

## **AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO DE SISTEMAS CONSTRUTIVOS PARA HABITAÇÃO DE INTERESSE SOCIAL COM A UTILIZAÇÃO DE EQUAÇÕES PREDITIVAS**

**Márcio Hissashi Komeno (1); Eduardo L. Krüger (2); Rosa Maria Sposto (3)**

(1) Acad. Engenharia Civil, UNB

e-mail: marciohk@hotmail.com

(2) 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

(3) Profª Drª, Programa de Pós Graduação em Estruturas e Construção Civil Depto. de Eng. Civil e Ambiental da Universidade de Brasília – PECC – ENC-UnB

e-mail: rmsposto@unb.br

### **RESUMO**

Equações preditivas são desenvolvidas a partir de dados coletados in loco, caracterizando uma habitação submetida a determinadas condições de uso e exposição ao clima, de acordo com as características de determinada localidade. Neste artigo, foi avaliado o uso de equações desenvolvidas para três habitações da Vila Tecnológica de Curitiba, considerando-se sua aplicação para o clima de Brasília. Foram realizadas simulações com o software ARQUITROP, sendo comparados seus resultados com os das equações. Por fim, utilizando-se o parâmetro somatório de graus-dia e o método do IPT, avaliou-se o desempenho térmico das três habitações para ambas as cidades, Curitiba e Brasília.

### **ABSTRACT**

Predictive equations are developed from data gathered with on site measurements, regarding occupied dwellings exposed to local climatic conditions. In this paper, the use of predictive formulas, developed for three different dwellings of the Vila Tecnológica of Curitiba was evaluated regarding their application for the climatic conditions of Brasília. Thermal simulations were performed with the software ARQUITROP, and the results were compared to those of the equations. Finally, the thermal performance of the three houses was evaluated considering their degree-days and the IPT method.

### **1. AS EQUAÇÕES PREDITIVAS**

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. Foram desenvolvidas após exaustivas medições em duas pequenas habitações (25m<sup>2</sup>), localizadas em Pala, no Sul da Califórnia. As medições experimentais de temperatura foram feitas ao longo de dois anos, sob diversas condições experimentais, 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 específico sistema

construtivo poderiam ser preditas com base somente nos dados de temperatura média externa. A adição da influência da radiação solar pouco contribuiu para melhorar a exatidão dos valores obtidos pelas equações.

As temperaturas das moradias com ocupação sofrem influências de seus moradores, pois estes controlam a abertura e fechamento de janelas, alterando o grau de sombreamento e ventilação de acordo com as suas necessidades. Givoni e Vecchia (2001) 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 duas habitações populares localizadas em Descalvado (SP), de 50m<sup>2</sup> cada, com moradores, havendo portanto a interferência destes sobre a temperatura interna.

Assim, estas equações funcionam como uma marca de cada habitação, através da qual é possível prever a sua temperatura interna a partir de poucos dados da temperatura exterior. A partir delas, determina-se as temperaturas máximas, médias e mínimas internas diárias da edificação, caso o ambiente em análise seja bem conhecido.

Esta mesma metodologia 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 com diferentes propriedades térmicas, não havendo nelas nenhum sistema de ar condicionado ou aquecimento. As medições das temperaturas internas foram feitas com as residências ocupadas. Na tabela 1, encontram-se as equações geradas por Givoni et al. (2002) para 3 sistemas construtivos da Vila Tecnológica de Curitiba.

**Tab. 1: Equações preditivas dos sistemas construtivos**

Sistema Construtivo	Temperatura interna	Equação Preditiva
KURTEN	Máxima	$T(\text{in}) \text{ max} = GT_{\text{max}} + 0,6 + 0,69*(T_{\text{max}} - GT_{\text{max}})$
	Média	$T(\text{in}) \text{ avg} = GT_{\text{avg}} + 4,1 - 0,067*GT_{\text{avg}} + 0,74*(T_{\text{avg}} - GT_{\text{avg}})$
	Mínima	$T(\text{in}) \text{ min} = GT_{\text{min}} + 5,4 - 0,116*GT_{\text{min}} + 0,75*(T_{\text{min}} - GT_{\text{min}}) + 0,1374*(T_{\text{avg}(n-1)} - T_{\text{min}})$
EPOTEC	Máxima	$T(\text{in}) \text{ max} = GT_{\text{avg}} + 6 - 0,06*GT_{\text{avg}} + 0,9*(T_{\text{avg}} - GT_{\text{avg}})$
	Média	$T(\text{in}) \text{ avg} = GT_{\text{avg}} + 3,7 - 0,092*GT_{\text{avg}} + 0,7*(T_{\text{avg}} - GT_{\text{avg}})$
	Mínima	$T(\text{in}) \text{ min} = GT_{\text{min}} + 5,8 + 0,182*GT_{\text{min}} + 0,75*(T_{\text{min}} - GT_{\text{min}}) + 0,26*(T_{\text{avg}(n-1)} - T_{\text{min}})$
CASTELLA MARE	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:

$T_{\text{min}}$ ,  $T_{\text{avg}}$  e  $T_{\text{max}}$  equivalem a mínima, média e máxima externas, respectivamente.

$GT_{\text{min}}$ ,  $GT_{\text{avg}}$  e  $GT_{\text{max}}$  referem-se a mínima, média e máxima do período considerado, respectivamente.

No presente trabalho, avalia-se a possibilidade do uso dessas equações para prever o desempenho da edificação em diferentes climas, mesmo que estes tenham características muito diferentes daquele para onde foram geradas as equações. Com a finalidade de se testar a eficácia dos resultados das equações, realizou-se simulações computacionais, comparando os resultados com os das equações. Para tanto, utilizou-se o software ARQUITROP.

## 2. CARACTERIZAÇÃO DOS SISTEMAS CONSTRUTIVOS

Considerou-se 3 sistemas construtivos existentes e devidamente monitorados da Vila Tecnológica de Curitiba. As tabelas 2, 3 e 4 apresentam as principais características dos componentes e materiais utilizados para telhado, parede e piso dos 3 sistemas analisados.

**Tab. 2: Características da Cobertura**

Sistema Construtivo	Componente	r (kg/m <sup>3</sup> )	l (W/m°C)	c (J/Kg.°C)	e (cm)
Kurten	Telha de Barro	1500	0,9	936	1,3
	Camada de ar	---	---	---	80
	Forro de madeira	500	0,15	1332	1
Epotec	Telha de Barro	1500	0,9	936	1,3
	Camada de ar	---	---	---	40
	Aglomerado (fibra de madeira)	250	0,6	2300	0,6
	Revestimento Acrílico	1200	0,2	3600	0,2
Castellamare	Telha de Fibrocimento	1700	0,65	828	0,5
	Camada de ar				75
	Forro de madeira	450	0,15	1332	1

**Tab. 3: Características da parede**

Sistema Construtivo	Componente	r (kg/m <sup>3</sup> )	l (W/m°C)	c (J/Kg.°C)	e (cm)
Kurten	Painéis de Madeira	600	0,15	1332	2,2
Epotec	Argamassa Epóxi	2000	1,15	1000	1,2
	Chapa de madeira	900	0,2	2300	0,3
	Poliestireno	35	0,03	1670	5
Castellamare	Reboco	2000	0,93	0,16	1,5
	Concreto	2000	0,93	0,16	12
	Reboco	2000	0,93	0,16	1,5

**Tab. 4: Características do piso**

Sistema Construtivo	Componente	r (kg/m <sup>3</sup> )	l (W/m°C)	c (J/Kg.°C)	e (cm)
Kurten	Concreto	1700	1,40	1008	5,0
Epotec, Castellamare	Concreto	2400	1,75	1008	5,0

### 3. METODOLOGIA

A temperatura interna de uma edificação é resultado de suas condições típicas de exposição ao clima e à ocupação. Como forma de avaliar o comportamento térmico de uma edificação pode-se dispor de medições in loco ou cálculos, geralmente realizados por softwares, sendo estes últimos mais recomendáveis devido à impossibilidade de se proceder a avaliações de desempenho em regiões climáticas distintas do local onde se realizou o monitoramento. Para o estudo do desempenho térmico de habitações de interesse social em diferentes climas com a utilização de equações preditivas, adotou-se as seguintes etapas metodológicas:

**Utilização das equações preditivas:** Com os dados do ano climático de referência (TRY) de Brasília e Curitiba, utilizou-se as equações dos três sistemas construtivos. Inserindo-se estes dados de temperatura externa nas equações, foi possível encontrar as temperaturas máximas, médias e mínimas internas de cada habitação em todos os dias do ano.

**Verificação de correlações entre os resultados de temperaturas internas máximas, médias e mínimas para as equações preditivas e para o ARQUITROP:** Os dados climáticos utilizados nas simulações também foram os do TRY para as cidades de Brasília e Curitiba. Isso se fez necessário para que se partisse dos mesmos dados de entrada, tanto para as equações, quanto para as simulações. Os resultados das

simulações no ARQUITROP das habitações de Castellamare, Epotec e Kurten foram comparados com os valores das temperaturas máximas, médias e mínimas internas (médias dos valores do mês considerado), obtidas através das equações preditivas. Esta análise foi realizada para as cidades de Brasília e Curitiba, para se verificar a possibilidade de utilização das equações em regiões de climas diferentes daquele a partir do qual as equações foram geradas.

#### **Avaliação de desempenho térmico de sistemas construtivos com a utilização de equações preditivas:**

Para a avaliação do desempenho térmico das habitações, utilizou-se o método somatório dos graus-dia e o critério do IPT. O primeiro método é utilizado para determinar a demanda anual de energia requerida para aquecimento (ou refrigeração) para assegurar níveis aceitáveis de conforto. É um parâmetro climático definido como o somatório da diferença da temperatura interior média para uma temperatura base, que corresponde aos intervalos limite de conforto. A avaliação através do método do IPT foi realizada utilizando-se as equações de temperatura interna máxima e mínima. As classificações em níveis A, B ou C foram feitas para os critérios de inverno e verão das duas cidades. Realizou-se, então, o somatório de dias do ano de cada habitação em cada nível de conforto térmico. Desta forma, foi possível avaliar as três habitações, considerando as de melhor desempenho térmico com uma maior quantidade de dias classificados como nível A, e uma menor quantidade de dias com a classificação C.

## **4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS: O USO DE EQUAÇÕES PREDITIVAS NA AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO TÉRMICO**

### **4.1 Aplicação do Ano Climático às equações**

A obtenção dos resultados da temperatura interna das habitações é possível com o fornecimento da temperatura externa às equações, sendo esta a única variável necessária para se obter os resultados. Assim, para cada dia do ano climático das cidades de Curitiba e Brasília, foi necessário identificar as temperaturas máxima, mínima e média. Depois de identificados esses valores, separou-se os dados pelos grupos de meses do ano. Obteve-se, então, para cada mês, os valores da média das temperaturas máximas, médias e mínimas diárias do período. Esses valores representam  $GT_{max}$ ,  $GT_{avg}$  e  $Gt_{min}$ , que são as médias mensais (máxima, média e mínima, respectivamente), utilizadas para a determinação da temperatura interna.

### **4.2 Correlações entre os resultados das equações preditivas e os das simulações com o ARQUITROP**

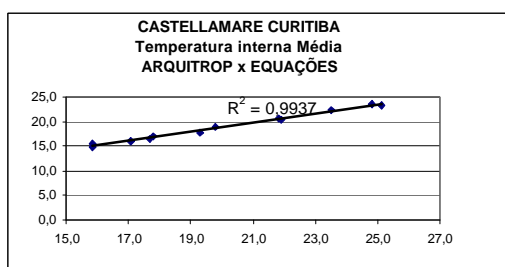
Para verificação da possibilidade de utilizar as equações preditivas em regiões de clima diferente, realizou-se um trabalho de comparação entre os resultados simulados no software ARQUITROP e os resultados obtidos pelas equações preditivas. Para a realização das simulações, inseriu-se no software os dados necessários do ano climático das cidades de Curitiba e Brasília. Extraíu-se, então, as correlações entre esses resultados.

O software ARQUITROP, desenvolvido pela UFSCar, possui em seu banco de dados os climas das principais cidades brasileiras e os materiais e componentes usualmente empregados na construção civil. O software simula o clima exterior, utilizando o método de Deplanches, descrito por Berthier e Anquez, para estimar a variação horária da temperatura externa e da umidade relativa do ar, para estabelecer as condições climáticas típicas de cada mês (RORIZ e BASSO, 1989). Antes de se realizar as simulações, foi necessário fornecer ao software dados quanto ao ano climático das duas cidades em estudo. O programa estima, a partir dos dados de entrada, a temperatura de um dia médio de cada mês. Apesar do ARQUITROP possuir um banco de dados climático próprio, foi necessária a introdução de dados climáticos provenientes do TRY de ambas as cidades, para que se pudesse comparar os resultados de ambos os métodos para os mesmos dados de temperatura externa.

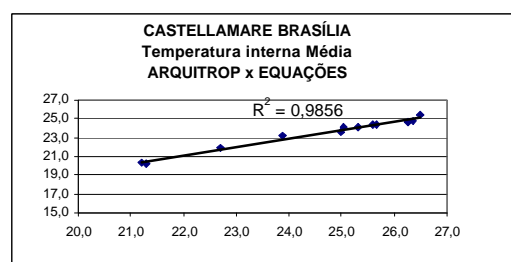
Para realizar as simulações, inseriu-se no software os dados reais dos materiais utilizados para a parede, piso e cobertura de cada sistema construtivo, caracterizados pelas tabelas 2, 3 e 4.

Para cada uma das três habitações, realizou-se a simulação no ARQUITROP para todos os meses do ano. Para cada mês, o software calcula a temperatura interna de um dia médio. Com os resultados obtidos pelo programa, identificou-se as temperaturas máximas, médias e mínimas internas do ambiente para esse dia médio. Comparou-se, então, através de análise de regressão, estes resultados com a média mensal das temperaturas máximas, médias e mínimas obtidas pelas equações preditivas.

Tomando-se como exemplo o sistema construtivo Castellamare, tem-se, para as temperaturas médias mensais, em Curitiba, o gráfico de dispersão da figura 1. Para Brasília, considerando o mesmo caso, a mesma análise resultou os dados apresentados na figura 2.



**Fig. 1:** Gráfico de correlação entre temperaturas médias obtidas pela equação preditiva e pelo ARQUITROP para o sistema construtivo Castellamare na cidade de Curitiba



**Fig. 2:** Gráfico de correlação entre temperaturas médias obtidas pela equação preditiva e pelo ARQUITROP para o sistema construtivo Castellamare na cidade de Brasília

A partir dos resultados obtidos, montou-se a tabela resumo abaixo, contendo todos os valores de  $R^2$  obtidos com as comparações entre as equações preditivas e a simulação no ARQUITROP para as duas cidades em estudo (tabela 5).

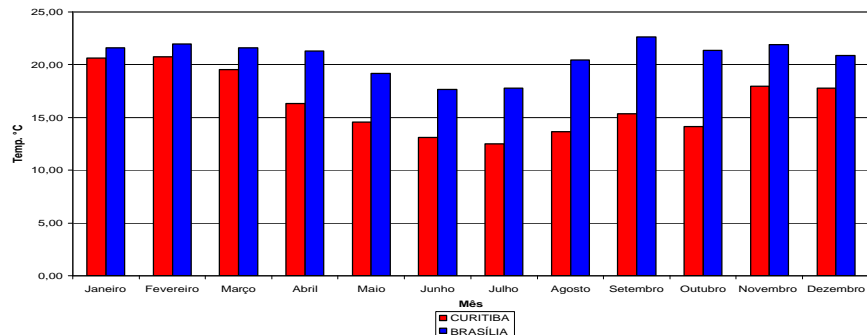
**Tab. 5:** Tabela-resumo das correlações encontradas

Sistema Construtivo	Temperatura	Curitiba	Brasília
Castellamare	Máxima	0,9753	0,8955
	Média	0,9937	0,9856
	Mínima	0,9943	0,9924
Kurten	Máxima	0,9986	0,984
	Média	0,9938	0,9909
	Mínima	0,9966	0,997
Epotec	Máxima	0,9707	0,937
	Média	0,9916	0,9819
	Mínima	0,9955	0,9983

Tendo sido avaliada desta forma a possibilidade de utilizar as equações geradas para o clima de Curitiba considerando o de Brasília, realizou-se uma avaliação de desempenho térmico das habitações em estudo, para ambas as cidades.

## 5. AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO DAS HABITAÇÕES ATRAVÉS DO SOMATÓRIO DOS GRAUS-DIA E PELO MÉTODO DO IPT

As temperaturas médias mensais externas de ambas as cidades analisadas, obtidas a partir dos respectivos anos climáticos, estão representadas na figura 3.



**Fig. 3: Gráfico da temperatura média mensal de Brasília e Curitiba**

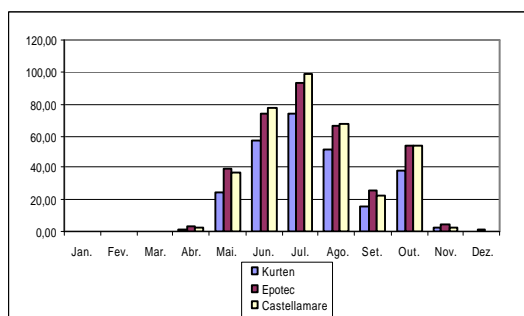
Acima, verifica-se que as mais altas temperaturas médias mensais ocorrem em Brasília, quando comparadas com Curitiba. As mais altas temperaturas médias para Brasília ocorrem no mês de setembro e para Curitiba em janeiro e fevereiro. As mais baixas temperaturas médias ocorrem nos meses de junho e julho para ambas as cidades. Segundo o procedimento abordado na seção anterior, aos dados de temperatura do TRY das duas cidades aplicou-se as equações preditivas das temperaturas médias das habitações.

### 5.1 Avaliação de desempenho segundo o parâmetro somatório dos graus-dia

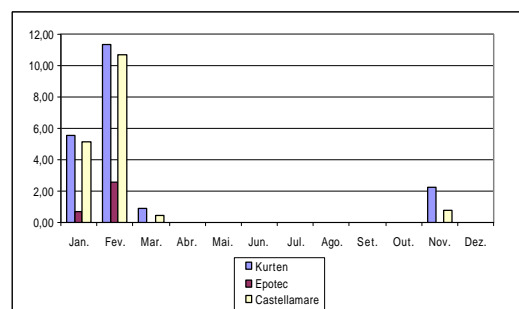
O parâmetro somatório dos graus-dia é utilizado para determinar a demanda de energia requerida para aquecimento ou refrigeração de uma edificação, para assegurar níveis aceitáveis de conforto. É um parâmetro climático definido como o somatório da diferença da temperatura interior média em relação a uma temperatura base. Para realização da análise das habitações, considerou-se a temperatura base ( $T_{base}$ ) igual à temperatura de  $18^{\circ}\text{C}$  para aquecimento e de  $24^{\circ}\text{C}$  para refrigeração.

#### Curitiba

Para cada dia do ano, determinou-se a diferença ( $18^{\circ}\text{C} - T_{média}$ ), realizando-se o somatório para cada mês. A figura 4 apresenta o gráfico com os resultados do somatório dos graus-dia para aquecimento para os três sistemas construtivos. Os resultados do somatório mensal da diferença  $T_{média}-24^{\circ}\text{C}$  (resfriamento) estão representados na figura 5.



**Fig. 4: Gráfico do somatório mensal dos graus-dia de aquecimento para Curitiba**



**Fig. 5: Gráfico do somatório mensal dos graus-dia de resfriamento para Curitiba**

#### Brasília

As habitações, analisadas para a cidade de Brasília, não apresentaram necessidade de aquecimento no ano considerado. Em todo período do ano, as temperaturas médias interiores encontraram-se acima do limite adotado ( $18^{\circ}\text{C}$ ). Somente o sistema construtivo Epotec apresentou um valor fora do limite de conforto no

mês de junho, sendo porém este valor muito pequeno e praticamente igual a zero. Quanto ao critério somatório de graus-dia de resfriamento, os resultados da análise das habitações para a cidade de Brasília estão representados na figura 6.

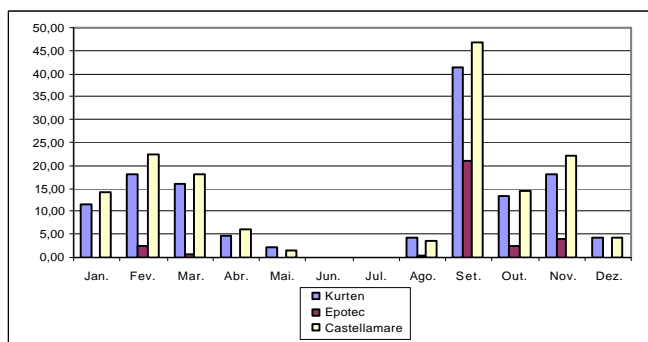


Fig. 6: Gráfico do somatório mensal dos graus-dia de resfriamento para Brasília

## 5.2 Classificação das habitações pelo método do IPT

A partir dos resultados das equações preditivas máximas e mínimas, é possível também avaliar as habitações pelo critério do IPT. Realizou-se, portanto, essa avaliação de desempenho térmico com as equações de temperaturas máximas e mínimas, obtendo-se o somatório dos dias em que a habitação era classificada em cada critério (A, B e C). Os intervalos de temperatura para cada nível, considerando os períodos de inverno e de verão, encontram-se na tabela 6.

Tab.6: Intervalos de temperatura dos níveis de classificação 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:

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

$T_{\text{int}}$  : temperatura interna

### Curitiba

Avaliando-se as habitações pelo critério do IPT na condição de inverno para a cidade de Curitiba, encontrou-se a quantidade de dias do ano em cada classificação para cada habitação. Estes valores encontram-se na figura 7. Realizou-se o mesmo tipo de análise, utilizando-se o critério verão (figura 8).

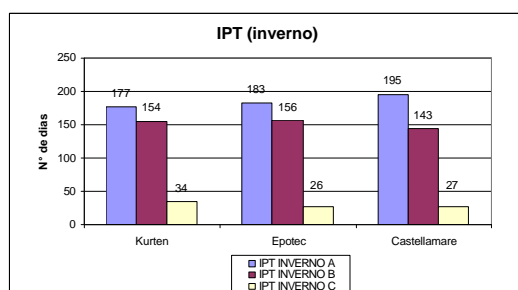


Fig. 7: Gráfico com a quantidade de dias de Curitiba em cada nível do IPT (inverno)

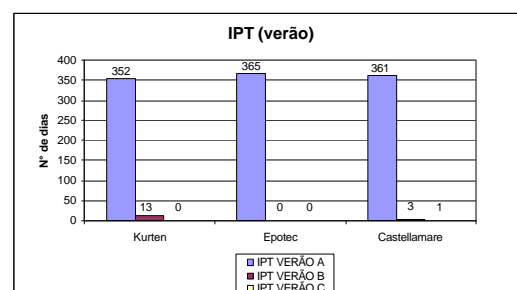


Fig. 8: Gráfico com a quantidade de dias de Curitiba em cada nível do IPT (verão)

## Brasília

A análise das habitações foi realizada para a cidade de Brasília. Pelos critérios de inverno e verão, encontrou-se os valores dispostos na tabela 7.

**Tab. 7: Classificação das habitações em Brasília pelo método do IPT**

Sistema Construtivo	inverno			verão		
	A	B	C	A	B	C
<b>Kurten</b>	294	71	0	294	33	38
<b>Epotec</b>	309	56	0	359	6	0
<b>Castellamare</b>	318	47	0	337	22	6

O método do IPT refere-se ao intervalo de conforto térmico extremo que a temperatura interior de uma habitação deve possuir durante o período de verão e inverno. Já o parâmetro somatório dos graus-dia trata de uma temperatura média diária de conforto no interior da habitação. As abordagens são diferentes, portanto há uma certa diferença ao se comparar os resultados, pois em uma se compara a temperatura média e a outra se refere a valores extremos de temperatura.

## **6. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

As equações preditivas se apresentam como uma forma alternativa de caracterizar uma habitação para a qual foi realizado um monitoramento. Neste trabalho, a partir dos resultados satisfatórios das correlações entre os resultados do ARQUITROP e os das equações preditivas, verificou-se a possibilidade de se avaliar as diferentes habitações em diferentes climas. Utilizando-se o somatório de graus-dia e o método do IPT, é possível comparar o desempenho térmico de habitações, verificando-se a mais apropriada para cada cidade. É um método facilmente utilizável pois considera como variável somente a temperatura externa para a obtenção da temperatura interna, não necessitando de softwares sofisticados para a avaliação de desempenho.

## **7. REFERÊNCIAS**

- GIVONI, B. e VECCHIA, F. Predicting Thermal Performance of Occupied Houses. In: Proceedings, PLEA 2001, Florianópolis, Nov. 2001. pp. 701-706.
- GIVONI, B.; VECCHIA, F., KRÜGER, E.L. Predicting Thermal Performance of Housing Types in Developing Countries with Minimum Climatic Data. In: Proceedings, World Congress of Renewable Energy, 7. Köln, Julho de 2002, (CD-ROM)
- GIVONI, B.- Minimum Climatic Information Needed to Predict Performance of Passive Buildings in Hot Climates. In: Proceedings, PLEA 1999, Brisbane, Austrália, Set. 1999.
- KRÜGER, E.L. e DUMKE, E.M.S. Thermal Performance Evaluation of the Technological Village of Curitiba – Brazil. In: Proceedings, PLEA 2001, Florianópolis, Nov. 2001, pp. 707-711
- 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.d.p.
- RORIZ, M. e BASSO, A. ARQUITROP, versão 3.0. São Carlos, SP, 1989.