose.grzybowski@uffs.edu.br.

(3) Eng. Civil, Doutor, Professor do PPGTE-UTFPR, ekruger@utfpr.edu.br.

(4) Arquiteta, Doutora, Professora da UFPR, rossi@ufpr.br.

(5) Eng. Mecânico, Mestrando do PPGTE-UTFPR, sc_lange@hotmail.com.

UTFPR, Av. Sete de Setembro, 3165, Rebouças, Curitiba – PR, CEP 80230-901, Tel.: (41) 3082-0065.

RESUMO

É reconhecida a necessidade de ter-se alternativas simples para auxiliar a avaliar o desempenho térmico de edificações existentes, protótipos, processos construtivos e diferentes estratégias da arquitetura de baixo impacto. Dentre as alternativas estão as equações preditivas de temperaturas internas do ar. São geradas a partir de conjuntos de dados relativamente curtos e permitem estimar o comportamento térmico da edificação analisada quando exposta aos rigores climáticos, fornecendo séries contínuas de dados. Atualmente são comumente utilizadas equações preditivas obtidas por análise de regressão, que permitem estimar temperaturas internas diárias mínimas, médias e máximas. Entretanto, uma aplicação mais abrangente de predições de temperatura interna seria preferencialmente em base horária. O presente estudo tem por objetivo apresentar uma proposta de modelo matemático alternativo para estimativa de temperaturas internas do ar horárias. O modelo é capaz de estimar temperaturas internas horárias de edificações em função das temperaturas externas e, iterativamente, da estimativa anterior desse parâmetro. O estudo utiliza dados de temperatura de uma célula teste e de uma estação climatológica localizadas em Curitiba. As estimativas são comparadas com outros dois métodos, estes baseados em equações obtidas por análise de regressão. Os resultados mostraram-se bem superiores aos de um dos métodos utilizados e levemente superiores aos do outro. O modelo mostrou-se promissor e os resultados apontaram para a continuidade dos estudos, aplicando-se o modelo a habitações e edificações de pequeno porte.

Palavras-chave: estimativa de temperaturas internas horárias, equações preditivas, avaliação de desempenho térmico.

ABSTRACT

The need for simplified methods to aid the thermal performance evaluation of existing buildings, prototypes, construction processes and different strategies of low-impact architecture is well known. Among the alternatives are predictive equations for indoor air temperatures. Generated from relatively straightforward meteorological data sets, such formulas allow the estimation of the thermal performance of a given building as a continuous data series. Currently, predictive equations are obtained from regression analysis, and on a daily basis for minimum, average and maximum indoor temperatures. However, a broader application of indoor temperature predictions should preferably be based on hourly data. This study aims to present a proposal for an alternative method for estimating hourly indoor temperatures. The model is capable of estimating indoor temperatures based on outdoor temperatures and, iteratively, on the previous estimate of this parameter. The study uses temperature field data from a test cell and meteorological station located in Curitiba. The estimates are compared to other two methods, both based on regression analysis. The results were much more accurate than those of one of the methods evaluated and slightly more accurate than the other. The model showed promising results and point to further developments, applying the model to dwellings and smaller buildings.

Keywords: hourly indoor temperature prediction, predictive equations, thermal performance evaluation.

1. INTRODUÇÃO

As temperaturas do ar no interior de uma edificação pouco ventilada flutuam principalmente em função dos ganhos e perdas de energia térmica para a envoltória. Ou seja, a temperatura interna do ar é função da temperatura superficial dos elementos que definem o volume de ar interno da edificação. Por sua vez, a temperatura dos elementos constituintes da edificação varia basicamente em função das trocas térmicas que ocorrem com o ambiente externo.

Este trabalho se insere no esforço para desenvolvimento de alternativas simples para verificação do comportamento térmico de pequenas edificações, especialmente de habitações de interesse social, com vistas à avaliação de seu desempenho térmico quando sujeitas a variações climáticas.

Para a obtenção de dados sobre o ambiente térmico interno na avaliação do desempenho ao longo de um ciclo climático de edificações existentes tem-se as seguintes opções: monitorar a variação térmica ao longo de todo o ciclo; simular o comportamento térmico por meio de softwares; ou utilizar equações preditivas de temperatura.

As simulações computacionais podem ser trabalhosas, pois costumam exigir a modelagem da edificação. Além disso, podem parecer complexas para equipes que não dispõem de membro habituado com os programas específicos para este fim.

Por dispensarem levantamentos longos e por oferecerem séries contínuas de dados, as equações preditivas são uma alternativa quando os prazos para obtenção de resultados são curtos. Um exemplo da aplicação de equações preditivas para um protótipo habitacional foi apresentado em uma edição anterior do ENCAC (KRÜGER, 2003), no qual uma mesma edificação foi testada para 11 condições climáticas no território brasileiro, seguindo esse procedimento.

O inconveniente, no caso, é que são necessários dados de campo a partir dos quais são desenvolvidas as equações. Os autores entendem que a aplicação desse procedimento é restrita ao caso da habitação social, escolas públicas e edificações que partem de um mesmo modelo, o qual é aplicado em série em diversas condições climáticas. No caso de edificações de grande e médio portes, o método pode trazer benefícios quando a edificação segue preceitos de fabricação em série e pré-fabricação e quando existe ao menos uma edificação demonstrativa (*show-room*), a qual é replicada com poucas modificações no projeto arquitetônico.

As equações preditivas têm sido utilizadas principalmente para simular o comportamento térmico de habitações (PAPST e LAMBERTS, 2001; GIVONI e VECCHIA, 2001; KRÜGER e PAPST, 2003; KOMENO, KRÜGER e SPOSTO, 2003; COLONELLI, HORMAZÁBAL e GIVONI, 2003; PAPST, 2004; FERNANDES, 2005; KRÜGER e FERNANDES, 2006; MARQUES, 2008), protótipos (OGOLI, 2003; KRUGER, 2003) e células teste visando avaliar o desempenho térmico de processos construtivos alternativos e diferentes artifícios da arquitetura bioclimática (GIVONI e ROUCH, 2001; CHENG, 2004; GONZÁLEZ e KRÜGER, 2013).

A maior parte dos trabalhos sobre estimativa de temperaturas baseia-se na ferramenta estatística análise de regressão, expressando as relações entre a variável dependente e as variáveis independentes por meio de equações de regressão linear (KRÜGER e RORIZ, 2004; PAPST, 2004; FERNANDES, 2005; LIMA, 2009; MONTEIRO, 2013) e, sob certo ponto de vista, dão continuidade ao trabalho de Givoni (1999) sobre equações preditivas.

A maior parte desses trabalhos, inclusive os de Givoni, focou na estimativa das temperaturas mínimas, médias e máximas diárias. O trabalho de Krüger e Roriz (2004) estima temperaturas horárias para dias específicos e somente o de Papst (2004) faz estimativas para séries contínuas e relativamente longas. O método de Papst apresenta bons resultados, no entanto, por basear-se em regressão linear simples, pode ser dito como “rígido”, pois, para uma dada média das temperaturas externas (variável independente), retornará sempre a mesma temperatura interna, não importando a temperatura interna anterior ou a taxa de variação das temperaturas externas. Essa rigidez pode implicar em erros em climas dinâmicos.

2. OBJETIVO

Este estudo tem por objetivo apresentar uma proposta de modelo matemático alternativo, capaz de estimar temperaturas internas horárias de edificações em função de temperaturas externas, mas levando em conta, de forma dinâmica, a temperatura estimada anteriormente e a diferença entre esta e a temperatura externa de referência.

São objetivos específicos do trabalho: calibrar o modelo e aplicá-lo a um conjunto de dados medidos no período de inverno; comparar as estimativas com os dados medidos e com as estimativas obtidas por outros dois métodos.

3. MÉTODO

São apresentadas aqui: (1) as características gerais da célula teste cujos dados de temperatura foram utilizados no estudo; (2) os equipamentos, os cuidados e períodos de monitoramento; e (3) três modelos para estimativa de temperatura interna horária, sendo o Modelo 3 o proposto neste trabalho.

3.1. Célula teste monitorada

A célula teste cujos dados foram utilizados no trabalho foi originalmente executada por Krüger *et al.* (2004) para avaliação de materiais de vedações quanto ao seu desempenho térmico. Tem uma base em concreto armado (sapata de 1,70 x 1,70 m com espessura de 10 cm). A cobertura é sustentada por uma pequena estrutura em madeira, com caibros de camará, com 2 x 2". Sobre esta estrutura foi disposta uma manta de lã-de-vidro, de densidade 16 kg/m³ e 50 mm de espessura, fixada com fita dupla face para posterior colocação das telhas de fibrocimento. Entre as frestas da manta com as paredes adotou-se uma vedação com espuma expansiva de poliuretano (Figura 1).

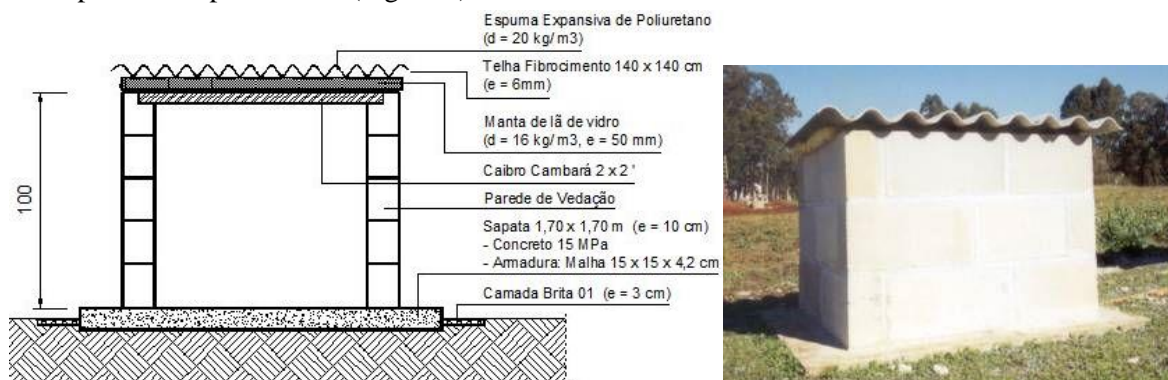


Figura 1 - Corte e fotografia da célula teste com paredes em concreto celular autoclavado

A célula teste foi implantada em terreno da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, no Bairro Campina do Siqueira, em Curitiba. Foi disposta de forma que uma das faces ficasse orientada para o Norte Verdadeiro e que recebesse o mínimo de sombreamento. A altura das paredes do protótipo é de 1,0 m. A espessura das paredes é de 15 cm, o perímetro interno é de 4,60 m, o perímetro externo de 5,2 m e a área interna 1,32 m². Foram utilizados 24 blocos de concreto celular autoclavado para confecção das paredes, que não receberam revestimento. Colocou-se uma camada de brita com espessura de 3,0 cm contornando o protótipo para conter o crescimento de plantas.

3.2. Equipamentos e período de medição

Para monitoramento das temperaturas utilizou-se o aparelho registrador (*datalogger*) da marca HOBO. Os sensores de temperatura operam na faixa de -40°C a $+120^{\circ}\text{C}$ e na faixa de umidade relativa de 0 a 95% sem que haja condensação. Sua acurácia é de aproximadamente $0,7^{\circ}\text{C}$ para a faixa de operação entre -5°C e $+35^{\circ}\text{C}$ (ONSET COMPUTER CORPORATION, 1999). O aparelho foi instalado no centro do volume de ar interno da célula teste. Os sensores foram programados para medições tomadas de 15 em 15 minutos. Destas obtiveram-se as médias horárias.

O período de medições utilizado neste estudo ocorreu no inverno. Foram realizadas medições de 13/08/2003 a 21/09/2003, abrangendo 40 dias. Os dados medidos foram divididos em dois períodos de 20 dias cada, um para geração das equações preditivas e o outro para validação e comparação das estimativas com os dados medidos, conforme procedimento descrito por González, Krüger e Giordano (2014).

Para a temperatura externa, foram utilizados os dados da estação climatológica do Sistema Meteorológico do Paraná (SIMEPAR), situada no Centro Politécnico da Universidade Federal do Paraná (UFPR).

3.3. Modelo 1

Este método foi incluído no estudo para servir de parâmetro de comparação para avaliação dos demais. Permite avaliar o grau de contribuição de métodos alternativos para estimativas. Trata-se de uma regressão

simples, onde a temperatura externa do ar é a variável independente e explica a temperatura interna, variável dependente. O modelo adota a forma da Equação 1:

$$T_{in}^k = aT_{ex}^{k-n} + b \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

T_{in} e T_{ex} são as temperaturas do ar interna [°C]; e externa [°C], respectivamente, e $n=0$ para a temperatura atual, $n=1$ para a temperatura defasada em uma unidade (hora, neste caso), e assim por diante.

3.4. Modelo 2

Papst (2004), a partir do monitoramento de temperaturas do ar de oito ambientes de três residências em Florianópolis durante o período de abril de 1998 a março de 1999, propôs um método para estimativa de temperaturas internas horárias de edificações. O método é baseado em regressão linear simples e tem como variável independente a média móvel estatística da temperatura externa que apresentar a mais forte correlação com a temperatura interna. Desta relação, por análise de regressão, determina-se uma equação da temperatura interna em função da temperatura externa. A autora refere-se a esta equação como sendo a “assinatura térmica” do ambiente, pois seria a representação do comportamento térmico individual de cada ambiente diante do clima, das características construtivas e da ocupação. O método proposto na tese é apresentado como simples de ser utilizado e indicado para ambientes com pequena amplitude da temperatura interna.

De posse dos dados para calibração do modelo, o primeiro passo é obter as médias móveis das temperaturas externas (média das últimas 2 horas, das últimas 3 horas, das últimas 4 horas, e assim por diante). O passo seguinte é relacionar o conjunto de valores de cada média móvel com os valores da variável dependente (temperatura interna), medindo os respectivos graus de correlação de cada relação feita. A autora sugere a plotagem dos valores de correlação em um gráfico, o correlograma, para facilitar a visualização. Especialmente para edificações de maior inércia térmica, a maior correlação acontecerá com a média móvel de várias horas anteriores e não com a temperatura externa correspondente à temperatura interna a explicar. Por fim, a partir das temperaturas internas e da média que apresentar a maior correlação, obtém-se a equação de predição (Equação 2).

$$T_{in}^k = \frac{a}{n+1} \sum_{j=0}^n T_{ex}^{k-j} + b \quad \text{Equação 2}$$

3.5. Modelo 3 - alternativo

Esta proposta de modelo é resultado da tentativa de traduzir a variação horária da temperatura no interior da célula teste para a forma de equações simples, a partir do conceito das “trocas térmicas” de Frota e Schiffer (2001).

A temperatura do ar no interior da célula teste varia, de uma hora para a outra, conforme o fluxo de energia térmica. Na busca de um equilíbrio térmico, há uma tendência da temperatura interna se aproximar da externa. Isso se dá segundo as características termofísicas do envelope. O modelo aqui proposto procura explicar a variação da temperatura interna em função da diferença entre as temperaturas externa e interna. Ou seja, não foca nas temperaturas, mas na diferença entre elas.

A ideia central do modelo é que a temperatura interna na hora seguinte (hora k) é igual à soma da temperatura interna atual (hora k-1) com a variação que vier a ocorrer. E essa variação se dá proporcionalmente à diferença entre as temperaturas do ar dos dois ambientes, interno e externo (Figura 2).

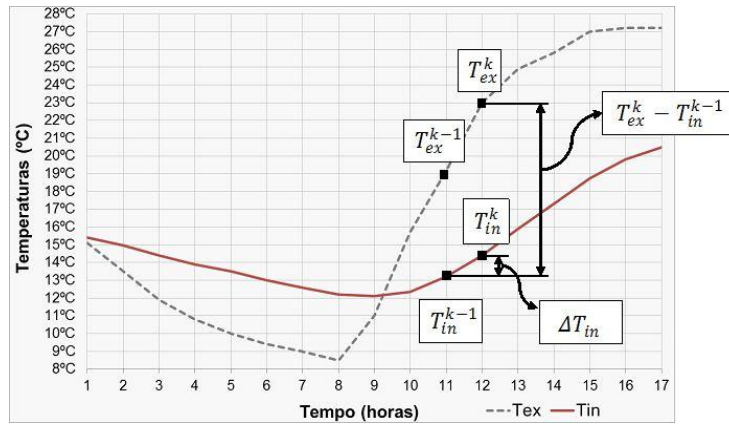


Figura 2 – Exemplo da variação da T_{in} como uma fração da diferença entre T_{ex} e T_{in} .

Matematicamente é expressa conforme a Equação 3:

$$T_{in}^k = T_{in}^{k-1} + \alpha (T_{ex}^{k-n} - T_{in}^{k-1}) \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

T_{in}^k é a temperatura [°C] estimada no instante k ;

α é uma função que descreve a variação proporcional da temperatura interna em função da diferença entre T_{ex}^{k-n} e T_{in}^{k-1} .

Observa-se que na Equação 3 adotou-se T_{ex}^{k-n} porque, em cada caso/edificação, será necessário verificar qual temperatura externa utilizar (se com defasagem $n=0$ para a temperatura atual, $n=1$ para a temperatura defasada em uma unidade (hora, neste caso), e assim por diante).

Os valores da função α determinam como a edificação se relaciona com a temperatura externa, ou seja, correspondem neste modelo ao que Papst (2004) chamou de assinatura térmica. α é obtido a partir da Equação 4:

$$\alpha = \frac{\Delta T_{in}}{T_{ex}^{k-n} - T_{in}^{k-1}} \quad \text{Equação 4}$$

Observa-se que α não é constante, sendo geralmente maior quando a edificação encontrar-se exposta à radiação e apresentar temperaturas internas menores que as externas. Devido à essa inconstância, α pode ser representado por uma equação, de primeiro ou segundo grau, conforme se verá adiante.

3.6. Comparação e avaliação dos resultados

A fim de verificar a qualidade dos resultados, foram avaliados e comparados os resultados obtidos pelos 3 modelos. Foram calculados: o erro médio absoluto; o erro mínimo; o erro máximo e o desvio padrão do erro. Além do coeficiente de correlação e do coeficiente de determinação dos dados estimados e medidos.

4. RESULTADOS

Neste tópico são apresentados os dados medidos, os modelos calibrados, os dados estimados, as comparações entre as estimativas e a discussão dos resultados.

4.1 Dados medidos

O período de medição abrangeu 40 dias. Os dados de 13/08/2003 até 01/09/2003, correspondentes a 20 dias, foram utilizados para gerar as equações preditivas. De posse das equações, foram feitas estimativas para o segundo período de dados, também de 20 dias, de 02/09/2003 até 21/09/2003 (Figura 3). Estas estimativas, posteriormente, foram comparadas com os dados medidos.

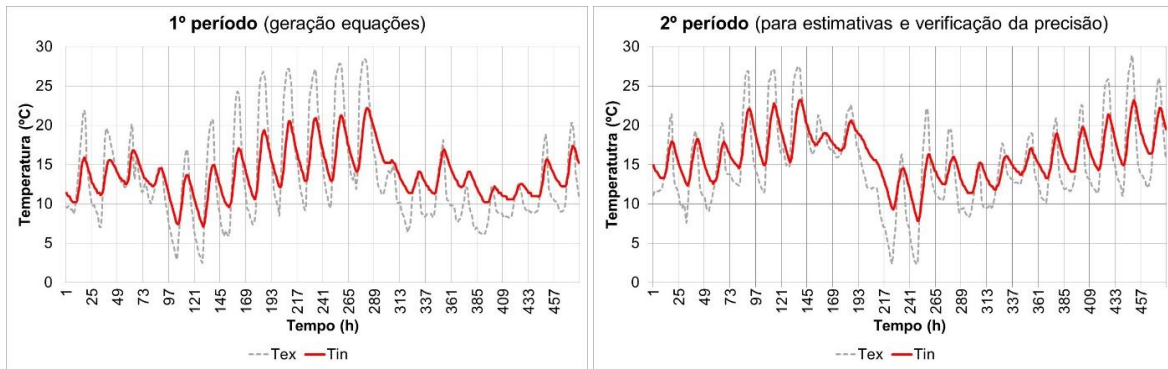


Figura 3 – Dados medidos

4.2. Modelo 1

Neste modelo, para determinar qual a temperatura externa do ar que melhor explica a temperatura interna (T_{in}^k), relacionou-se a variável dependente com temperaturas externas (T_{ex}) de diferentes horários ($k, k-1, k-2, \dots$). A Figura 4 mostra que a maior correlação se deu com a temperatura externa do mesmo horário da temperatura interna (T_{ex}^k).

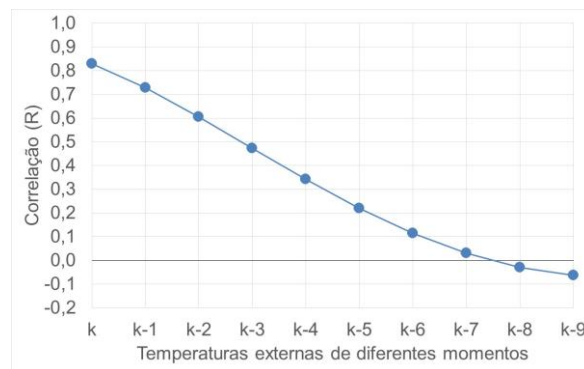


Figura 4 – Correlograma 1

Relacionando-se a temperatura externa do ar com a temperatura interna, por análise de regressão, obteve-se a Equação 5.

$$T_{in}^k = 0,4211 \cdot T_{ex}^k + 8,2175 \quad \text{Equação 5}$$

As temperaturas estimadas pela equação podem ser visualizadas na Figura 8.

4.3. Modelo 2

Conforme procedimento definido por Abreu (2004), obtiveram-se as médias móveis das temperaturas externas: média móvel das duas últimas horas, das três últimas horas e assim por diante, até a média móvel das últimas 35 horas. Posteriormente, relacionando-se o conjunto de valores de cada média móvel com os valores da variável dependente (T_{in}^k), foram obtidos os respectivos graus de correlação de cada relação feita. A melhor correlação foi obtida para a média móvel das últimas 6 horas, $R = 0,941$ (Figura 5).

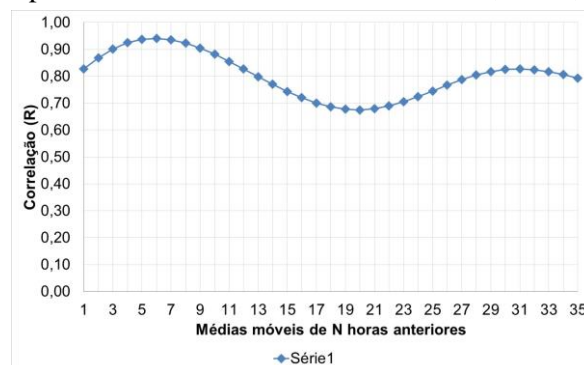


Figura 5 – Correlograma 2

A partir da relação entre as temperaturas internas do 1º período de medições e as médias móveis das últimas 6 horas das temperaturas externas obteve-se, por análise de regressão, a Equação 6, através da qual foram geradas as estimativas para o segundo período.

$$T_{in}^k = 0,5148 \cdot \frac{1}{6} \sum_{j=0}^5 T_{ex}^{k-j} + 7,0004 \quad \text{Equação 6}$$

4.4. Modelo 3 – alternativo

Para aplicar o modelo primeiramente é necessário verificar qual diferença entre as temperaturas externa e interna melhor explica a variação horária da temperatura interna. Assim, foi medida a correlação entre a variação da temperatura interna $(T_{in}^k - T_{in}^{k-1})$ e as seguintes diferenças em relação às temperaturas externas:

$$(T_{ex}^k - T_{in}^{k-1}), (T_{ex}^{k-1} - T_{in}^{k-1}), (T_{ex}^{k-2} - T_{in}^{k-1}), (T_{ex}^{k-3} - T_{in}^{k-1}) \dots$$

A melhor correlação encontrada para explicar a variação da temperatura interna do momento $k-1$ para o k foi a apresentada pela diferença $T_{ex}^k - T_{in}^{k-1}$ (Figura 6).

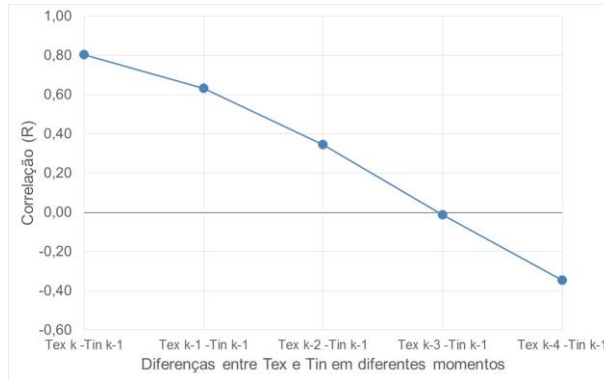


Figura 6 – Correlograma 3

Conforme relatado anteriormente, α não se apresenta como uma constante. No caso em estudo (Figura 7), varia conforme varia a diferença $T_{ex}^k - T_{in}^{k-1}$. É expresso por um polinômio de segundo grau (Equação 7). Não foram considerados os valores de α quando a diferença entre a temperatura externa e a interna foi menos que 1°C por apresentarem desvio excessivo dos demais valores.

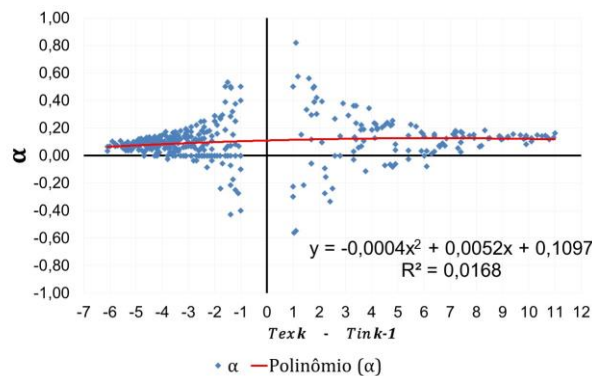


Figura 7 – Variação de α em função da diferença $T_{ex}^k - T_{in}^{k-1}$.

$$\alpha = -0,0004(T_{ex}^k - T_{in}^{k-1})^2 + 0,052(T_{ex}^k - T_{in}^{k-1}) + 0,1097 \quad \text{Equação 7}$$

Observa-se que, no momento de realizar as estimativas, T_{in}^{k-1} refere-se à temperatura interna estimada no momento anterior, ou seja, defasada em uma unidade de tempo. Somente para a primeira temperatura a estimar, como não há temperatura estimada para a hora anterior, toma-se $T_{in}^{k-1} = T_{ex}^{k-1}$. Quanto ao α , passa a

ser recalculado, hora-a-hora, conforme a Equação 7, utilizando dados estimados para a temperatura interna e dados medidos para a temperatura externa.

No caso estudado, quando a temperatura externa do ar for maior que a interna, houve maior variação interna do que quando a temperatura externa foi menor que a interna. Há mais resistência à perda de energia que aos ganhos, pois para estes colabora a incidência direta da radiação solar.

3.5. Temperaturas estimadas e comparação dos resultados

A seguir são apresentadas a temperatura externa, a temperatura interna medida e as temperaturas internas estimadas pelos três modelos para o segundo período (Figura 8).

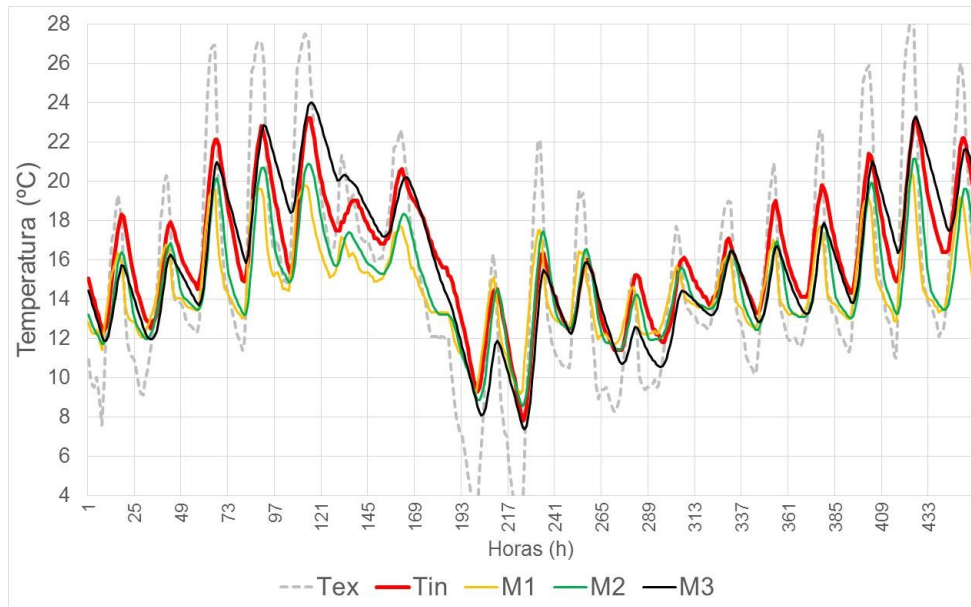


Figura 8 – Temperaturas medidas e estimadas para o segundo período.

Os gráficos a seguir relacionam a variação das temperaturas internas medidas com as temperaturas internas estimadas individualmente para o segundo período (Figura 9).

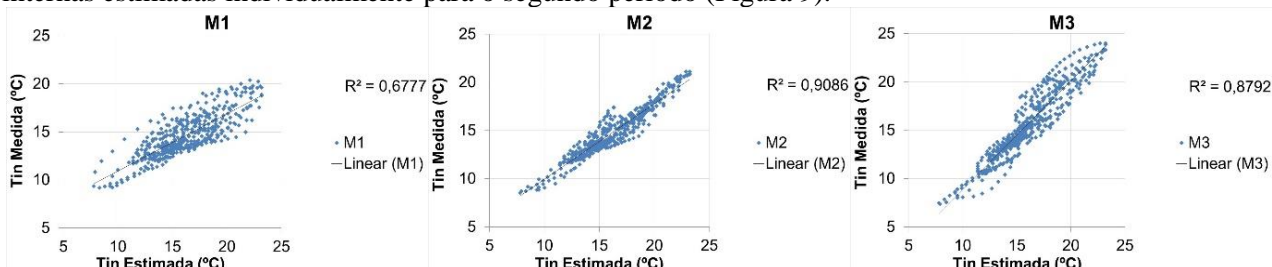


Figura 9 – Temperaturas internas medidas X temperaturas internas estimadas.

Relacionando-se os dados estimados com os medidos, foram calculados o coeficiente de correlação e o coeficiente de determinação. Também foram cálculos o erro médio absoluto, o erro mínimo, o erro máximo e o desvio padrão do erro (Tabela 1).

Tabela 1 – Parâmetros para avaliação e comparação dos resultados

	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
Coef. de Correlação (R)	0,823	0,953	0,938
Coef. de Determinação (R²)	0,678	0,909	0,879
Erro médio absoluto	1,939 °C	1,477 °C	1,135 °C
Erro máximo	6,703 °C	4,178 °C	3,709 °C
Erro mínimo	0,006 °C	0,004 °C	0,000 °C
Desvio padrão do erro	1,367	0,880	0,816

Avaliando as temperaturas estimadas pelo **Modelo 1** (Figura 8) percebe-se que há uma tendência para subestimar os valores das temperaturas nos dias com condições atmosféricas mais estáveis, implicando em

seqüências de estimativas com erros relativamente grandes, o que se visualiza como um descolamento em relação às temperaturas medidas antes da metade e no final do período das estimativas.

Conforme esperado, embora a correlação entre dados medidos e estimados pelo Modelo 1 (Tabela 1) seja classificada como forte, é bem menor que a dos modelos 2 e 3. O erro absoluto é 68% maior que o erro do modelo 3 e o desvio padrão também é significativamente maior.

Em resumo, a regressão simples, relacionando a temperatura interna com a externa de forma direta, apresenta estimativas modestas e, havendo alternativas, não é um modelo recomendável.

Em relação às temperaturas estimadas pelo **Modelo 2**, percebe-se também uma tendência a subestimar os valores nos períodos de condições climáticas mais estáveis e prever temperaturas máximas menores que as medidas. No entanto, a precisão é muito boa em relação às temperaturas dos dias no centro do período, quando os dados medidos foram afetados pela entrada de uma frente fria. A precisão neste período específico é certamente reflexo dos dados utilizados para calibração, que também apresentaram temperaturas internas e externas mais baixas.

O erro do Modelo 2 tende a ser negativo (temperaturas previstas menores que as medidas), menor que o do modelo 1, mas superior ao do modelo 3.

Embora levemente deslocada para baixo, a forma geral do gráfico de temperaturas estimadas pelo Modelo 2 (Figura 8) é próxima ao do das medidas, o que explica a alta correlação (Tabela 1) apesar de um erro médio absoluto de 1,477°C.

A forma geral do gráfico das temperaturas estimadas pelo **Modelo 3** (Figura 8) não apresenta tendências tão claras quanto as dos outros modelos. Inicialmente as temperaturas estimadas são inferiores às medidas, depois superiores e depois inferiores novamente, em movimentos de autocorreção. Essa variação da forma resultou em correlação levemente inferior à do Modelo 2, mas também em um erro médio 28% menor que o desse modelo.

Nas estimativas do Modelo 3 ocorreram erros significativos localizados nos momentos em que a temperatura externa apresenta quedas abruptas, enquanto os erros dos outros modelos são distribuídos em períodos mais longos. Os erros maiores nestes momentos específicos impactaram o erro médio (Tabela 1). Mas mesmo assim o erro médio foi inferior aos dos demais modelos.

Aparentemente, nos momentos de queda abrupta da temperatura externa do ar, a edificação apresentou taxas menores de variação da temperatura interna.

O experimento mostrou que o Modelo 3 precisa ser avaliado com vista à correção do problema verificado. No entanto, em termos gerais, as estimativas neste experimento foram levemente melhores que as do Modelo 2 (correlação equivalente e erros menores), validando a realização de estudos mais aprofundados, para além das células teste, com residências ou edificações de pequeno porte e também com dados de verão.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apresentou-se um modelo alternativo para estimativa de temperaturas internas horárias, aqui denominado Modelo 3. Equações para esse e outros dois modelos, com cujos resultados realizou-se comparação, foram gerados a partir de um primeiro período de dados. De posse dos modelos gerados, realizaram-se estimativas para um período seguinte. Os dois períodos de dados eram de inverno.

Para o conjunto de dados utilizado, o Modelo 3 mostrou-se bem superior ao modelo 1, que tem como variável dependente a temperatura horária interna e como independente a temperatura externa. O Modelo 3 também mostrou-se equivalente ao Modelo 2 (regressão cuja variável independente foi a média móvel das temperaturas externas) em se tratando da correlação. Em se tratando da margem de erro, apresentou resultados melhores que os outros dois modelos aplicados.

Os dados obtidos apontam a viabilidade do modelo proposto enquanto alternativa para a estimativa de temperaturas internas do ar.

O estudo também mostrou que o modelo alternativo proposto é sensível a quedas bruscas de temperatura média diária externa, que levam a um aumento do erro, aspecto que deve ser abordado em estudos futuros. Também cabem estudos futuros quanto a estimativas para dados de verão e residências ou construções de pequeno porte.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CHENG, B. **Predicting Thermal Performance of Building Design in Hong Kong: Scale Model Measurement and Field Study**. Hong Kong: 2004. Thesis Submitted in Partial Fulfilment of the Requirements for the Degree of Master of Philosophy in Architecture, Chinese University of Hong Kong, 2004.

- COLONELLI, P.; HORMAZÁBAL, N.; GIVONI, B. Comparison of Different Tools to Predict Thermal Performance of Low-Income Housing in Central Chile. In: THE 20TH CONFERENCE ON PASSIVE AND LOW ENERGY ARCHITECTURE. **Anais...** Santiago: PLEA. p.9–12, 2003.
- GONZÁLEZ, E.; KRÜGER, E. L. Enfriamento evaporativo indireto: predicción del comportamiento térmico en ciudades brasileñas. In: XII ENCONTRO NACIONAL E VIII ENCONTRO LATINO AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO (ENCAC e ELACAC 2013). **Anais...** Brasília: ANTAC. p.45–54, 2013.
- GONZÁLEZ, E.; KRÜGER, E. L.; GIORDANO, D. E. Estudo da aplicabilidade de um sistema de resfriamento evaporativo indireto para otimização do conforto térmico em residências no território brasileiro. In: XV ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO. **Anais...** Maceió: ANTAC. p.479–488, 2014.
- FERNANDES, L. C. **Utilização de equações preditivas para estimativa da temperatura interna de edificações de interesse social**. Curitiba: UTFPR, 2005. Dissertação – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Tecnologia, 2005.
- FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. R. **Manual de Conforto Térmico**. 5ª ed. São Paulo: Studio Nobel, 2001.
- GIVONI, B. Minimum Climatic Information Needed To Predict. In: THE INTERNATIONAL CONFERENCE ON PASSIVE AND LOW ENERGY ARCHITECTURE – PLEA'99. **Anais...** Brisbane: PLEA. p.197–202, 1999.
- GIVONI, B.; ROUCH, P. LA. Modelling Radiant Cooling System for Developing Countries. In: ISES 2001 SOLAR WORLD CONGRESS. **Anais...** Adelaide: Solar Energy International Society. p.175–182, 2001.
- GIVONI, B.; VECCHIA, F. Predicting thermal performance of occupied houses. In: THE 18TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON PASSIVE AND LOW ENERGY ARCHITECTURE - PLEA. **Anais...** Florianópolis: PLEA. 2001.
- KOMENO, M. H.; KRÜGER, E. L.; SPOSTO, R. M. Avaliação do desempenho térmico de sistemas construtivos para habitação de interesse social com a utilização de equações preditivas. In: ENCAC - COTEDI 2003. **Anais...** Curitiba: ANTAC. p. 1221–1228, 2003.
- KRUGER, E. L. O uso de equações preditivas na avaliação do desempenho térmico de um protótipo habitacional constituído de materiais alternativos. **Ambiente Construído**, v. 3, n. 2, p. 77–86, 2003.
- KRÜGER, E. L. Aplicação de equações preditivas a um sistema construtivo destinado à habitação de interesse social: avaliação de desempenho térmico de 11 cidades brasileiras. In: VII ENCONTRO NACIONAL SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO E V ENCONTRO LATINO-AMERICANO SOBRE CONFORTO DO AMBIENTE CONSTRUÍDO. **Anais...** Curitiba: ANTAC. p.249–256, 2003.
- KRÜGER, E. L.; FERNANDES, L. C. Error Analysis of Temperature Predictions for the Indoor Temperature in Low-Cost Houses. In: HEALTHY BUILDINGS HB 2006. **Anais...** Lisboa: International Society of Indoor Air Quality and Climate - ISIAQ, 2006.
- KRÜGER, E. L.; PAPST, A. L. Aferição de equações preditivas da temperatura ambiente quando aplicadas a uma série de dados mais recente. In: ENCAC - COTEDI 2003. **Anais...** Curitiba: ANTAC, p.1409–1416, 2003.
- KRÜGER, E. L.; RODRIGUES, E. L.; KOBAY, G. F.; CERRI, J. A.; NAKAMURA, M. O uso de protótipos experimentais de baixo custo para avaliação de materiais de vedações quanto ao seu desempenho térmico. In: I CONFERÊNCIA LATINO-AMERICANA DE CONSTRUÇÕES SUSTENTÁVEIS E X ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO. **Anais...** São Paulo: ANTAC. p.10, 2004.
- KRÜGER, E. L.; RORIZ, M. Previsão horária de temperaturas internas do ar: aplicação no estudo de células teste. In: VIII ENCONTRO NACIONAL SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO E IV ENCONTRO LATINO-AMERICANO SOBRE CONFORTO DO AMBIENTE CONSTRUÍDO. **Anais...** Maceió: ANTAC. p.948–957, 2004.
- LIMA, M. P. **Equações preditivas para determinar a temperatura interna do ar: envolventes em painel alveolar com cobertura verde**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2009. Dissertação - Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada da Universidade de São Paulo, Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental, 2009.
- MARQUES, A. M. **Desempenho Térmico de Edificações Unifamiliares de Interesse Social: Estudo de Casos em Imbituba – SC**. Florianópolis: UFSC, 2008. Dissertação – Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós- Graduação em Engenharia Civil, 2008.
- MONTEIRO, J. R. V. **Influência da Envoltória Vertical Opaca de Edificações nas Temperaturas Internas do Ar**. João Pessoa: UFPB, 2013. Dissertação - Universidade Federal da Paraíba, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana e Ambiental, 2013.
- OGOLI, D. M. Predicting indoor temperatures in closed buildings with high thermal mass. **Energy and Buildings**, v. 35, n. 9, p. 851–862, 2003.
- ONSET COMPUTER CORPORATION. **Manual HOBO Datalogger RH-Temp**. Bourne: ONSET, 1999.
- PAPST, A. L. **Método Estimativo da Temperatura Interna de Edificações Residenciais em Uso**. Florianópolis: UFSC, 2004. Tese- Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós- Graduação em Engenharia Civil, 2004.
- PAPST, A. L.; LAMBERTS, R. Relacionamento da temperatura interna e externa em edificações residenciais naturalmente ventiladas. In: VI ENCONTRO NACIONAL SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO E V ENCONTRO LATINO-AMERICANO SOBRE CONFORTO DO AMBIENTE CONSTRUÍDO. **Anais...** São Pedro: ANTAC, 2001.