

APLICAÇÃO DE EQUAÇÕES PREDITIVAS A UM SISTEMA CONSTRUTIVO DESTINADO À HABITAÇÃO DE INTERESSE SOCIAL: AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO TÉRMICO EM 11 CIDADES BRASILEIRAS

Eduardo L. Krüger

Prof. Dr. Programa de Pós-Graduação em Tecnologia (PPGTE), Prof. Departamento de Construção Civil - Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná - CEFET-PR
Av. Sete de Setembro, 3165 CEP 80230-901 Curitiba - PR.
e-mail: krueger@ppgte.cefetpr.br

RESUMO

Reconhecendo a necessidade de se criar ferramentas simples para a avaliação de novos sistemas construtivos, destinados à habitação popular, no caso brasileiro usualmente implantados sem atenção ao clima local, o presente artigo mostra a aplicação da metodologia de predições de temperatura a cidades de condições climáticas diversas. Com base nos dados advindos de um monitoramento num protótipo habitacional padrão popular, realizado em Curitiba, gerou-se as equações, que foram então adotadas para cidades de um clima diverso do original. Isso se tornou possível, pois as equações partem de parâmetros da temperatura externa para prever as condições internas de temperatura.

ABSTRACT

Regarding the necessity of generating simple tools to evaluate new building systems, destined to low-cost housing, which, in Brazil, are usually adopted with no regard to local climatic conditions, the present paper shows the application of the methodology of temperature predictions in cities of very different climatic conditions. Based on monitoring results of a low-cost house prototype, built in Curitiba, predictive formulas were generated, which were then applied to cities with climates that are very different from the original one. This was possible, because the equations take only outdoor temperature parameters into account, in order to predict indoor temperature conditions.

1. INTRODUÇÃO

A procura por uma sistematização de parâmetros habitacionais para a população de baixa renda no Brasil face à diversidade climática e cultural que caracteriza o país, levou, nos últimos tempos, acadêmicos e pesquisadores à concepção de um Projeto de Norma Técnica sobre Desempenho Térmico de Edificações (no âmbito do Comitê Brasileiro de Construção Civil CB-02 da ABNT, desenvolvido pela Comissão de Estudo de Desempenho Térmico de Edificações). O objetivo dessa Norma, como também de qualquer projeto da denominada Arquitetura Bioclimática é a busca de soluções arquitetônicas que sejam climaticamente adequadas à região onde se pretende construir. No caso brasileiro, a falta de padrões normativos quanto a esse aspecto resultou na adoção indiscriminada de um sistema construtivo convencional, também denominado moradia popular padrão COHAB, em todo o território nacional, que consiste basicamente de alvenaria de tijolos cerâmicos recobertos de argamassa com cobertura de telhas cerâmicas.

A avaliação do desempenho térmico de determinada tipologia construtiva quanto a condições climáticas diversas pode ser realizada através de cálculos simplificados, baseados em equações de transferência de calor, ou de simulações de desempenho térmico, sendo as últimas mais indicadas para condições climáticas de grande variabilidade térmica, condição característica do clima brasileiro de forma geral. O uso desses softwares, porém, requer tempo e habilidade do usuário e, por outro lado, dados arquitetônicos, climáticos e relativos às características termofísicas dos principais componentes da edificação em estudo, que nem sempre são precisos e/ou disponíveis. Neste sentido, um método relativamente simples de se replicar o comportamento térmico de determinada edificação para outras condições climáticas, além daquela original, consiste na obtenção e uso de equações preditivas para avaliação de desempenho.

O procedimento de obtenção de equações preditivas para habitações monitoradas desenvolveu-se a partir da pesquisa de 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. As equações foram desenvolvidas após medições em duas pequenas habitações (25m²), localizadas em Pala, no Sul da Califórnia. As medições de temperatura foram feitas ao longo de dois anos, sob diversas condições, variando-se o grau de sombreamento de janelas das habitações, ventilação e iluminação e cores das paredes e telhados. 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. Exemplificando, a equação da temperatura interna máxima pode ser predita pela Equação 1:

$$T(\text{in}) \text{ max} = GT_{\text{avg}} + \text{DelT} + k*(T_{\text{avg}} - GT_{\text{avg}}) \quad (\text{Eq.1})$$

Onde:

T(in) max –temperatura máxima interna do dia analisado

GT_{avg} –temperatura média externa no período analisado

DelT –elevação média da temperatura máxima interna sobre a média da temperatura externa

k –razão da variação diária entre a máxima interna e a média externa

T_{avg} –temperatura média externa do dia analisado

Assim, estas equações funcionam como uma assinatura de cada habitação, através da qual é possível prever a sua temperatura interna a partir de poucos dados da temperatura externa.

A metodologia desenvolvida por Givoni foi aplicada para casas de baixo custo construídas na Vila Tecnológica de Curitiba, monitoradas por Krüger e Dumke (2001). Estas casas são de diferentes sistemas construtivos e de diferentes características termofísicas, não havendo nelas nenhum sistema de climatização artificial. As medições das temperaturas internas foram feitas com as residências ocupadas. Foram geradas equações para três habitações e os resultados das mesmas em termos de temperatura interna comparados a simulações computacionais (KOMENO, 2002), utilizando-se o software ARQUITROP. A comparação entre os resultados de ambos os métodos mostrou resultados satisfatórios, comprovando-se a eficácia das equações quando se trata de valores diários da temperatura ambiente. Além disso, essa pesquisa mostrou ser possível a utilização de equações preditivas em condições climáticas diferentes das originais, obtendo-se boa concordância entre predito e medido, tanto para Curitiba (condições climáticas originais), quanto para Brasília (neste caso, comparou-se os resultados de simulações com o ARQUITROP com os das equações para aquelas condições climáticas).

Neste artigo, caracteriza-se inicialmente um sistema construtivo constituído de material alternativo, monitorado em 2 períodos distintos quanto à temperatura ambiente. São apresentadas, em seguida, as equações preditivas geradas para os dados provenientes dessas medições. Por fim, são mostrados os resultados de avaliações de desempenho realizadas a partir dos dados gerados pelas equações preditivas, aplicadas a 11 cidades brasileiras.

2. MONITORAMENTO DE UM PROTÓTIPO HABITACIONAL CONSTITUÍDO DE MATERIAL ALTERNATIVO

A geração das equações preditivas deu-se a partir dos resultados de um monitoramento térmico de um protótipo habitacional de aproximadamente 15m² de área interna, construído com blocos ISOPET em

Curitiba. Esses blocos foram desenvolvidos no Departamento de Construção Civil da Unidade de Curitiba do CEFET-PR (Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná) e constituem-se de material alternativo na forma de compósito, contemplando o reaproveitamento (sem gasto de energia) do isopor e de garrafas plásticas do tipo PET.

Quanto a sua constituição, os blocos são confeccionados em concreto leve com EPS utilizando em seu interior garrafas plásticas inteiras, devidamente tampadas e posicionadas na vertical ou na horizontal. Os blocos apresentam encaixes laterais em forma de macho e fêmea que geram o intertravamento, não sendo necessária a utilização de argamassa nas uniões. Possuem ainda canaletas, que substituem as fôrmas na moldagem de vergas, contra-vergas e cintas de amarração. Os blocos possuem as seguintes dimensões: 40×40×15cm com e sem canaleta, pesando em média 12kg; 40×20×15cm com e sem canaleta, pesando em média 6kg. Como se trata de um material alternativo, não se tem dados precisos quanto as suas características termofísicas.

Para as medições, foram utilizados aparelhos registradores (data-loggers) de temperatura e umidade relativa do ar do tipo HOBO Temp/RH. As medições abrangeram o período de 4 de fevereiro a 9 de março de 2002 (verão) e de 29 de julho a 4 de setembro (inverno), com os aparelhos sendo programados para medir a temperatura e umidade a cada 5 minutos e os dados coletados integrados para dados horários. Externamente, um data-logger de temperatura e umidade foi disposto na fachada Sul e protegido do vento e da radiação solar direta. Internamente, tomou-se um ponto central, situado à meia altura entre o piso e o forro, como referência para a temperatura interna.

2.1 Geração das equações preditivas

O primeiro passo para criação de equações preditivas é descobrir qual parâmetro da temperatura externa pode servir de base para uma predição. A partir da análise do padrão de relações existentes entre as curvas de temperatura interna e externa, determina-se este parâmetro. Isso pode ser feito graficamente, plotando-se as temperaturas externas (mínimas, médias e máximas diárias) e comparando-as às temperaturas internas. A Figura 1 apresenta essa comparação para as temperaturas médias no protótipo, considerando os dois períodos de monitoramento. Nota-se a forte semelhança da curva de temperaturas médias internas com as médias externas.

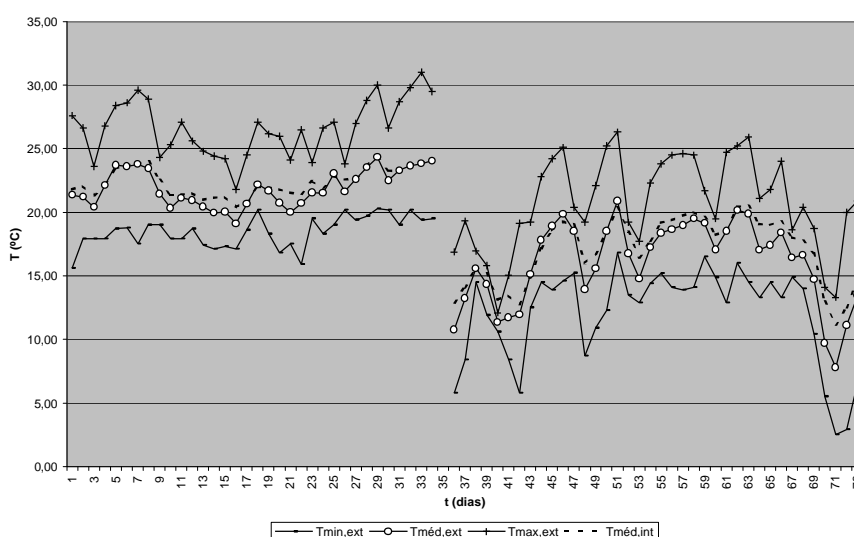


Fig.1: Padrão de relações entre temperatura média interna e mínima, média e máxima externas

A partir dessa análise, gerou-se, então, equações segundo o formato da Eq.1 para a mínima, a média e a máxima internas diárias (Tabela 1).

Tab.1: Equações preditivas para a temperatura mínima, média ou máxima diária interna do protótipo

Temperatura mínima interna	$T_{\min, \text{int}} = 0,857 * GT_{\min} + 0,816 * (T_{\min} - GT_{\min}) + 0,288 * (T_{\text{avg}(n-1)} - T_{\min}) + 3,55$	Eq.2
Temperatura média interna	$T_{\text{avg, int}} = 0,851 * GT_{\text{avg}} + 0,602 * (T_{\text{avg}} - GT_{\text{avg}}) + 3,55$	Eq.3
Temperatura máxima interna	$T_{\max, \text{int}} = 0,802 * GT_{\max} + 0,738 * (T_{\max} - GT_{\max}) + 3,55$	Eq.4

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

A comparação estatística entre dados preditos e medidos resultou nos coeficientes de determinação (R^2) 0,99, 0,97 e 0,93, para a mínima, a média e a máxima internas diárias, respectivamente, considerados satisfatórios.

3. APLICAÇÃO DAS EQUAÇÕES PREDITIVAS: AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO TÉRMICO DO PROTÓTIPO EM 11 CIDADES BRASILEIRAS

De posse das equações, é possível avaliar o desempenho térmico do protótipo para condições climáticas que não as do período de monitoramento, pois o método de aplicação das equações preditivas considera como variável somente a temperatura externa para a obtenção da temperatura interna. Assim, procedeu-se a uma avaliação do desempenho térmico do protótipo considerando sua aplicação em 11 cidades brasileiras¹.

Os dados climáticos adotados para esta análise foram os de temperatura externa, extraídos do ano climático de referência (TRY), que contém os dados da temperatura para as 8760 horas do ano. Os arquivos encontram-se em formato digital e foram adquiridos no site do Laboratório de Eficiência Energética da Universidade Federal de Santa Catarina (Labeec/UFSC)².

As temperaturas médias diárias para cada uma das 11 cidades são apresentadas na Figura 2.

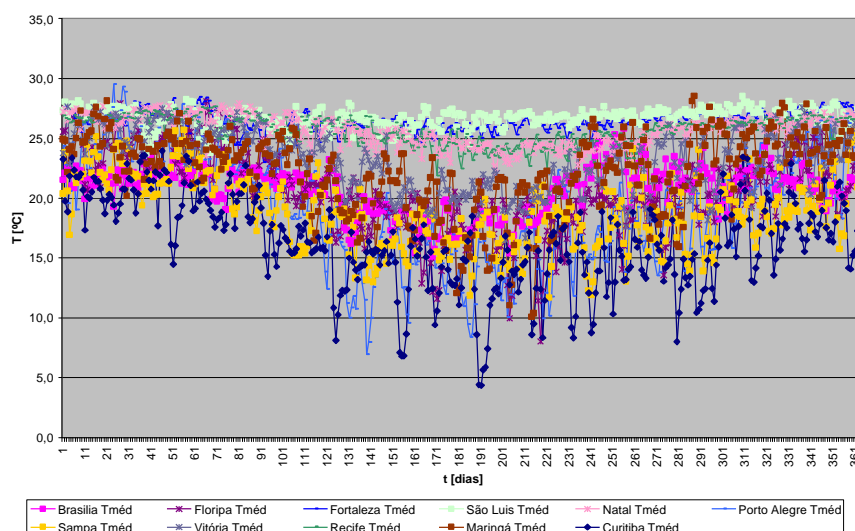


Fig.2: Temperaturas médias diárias dos anos climáticos de referência para as 11 cidades

¹ Brasília, Fortaleza, São Luís, Natal, Vitória, Recife, Maringá, Florianópolis, São Paulo, Porto Alegre e Curitiba.

² No caso de Maringá, utilizou-se o ano climático desenvolvido na Faculdade de Arquitetura da Universidade Estadual de Maringá.

A partir desses dados, aplicou-se a Eq.3 (Tabela 1), obtendo-se os resultados da Figura 3, que mostram as temperaturas médias diárias internas no protótipo, caso o mesmo fosse adotado em cada uma das 11 cidades. Para os GTs (ver Tabela 1), adotou-se as médias das mínimas, as médias e as médias das máximas externas diárias, para cada mês do ano, calculadas para cada cidade separadamente.

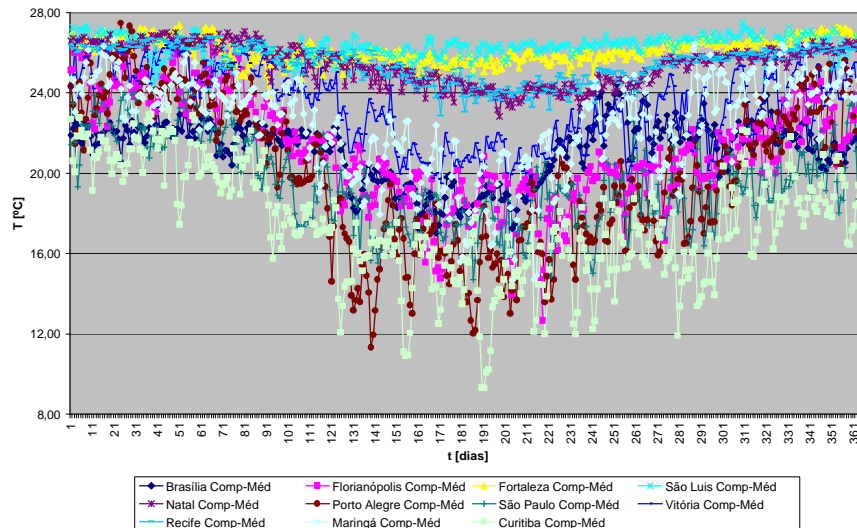


Fig.3: Temperaturas médias diárias no protótipo, aplicando as equações para as 11 cidades

As curvas de temperatura obtidas mostram claramente que o protótipo amortiza temperaturas mais altas, situando-se, porém, os resultados de diversas cidades abaixo do limite inferior de conforto, estipulado por Givoni como sendo de 18°C (GIVONI, 1992). Note-se, entretanto, que o protótipo permaneceu inabitado durante os períodos de monitoramento, com as aberturas sombreadas e sem ventilação. Havendo controle da radiação (permitindo sua entrada no inverno e impedindo-a no verão) assim como da ventilação, pelos usuários, o desempenho poderia ser ainda aumentado.

A obtenção das temperaturas médias internas diárias no protótipo permite uma primeira avaliação de desempenho, segundo o parâmetro somatório de graus-dia para aquecimento e resfriamento (considerou-se a temperatura-base de 18°C para aquecimento e de 24°C para refrigeração), para cada uma das 11 cidades. As Figuras 4 e 5 apresentam esses resultados.

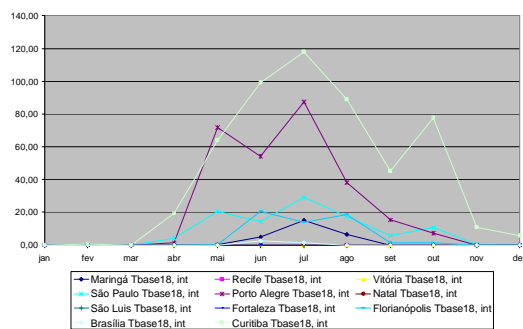


Figura 4: Somatórios de graus-dia para aquecimento (Tbase=18°C)

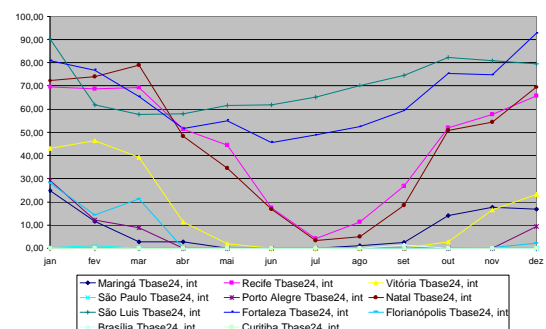


Figura 5: Somatórios de graus-dia para resfriamento (Tbase=24°C)

Excetuando-se grande parte das cidades, as que oferecem maiores e mais significativos somatórios de graus-hora para aquecimento são Porto Alegre e Curitiba, as mais frias do conjunto. Quanto ao resfriamento, como a temperatura-base adotada foi baixa (inferior ao limite de 29°C, segundo Givoni, 1992; e ao limite de 27°C, do IPT), praticamente todas as cidades apresentam algum desconforto/necessidade de refrigeração. Porém, adotando-se a temperatura de 29°C, conforme a Figura 3, não geraria qualquer resultado. Nota-se que, especialmente em duas cidades (Fortaleza e São Luís), a necessidade de refrigeração é mantida ao longo de todo o ano. A Tabela 2, a seguir, apresenta os totais anuais para cada cidade.

Tab.2: Somatórios de graus-dia anuais

Cidade	Somatório graus-dia aquecimento	Somatório graus-dia resfriamento
Maringá	26,28	94,38
Recife	0	538,18
Vitória	0	184,30
São Paulo	102,09	1,37
Porto Alegre	275,01	59,36
Natal	0	525,71
São Luis	0	843,37
Fortaleza	0	778,73
Florianópolis	55,96	65,69
Brasília	4,00	1,33
Curitiba	528,95	0

Observa-se que, quanto à necessidade de aquecimento, cidades mais ao Sul apresentam valores mais altos e, quanto à refrigeração, as cidades mais ao Norte, acompanhando esses valores as condições climáticas das cidades.

Com as mínimas e máximas internas diárias, pode-se também avaliar qualitativamente o desempenho do protótipo para cada cidade, adotando-se a metodologia do IPT. Essa avaliação foi realizada utilizando-se as equações 2 e 4 da Tabela 1, obtendo-se o somatório dos dias em que o protótipo pode ser classificado segundo os níveis de desempenho A, B ou C. Os intervalos de temperatura para cada nível, considerando os períodos de inverno e de verão, encontram-se na Tabela 3.

Tab.3: Intervalos de temperatura dos níveis de desempenho do IPT

Período	A	B	C
Verão	$T_i = 29^\circ\text{C}$	$29^\circ\text{C} < T_i = T_{\text{ext}}$	$T_i > T_{\text{ext}}$
Inverno	$T_i = 17^\circ\text{C}$	$17^\circ\text{C} > T_i = 12^\circ\text{C}$	$T_i < 12^\circ\text{C}$

Onde:

T_{ext} : valor máximo diário da temperatura do ar exterior

T_{int} : temperatura interna (adotou-se a máxima ou a mínima, para verão e inverno, respectivamente)

Avaliando-se o protótipo pelo critério do IPT, para cada uma das 11 cidades, obteve-se os seguintes resultados, dispostos em ordem crescente de desconforto (Tabela 4).

Em geral, a utilização do protótipo em todas as cidades resultou em um nível de desempenho predominantemente A (Curitiba, no inverno, é a única exceção, mas com desempenho B). Quanto ao verão, diferentemente da avaliação anterior (somatório de graus-dia para resfriamento), as cidades mais ao Norte apresentaram desempenho excelente, tendo Curitiba o maior grau de desconforto, pois as amplitudes térmicas, e não somente as temperaturas médias, influem na avaliação pelo critério do IPT. Na tabela seguinte, nota-se que, com relação ao verão, Curitiba apresenta a maior variação média no período.

Tab.4: Avaliação pelo critério IPT

IPT-inverno	Critérios			IPT-verão	Critérios		
Cidade	A	B	C	Cidade	A	B	C
Fortaleza	365	0	0	Brasília	365	0	0
São Luís	365	0	0	Fortaleza	365	0	0
Natal	365	0	0	São Luís	365	0	0
Recife	365	0	0	Natal	365	0	0
Vitória	362	3	0	Vitória	365	0	0
Maringá	311	49	5	Recife	365	0	0
Florianópolis	290	67	8	Maringá	364	1	0
Brasília	269	95	1	Florianópolis	359	6	0
São Paulo	209	155	1	São Paulo	349	16	0
Porto Alegre	201	133	31	Porto Alegre	332	33	0
Curitiba	119	185	61	Curitiba	314	49	2

Tab.5: Amplitudes térmicas para cada uma das 11 cidades

Cidade	verão	outono	inverno	primavera	ano
Recife	4,12	4,53	4,37	3,58	4,15
Fortaleza	6,32	6,91	7,22	5,85	6,57
Natal	6,84	6,57	7,51	6,68	6,90
Florianópolis	6,86	9,46	7,11	6,78	7,55
Vitória	7,57	8,16	8,35	7,00	7,77
São Luís	7,62	7,51	8,20	7,97	7,83
Brasília	8,50	12,10	13,60	8,42	10,66
São Paulo	8,91	7,82	10,16	8,92	8,95
Maringá	9,40	8,91	10,23	10,08	9,66
Porto Alegre	9,54	9,51	8,67	11,15	9,72
Curitiba	9,61	9,26	11,10	8,50	9,62

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Tomando-se como exemplo o protótipo constituído de blocos ISOPET, este trabalho mostrou o procedimento de se efetuar uma avaliação de desempenho térmico considerando outras condições climáticas além daquelas originais (onde o protótipo foi efetivamente construído), tornando viável através do uso de equações preditivas.

Note-se que, mesmo não se dispor de dados quanto às características termofísicas dos componentes do protótipo, por se tratar de material alternativo, a adoção dessas equações permite que se realize avaliações de desempenho, por as únicas variáveis consideradas estão relacionadas aos padrões de temperatura externa.

Desta forma, uma vez que se disponha de informações climáticas quanto à temperatura do ar em diversas localidades do território nacional, é possível avaliar o desempenho de habitações populares, devidamente monitoradas e para as quais se determinou tais equações, considerando-se dados climáticos diversos. No caso brasileiro, onde sistemas construtivos destinados à habitação popular são adotados indiscriminadamente em regiões de condições climáticas distintas, as equações preditivas podem contribuir para uma melhor adequação climática das mesmas, contribuindo para melhores padrões de habitabilidade da população de baixa renda.

REFERÊNCIAS

- GIVONI, B. Comfort, Climate Analysis and Building Design Guidelines. In: Energy and Buildings, Vol. 18., 1992.
- GIVONI, B.- Minimum Climatic Information Needed to Predict Performance of Passive Buildings in Hot Climates. In: PLEA 1999 (Brisbane: 1999). Proceedings... Brisbane: PLEA, 1999.
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO – IPT. Critérios mínimos de desempenho para habitações térreas de interesse social. IPT/MPO/SPU, São Paulo, s.d.p
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO – IPT. Avaliação de desempenho higrotérmico de habitações térreas unifamiliares. In: Relatório 16277, São Paulo, SP, s.p.d.
- 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. Monografia de Graduação (Faculdade de Tecnologia – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental), Universidade de Brasília.
- KRÜGER, E.L. e DUMKE, E.M.S. Thermal Performance Evaluation of the Technological Village of Curitiba – Brazil. In: PLEA 2001 (2001: Florianópolis). Proceedings... Florianópolis: UFSC, 2001.