



ANÁLISE DO ERRO DE ESTIMATIVAS DE TEMPERATURAS INTERNAS EM HABITAÇÕES DE INTERESSE SOCIAL

Leandro C. Fernandes (1); Eduardo L. Krüger (2)

(1) Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Tecnologia, Curitiba, Brasil, fone (041) 3015 7786, fax (041) 310 4711, (1) Universidade Comunitária Regional de Chapecó - UNOCHAPECÓ, Centro Tecnológico – CETEC, Chapecó, Brasil, fone (041) 3015 7786, fernandes_arq@yahoo.com.br

(2) Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Tecnologia, Curitiba, Brasil, fone (041) 310 4723, fax (041) 310 4711, krueger@ppgte.cefetpr.br.

RESUMO

Este estudo objetiva aprofundar as pesquisas a respeito da aplicação da ferramenta estatística análise de regressão na estimativa do desempenho térmico de habitações de interesse social. A partir da relação entre temperaturas internas e externas, obtém-se equações de regressão linear, ou preditivas, permitindo estimar temperaturas mínimas, médias e máximas internas de edificações, para dias específicos do ano, baseando-se apenas nas temperaturas externas. É possível estimar o comportamento térmico de edificações em climas diferentes, facilitando a especificação de tipologias por regiões climáticas. A pequena necessidade de dados torna as equações interessantes para o Brasil, país com diversidade climática, disponibilidade de tipologias construtivas, mas carente de recursos e dados. Onde o déficit habitacional é estimado em 6,5 milhões de unidades e 11 milhões de habitações são consideradas inadequadas. Os dados utilizados na pesquisa foram coletados em três períodos, entre 2000 e 2002, para 14 habitações em Curitiba. Obteve-se equações para cada moradia. Explicou-se parcialmente o erro obtido nas estimativas a partir da correlação com as características termofísicas e a amplitude térmica interna das edificações, e verificando-se a linearidade da relação entre temperaturas internas e externas medidas.

Palavras chave: predição de temperatura, regressão linear, conforto térmico, habitação de interesse social.

ABSTRACT

The purpose of this study is to fully understand the use of the regression analysis technique for thermal evaluation of low-cost houses. By means of equations, generated by regression analysis, so called predictive formulas, which are generated from the relationship between indoor and outdoor temperatures, it is possible to predict for specific periods of the year indoor temperatures. It has been shown that such formulas can be used for other climatic conditions, other than those of the monitoring location. Thus, predictive formulas have the advantage of helping specify building typologies and materials for different climatic conditions. Since the necessary data for such predictions are minimal, the method brings advantages for Brazil, considering its huge territory and climatic diversity. The Brazilian deficit, regarding the low-cost housing sector, comprehends around 6.5 million housing units and approximately $\frac{1}{4}$ of all existent residential units can be considered inadequate. In this paper, temperature data, monitored in three different periods with dataloggers in 14 dwellings were used for predictions. The error analysis took into account thermophysical characteristics of the monitored

houses and temperature amplitudes, measured in such houses, verifying the existence of a linearity in the relationship between indoor and outdoor temperatures.

Keywords: temperature prediction, regression analysis, thermal comfort, low-cost houses

1. INTRODUÇÃO

O Brasil, segundo a Fundação João Pinheiro (2002), apresenta um déficit de aproximadamente 6,5 milhões habitações. Grande parte das famílias carentes de moradia é incapaz de resolver o problema por si, necessitando da intervenção estatal, através de Habitações de Interesse Social. No entanto, o Estado tem priorizado excessivamente a questão do custo, em detrimento da qualidade. A disseminação de moradias desconsiderando o conforto térmico tem resultado, em algumas regiões, em edificações impróprias para habitação. Nesse contexto, pesquisa-se maneiras de estimar o comportamento térmico das edificações, para facilitar sua especificação segundo diferentes climas. As equações de regressão linear, também chamadas preditivas, obtidas a partir de análise de regressão, relacionando temperaturas internas e externas de uma edificação, vão de encontro a esse objetivo (GIVONI, 1999).

As equações de regressão linear permitem estimar as temperaturas mínimas, médias e máximas internas de edificações, para dias específicos do ano, baseando-se apenas nas temperaturas externas.

Givoni e Vecchia (2001) demonstraram a aplicação de equações de regressão linear para estimar temperaturas internas de edificações ocupadas. Komeno (2002) mostrou que as estimativas através das equações possuem qualidade similar às de softwares de simulação térmica (COMFIE e ARQUITROP). Também, que é possível estimar o comportamento térmico de uma edificação para climas diferentes daquele em que o protótipo foi implantado, facilitando a especificação de tipologias ou permitindo estimar a demanda por aparelhos de condicionamento de ar.

Atualmente, vários estudos têm aplicado as equações para avaliar o desempenho térmico de edificações. Porém, como em métodos utilizando softwares ou avaliações paramétricas, verificam-se diferenças entre dados estimados e medidos. Uma tentativa de sistematizar a aplicação de equações preditivas, comparativamente a outras formas de avaliação de desempenho térmico de edificações mostra a tabela 1 a seguir.

Tabela 1- Métodos de avaliação, aplicação e grau de precisão

Método	Informações necessárias	Aplicação	Grau de segurança
Métodos analíticos (cálculos em regime estacionário, situações pontuais)	Dados climáticos simplificados (médias mensais ou Normais Climatológicas); Dados construtivos e de ocupação	Cálculos de carga térmica, anteprojeto, comparações entre alternativas de projeto	Baixa precisão, algoritmos consolidados
Equações preditivas (diárias e horárias)	Dados experimentais externos e internos em protótipos ou test-cells em períodos distintos do ano (inverno e verão); não são necessários dados construtivos e de ocupação	Avaliação térmica para outras épocas do ano a partir das equações das mínimas e máximas diárias Comparação entre diferentes configurações de um mesmo projeto a partir de medições não simultâneas (projeção de valores horários para outros períodos monitorados) Avaliação térmica para outras condições climáticas a partir das equações das mínimas e máximas diárias	Boa precisão Boa precisão, devendo-se ter o cuidado em adotar períodos de condição térmica semelhante (dias estáveis) Necessidade de maior comprovação experimental ou via simulação
Simulações computacionais	Dados climáticos (simplificados ou detalhados); Dados construtivos e de ocupação	Avaliação térmica do anteprojeto (<i>design tools</i>) Avaliação termo-energética em fase de projeto ou <i>retrofit</i>	Precisão dependerá da sensibilidade do software para os parâmetros analisados Alta precisão, havendo necessidade de calibração a partir de dados medidos em certos casos (<i>retrofits</i>)

Neste estudo investigam-se as causas dessas diferenças, a partir da análise de dados utilizados para a obtenção das equações, das características termofísicas das edificações para as quais as equações foram geradas, assim como de suas amplitudes térmicas internas.

2. ANÁLISE DAS DIFERENÇAS ENTRE DADOS MEDIDOS E ESTIMADOS

2.1 Levantamento de dados

Os dados para esta pesquisa foram obtidos de 14 edificações da Vila Tecnológica de Curitiba. As edificações estiveram ocupadas por famílias levando suas vidas normalmente.

Iniciativa da COHAB-CT (Companhia de Habitação Popular de Curitiba), a Vila Tecnológica de Curitiba constitui-se de dezenas de moradias unifamiliares, construídas visando boa qualidade e baixo custo, para a população de baixa renda. Os sistemas construtivos e características térmicas diferem. Não são utilizados sistemas de condicionamento de ar (Tabela 2) (DUMKE, 2002).

O levantamento de dados foi feito em três períodos, um representativo da estação de inverno (10/07/2000 – 02/08/2000), outro de verão (14/12/2000 – 09/01/2001) e um terceiro período intermediário (03/08/2002 - 01/09/2002). Destas etapas constituíram os trabalhos de Dumke (*op. cit.*) e Papst (2004). Para a medição de temperatura utilizou-se *dataloggers* marca HOBO, da *Onset Corporation*. Os aparelhos foram programados para fazer a medição de temperatura de 15 em 15 minutos e instalados no centro das edificações, a 50cm do forro.

Tabela 2 - Descrição dos sistemas construtivos avaliados

SISTEMA	PAREDE	ÁREA[m ²]
MLC-Engenharia /RS	Painéis de concreto armado com camada isolante interna de lajotas cerâmicas.	39,6
Battistella/SC	Painéis de madeira com revestimento acrílico.	36,4
Kürten/PR	Painéis de madeira de pinus.	43,5
Constroyer /SP	Painéis monolite de poliestireno expandido entre telas de aço, revestidos com argamassa.	37,3
Andrade Gutierrez/MG	Tijolos de solo-cimento.	36,6
Todeschini/MS	Kit pré-fabricado de madeira de lei.	32,8
ABC Construtora/MG	Painéis de concreto celular.	40,1
Eternit/SP	Painéis de madeira revestidos com chapas de fibrocimento.	51,5
Faci Casas/PR	Placas de concreto armado.	39,8
Paineira/DF	Painéis duplos de concreto com câmara de ar, rebocados externamente.	36,9
Cohab-Pará/PA	Tijolos cerâmicos vazados.	31,0
Castellamare/PR	Blocos de concreto vazados.	40,2
Tetolar/PR	Placas de concreto armado.	43,6
CHJ/SP	Painéis monolíticos de concreto armado sem reboco.	40,6

2.2 Procedimento para obtenção das equações

Através de análise de regressão, relacionando temperaturas mínimas, médias e máximas internas com suas correspondentes externas, para os três períodos citados, obteve-se equações de regressão. Seguiu-se os passos descritos por Givoni (1999):

- 1 - Em gráficos onde são representadas as seqüências de temperaturas internas e externas, para cada tipologia, avalia-se o padrão de comportamento das internas em relação às externas, permitindo, para a análise de regressão, apontar quais serão adotadas como variáveis explicativas;
- 2 - Definidas as variáveis explicativas, através de software, realiza-se regressão múltipla, obtendo-se as equações de regressão para cada tipologia construtiva;
- 3 - A partir das equações de regressão preliminares obteve-se as equações preditivas pela inserção do coeficiente ΔT através de uma operação algébrica. Assim, pelo método original, as equações são expressas conforme o exemplo da tipologia construtiva MLC:

$$T_{min \text{ int}} = 0,82 \cdot GT_{min} + 0,82 \cdot (T_{min} - GT_{min}) + 0,36 \cdot [T_{med} (n-1) - T_{min}] + 5,88 \quad [\text{Eq. 01}]$$

$$T_{med \text{ int}} = 0,82 \cdot GT_{med} + 0,74 \cdot (T_{med} - GT_{med}) + 5,88 \quad [\text{Eq. 02}]$$

$$T_{max \text{ int}} = 0,69 \cdot GT_{max} + 0,52 \cdot (T_{max} - GT_{max}) + 5,88 \quad [\text{Eq. 03}]$$

Onde: $T_{min \text{ int}}$, $T_{med \text{ int}}$ e $T_{max \text{ int}}$ são as temperaturas internas a serem calculadas, GT_{min} , GT_{med} e GT_{max} são médias das temperaturas externas e T_{min} , T_{med} e T_{max} são temperaturas mínimas, médias e máximas externas, $T_{med} (n-1)$ sendo a temperatura média externa do dia anterior.

2.3 Avaliação dos dados medidos (temperaturas internas e externas)

As equações preditivas fundamentam-se na linearidade da relação entre temperaturas internas e externas. Porém, analisando dados medidos verifica-se que, para as temperaturas mínimas e máximas, essa linearidade não é constante quando a temperatura externa se aproxima de valores muito altos ou baixos.

Quando próxima de valores muito baixos, a temperatura interna passa a não refletir proporcionalmente as sucessivas quedas, resistindo às oscilações externas, principalmente nas edificações de maior inércia térmica. Supõem-se que, quanto mais baixas as temperaturas externas, maior a ação dos usuários no sentido de isolarem o ambiente interno do externo, fechando as aberturas, utilizando tapetes, permanecendo por mais tempo no interior das edificações, permitindo a entrada de radiação solar etc.

A figura 1 mostra a relação não linear entre temperaturas mínimas medidas.

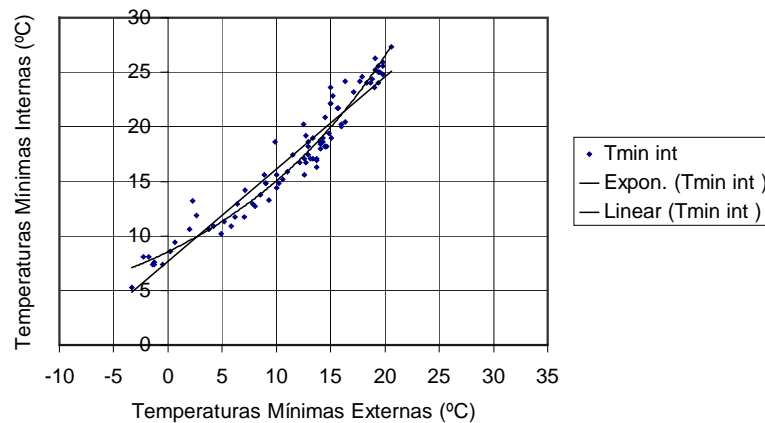


Figura 1- Temperaturas mínimas internas x mínimas externas – tipologia Andrade Gutierrez

Comparando-se as temperaturas internas mínimas estimadas com as medidas (Figura 2), percebe-se que quando ocorrem as mais baixas temperaturas externas, as estimadas serão menores que as medidas. Considerar a relação como linear implica em aceitar certo erro nos dias mais frios.

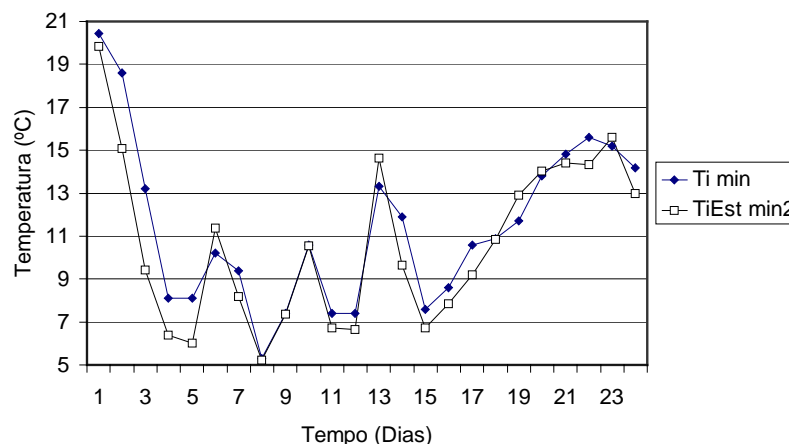


Figura 2 - Temperaturas mínimas estimadas x mínimas medidas (10/07/00 – 02/08/00) – Andrade Gutierrez

Quanto às temperaturas médias, para a maioria das edificações, a relação entre temperaturas externas e internas medidas, se tomada como linear não implicará em erros significativos nas estimativas, conforme figura 3. A relação será mais linear para as edificações de menor inércia.

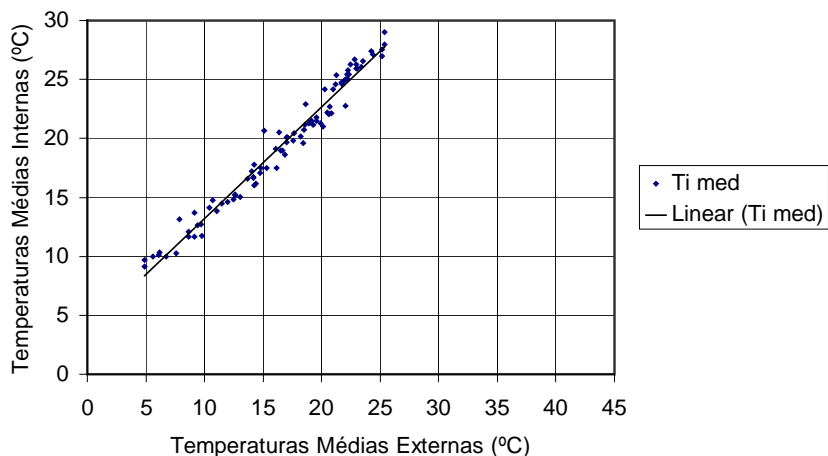


Figura 3 - Temperaturas médias internas
×
médias externas - tipologia Batistella

Sobre as temperaturas máximas medidas, as internas apresentam grande dispersão em suas respostas às externas, porém obedecendo a uma relação próxima da linear. Quanto mais altas as temperaturas, menos dispersas as respostas. Supõem-se que os usuários promovam maior integração entre clima interno e externo nos momentos mais quentes do dia através de ventilação.

Também observa-se que as temperaturas mais altas se comportam no sentido de aumentar o coeficiente angular da reta de regressão. Supõem-se que, devido aos ganhos por radiação, a edificação passa a acumular mais calor do que libera para o meio. Como consequência, a estimativa a partir da regressão linear subestimar os picos de temperatura, estimando valores inferiores aos registrados internamente. A figura 4 exemplifica essa situação (tipologia Facicasas).

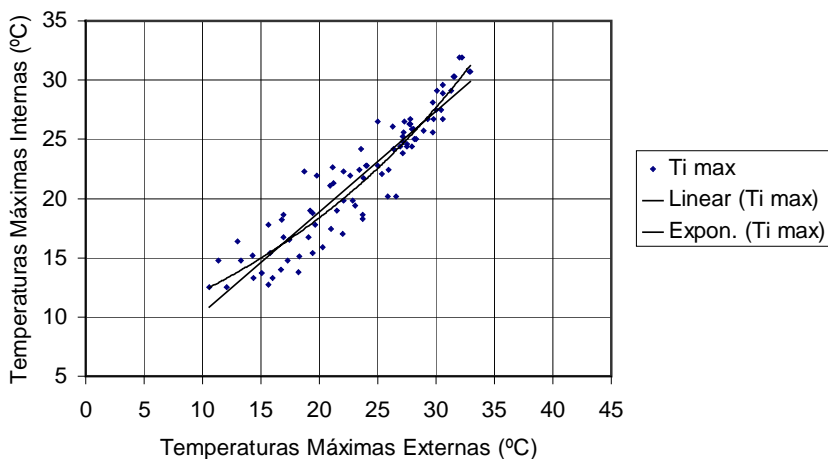
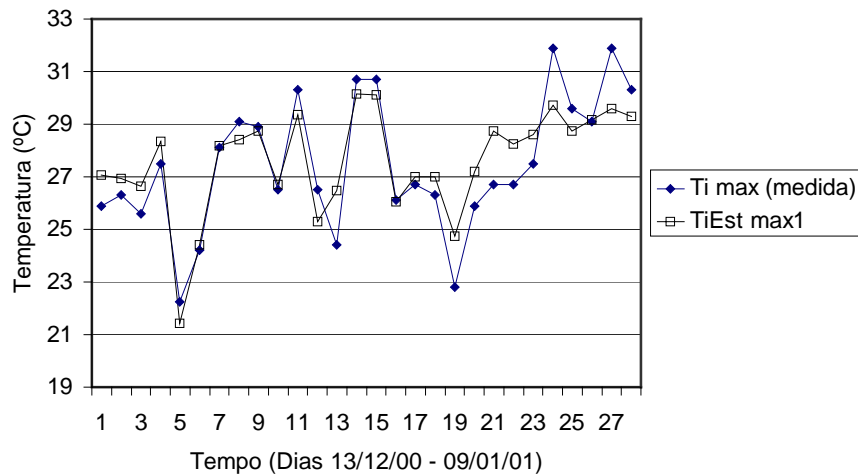


Figura 4 - Temperaturas máximas internas medidas
×
máximas externas – Facicasas

A figura 5, comparando as temperaturas máximas internas medidas e estimadas, evidencia a incapacidade de estimar os picos.



**Figura 5 - Temperaturas máximas internas medidas
x
estimadas (13/12/00 – 09/01/01) - Facicasas**

2.4 Análise das diferenças entre dados medidos e estimados

2.4.1 Características termofísicas

Cheng et al. (2003) demonstraram a grande influência de massa térmica sobre as temperaturas internas, principalmente sobre as mínimas e máximas. Neste, tentou-se avaliar se essa influência se estende aos erros nas estimativas das equações de regressão linear.

Utilizando o método citado na parte 2 da Norma de Desempenho Térmico de Edificações, Dumke (2002) obteve os dados referentes às características termofísicas dos elementos componentes das edificações aqui estudadas:

- “U” - transmitância, calculada para as paredes e para a cobertura. Está relacionada à condutividade térmica dos materiais e espessuras das camadas;
- “Fi” ou “ φ ” – em horas, o atraso térmico se refere ao tempo necessário para que a onda de calor atravessasse um elemento;
- “FCS” – fator de calor solar, se refere aos ganhos por radiação a partir dos elementos opacos e transparentes, componentes da envoltória da edificação (paredes, cobertura, aberturas);
- “nI” – número de horas de sol da moradia, levantado para cada uma das paredes externas, nos períodos de inverno e verão. Objetiva fornecer dados sobre a radiação direta na edificação;
- “nI x vidro”, área de vidro das paredes externas dividida pela área total destas paredes e multiplicada pelo número de horas de sol. Objetiva avaliar a influência da radiação solar direta sobre a temperatura interna através do efeito estufa.

Após o cálculo para elementos específicos de cada edificação procedeu-se ao cálculo de um valor “equivalente” para cada moradia, de cada coeficiente citado, a partir dos valores obtidos para cada área de parede, cobertura, vidro e fachada. Ressalta-se que esse processo simplificado foi utilizado apenas com o propósito de se obter um balizamento a respeito das influências no erro das estimativas.

Para determinar a influência de cada característica termofísica, calculou-se a correlação existente entre o R^2 (entre temperaturas medidas e estimadas) e o EPE (erro padrão da estimativa) e as características termofísicas de cada edificação. Para algumas temperaturas internas estimadas o R^2 e o EPE são afetados pelo atraso térmico (Fi ou φ), principalmente da parede. A Figura 6 mostra uma representação das correlações individuais entre características termofísicas e R^2 encontrados entre dados medidos e calculados.

Os resultados que mais evidenciaram a relação com o atraso térmico referem-se às temperaturas máximas e médias. Os valores das correlações não permaneceram constantes para inverno e verão.

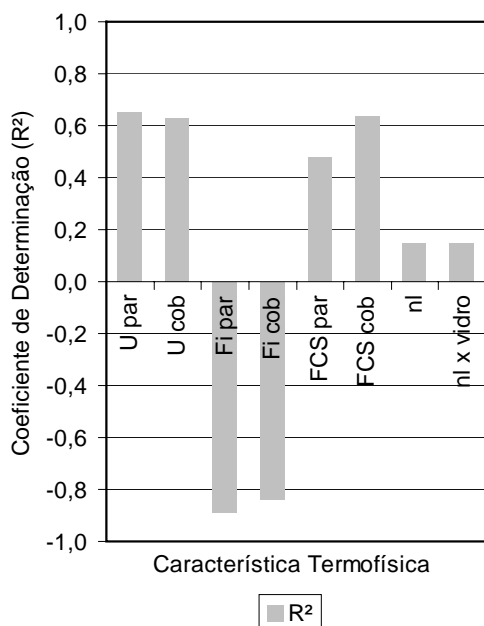


Figura 6 - Correlação Características Termofísicas
×
R² - Temp. Média - 1º Período

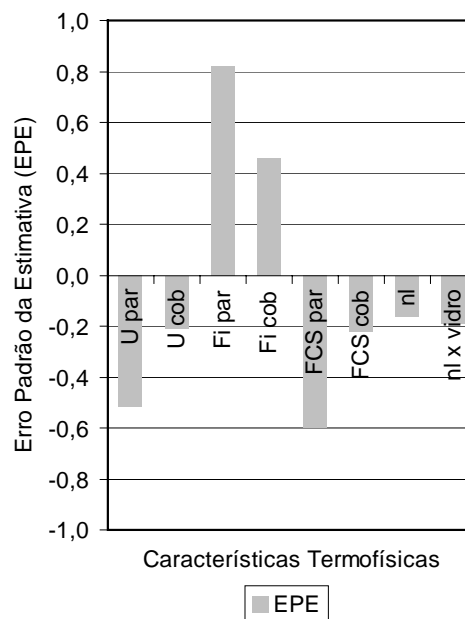


Figura 7 - Correlação Características Termofísicas
×
EPE - Temp. Média - 1º Período

Na figura 6, percebe-se correlação significativa entre o Coeficiente de Determinação (entre temperaturas estimadas e medidas) e o atraso térmico das paredes externas e coberturas (Fi par e Fi cob). A correlação é negativa, o que significa que quanto maior o atraso térmico pior a correlação.

Na figura 7, mostrando a relação entre o Erro Padrão da Estimativa (entre temperaturas estimadas e medidas) e as características termofísicas das edificações, também percebe-se relação com o atraso térmico das paredes externas e coberturas (Fi par e Fi cob). Ocorre, no entanto, mudança de sinal em relação à figura anterior, ou seja, o atraso térmico é proporcional ao erro nas estimativas obtidas através das equações. O que é coerente, pois o R² é inversamente proporcional ao EPE.

2.4.2 Amplitude e Inércia Térmica

Subtraindo-se a temperatura mínima diária da máxima diária obtêm-se a amplitude térmica diária ($A = T_{i \max} - T_{i \min}$). A média aritmética das amplitude diárias de um período fornece a amplitude térmica média do período. De forma semelhante se obtêm a amplitude média de um conjunto de períodos.

Correlacionou-se as amplitudes térmicas das edificações com o R² e o EPE (entre dados estimados e medidos).

Nas estimativas para o período de inverno, observou-se correlação significativa entre o R² e EPE e as amplitudes térmicas internas das edificações. As estimativas para a temperatura média e a temperatura máxima interna apresentaram as correlações mais expressivas (Tabela 3).

Tabela 3 - Correlações: R² e EPE
×
amplitude interna (A) - período de inverno

	Ti min		Ti med		Ti max	
	R²	EPE	R²	EPE	R²	EPE
"A" 1º período	0,77	-0,59	0,79	-0,78	0,81	-0,73
"A" média	0,80	-0,61	0,80	-0,80	0,90	-0,83

Para a temperatura média e para a máxima interna:

- o R^2 aumenta conforme aumenta a amplitude. Quanto maior a variação da temperatura interna da residência, maior a correlação entre dados estimados e medidos;
- o EPE é inversamente proporcional à amplitude. Quanto maior a inércia térmica da edificação, maior o erro.

Naturalmente, o R^2 é inversamente proporcional ao EPE, quanto maior correlação menor o erro.

A figura 8 apresenta a correlação entre o coeficiente de determinação (R^2) e a amplitude térmica (A) média das edificações.

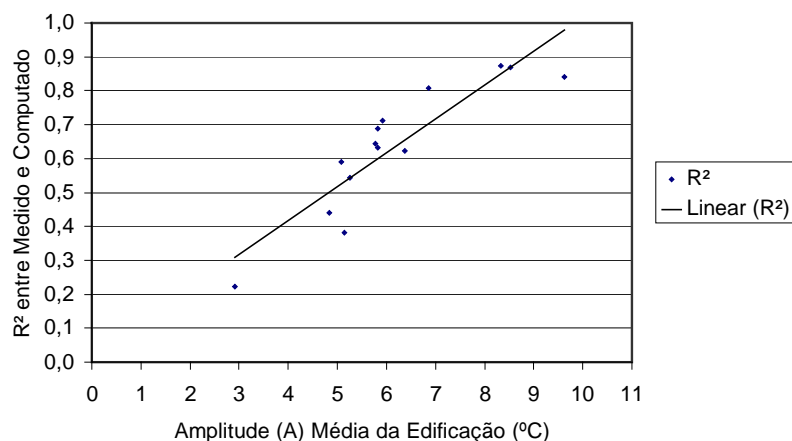


Figura 8 - R^2 (entre temperaturas estimadas e medidas no local - para T_i max1) × Amplitude Média (“A”) – temp. máxima

Quanto maior a amplitude térmica interna, maior o coeficiente de determinação. Ou seja, mais próximas as temperaturas estimadas e medidas. Menor o erro.

As mesmas correlações se verificam para o 2º e 3º período (Tabelas 4 e 5).

Tabela 4 - Correlações: R^2 e EPE × amplitudes (média e do 2º período)

	Ti min		Ti med		Ti max	
	R^2	EPE	R^2	EPE	R^2	EPE
“A” 2º período	0,38	-0,37	0,79	-0,73	0,60	-0,81
“A” média	0,45	-0,38	0,75	-0,69	0,59	-0,80

Tabela 5 - Correlação: R^2 e EPE × amplitudes (média e do 3º período)

	Ti min		Ti med		Ti max	
	R^2	EPE	R^2	EPE	R^2	EPE
“A” 1º período	0,50	-0,57	0,68	-0,66	0,74	-0,80
“A” média	0,49	-0,60	0,67	-0,65	0,72	-0,75

3. CONCLUSÕES

Analisando-se os dados medidos, pode-se dizer que: a regressão linear é uma boa ferramenta para a estimativa das temperaturas médias internas para habitações semelhantes às aqui estudadas.

Para as temperaturas mínimas e máximas internas os resultados das estimativas serão melhores se as temperaturas externas oscilarem entre 10°C e 25°C, conforme se pode observar nos gráficos, sendo necessários estudos específicos para determinação de uma faixa segura. Se as temperaturas mínimas externas estiverem abaixo desse patamar, a estimativa das internas, através de regressão linear, apresentará erro significativo. Assim como para a estimativa das máximas, se as externas

ultrapassarem 25°C. Ou seja, há limites para a aplicação da regressão linear na estimativa de temperaturas mínimas e máximas internas, sendo os climas mais amenos e de menor amplitude os mais apropriados para sua aplicação.

Em relação às características termofísicas, especificamente sobre o atraso térmico, sugere-se que em pesquisas futuras este seja considerado de alguma forma nas equações, com o intuito de diminuir as margens de erro. Caso não for possível, deve-se restringir a aplicação das equações de regressão linear às edificações com pequeno atraso térmico.

Sobre a relação do erro com a amplitude e inércia térmica, corroborando as observações sobre as características termofísicas, verifica-se que a amplitude térmica influencia diretamente nas estimativas: quanto maior a amplitude térmica interna de uma edificação melhor serão os resultados das estimativas para essa edificação.

REFERÊNCIAS

CHENG, B.; GIVONI, B.; NG, E. (2003) “Sensitivity of Envelope Colour: Effect of thermal mass, Windows, and natural ventilation on high-rise buildings in hot humid Hong Kong”. in: PLEA 2003. Santiago.

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. 210f. Dissertação (Mestrado em Programa de Pós-Graduação em Tecnologia) – Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná.

FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO. “Déficit habitacional no Brasil 2000”. Belo Horizonte, 2002.

GIVONI, B. Minimum climatic information needed to predict performance of passive buildings in hot climates. In: THE INTERNATIONAL CONFERENCE ON PASSIVE AND LOW ENERGY ARCHITECTURE – PLEA’99. 1999, Brisbane, Austrália. p.-197-202.

GIVONI, B., B.; VECCHIA, F. Predicting thermal performance of occupied houses. In: THE 18TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON PASSIVE AND LOW ENERGY ARCHITECTURE. 2001, Florianópolis, Brasil.

KOMENO, M. K. “Avaliação do desempenho térmico de sistemas construtivos para habitações de interesse social com a utilização de equações preditivas e simulação por meio de software”. Brasília, 2002. 133f. Monografia de Graduação (Faculdade de Tecnologia – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental), Universidade de Brasília.

PAPST, A. L. “Método Estimativo da Temperatura Interna de Edificações Residenciais em Uso”. 2004. 179f. Tese de Doutorado (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina.