



## **DESEMPENHO TÉRMICO DE EDIFICAÇÕES: UM PROGRAMA DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL ATRAVÉS DO MÉTODO DA ADMITÂNCIA**

**Luciana da Rosa Pinto; Lucila Chebel Labaki; Giovana de Godoi**

Dep. de Arquitetura e Construção, Faculdade de Eng. Civil, Arquitetura e Urbanismo,  
UNICAMP, Caixa Postal 6021. CEP 13083-970 Campinas/SP.

Tel: (19) 3788-2384 Fax: (19) 3788-2411

e-mail: [lucianarosa@emdec.com.br](mailto:lucianarosa@emdec.com.br); [lucila@fec.unicamp.br](mailto:lucila@fec.unicamp.br)

### **RESUMO**

Este trabalho descreve as principais etapas para o estudo de cálculos segundo o método da admitância, buscando a análise do desempenho térmico de edificações. Baseada neste método, foi desenvolvida uma ferramenta de simulação computacional que proporcione ao projetista, durante a fase de projeto, utilizar-se de um programa, para simular as várias alternativas de projeto e avaliar o desempenho térmico do projeto em estudo. Dados obtidos experimentalmente em protótipos, para os períodos de verão e inverno em Campinas, SP, são comparados com o resultado da simulação, mostrando uma boa concordância.

### **ABSTRACT**

This paper describes the admittance procedure in order to simulate thermal performance of buildings. A computer tool was developed, which will allow the designer to evaluate different possibilities in the design stage, so that a good thermal performance can be attained. Experimentally collected data in a prototype, for summer and winter periods in Campinas, State of São Paulo, are compared with the results of simulation. A good agreement between them can be observed.

### **1. O MODELO DA ADMITÂNCIA**

De acordo com MILBANK & LYNN, 1974, a transferência de energia através de uma edificação pode ser considerada em dois estágios: primeiramente, as trocas por radiação e convecção nas superfícies de um espaço fechado e após, a transferência de energia, principalmente por condução, através dos elementos limitantes do espaço. O uso de um índice de temperatura, a temperatura ambiental, para tratar os intercâmbios por radiação e convecção, foi proposto por DANTER, 1973 (citado em MILBANK & LYNN, 1974), para o estado estacionário. O mesmo raciocínio pode ser usado para mostrar que é um índice adequado também para regime variável. Nessa mesma proposta, os autores adotam esta aproximação, com a implicação de que há um ponto ambiental pelo qual a energia ingressa no espaço. É apenas necessário, portanto, considerar as transferências de energia no envelope do edifício.

A distribuição unidirecional de temperatura imposta à condução através de um elemento construtivo, normal ao plano do elemento, é definida pela equação de Fourier:

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\partial t}{\partial \theta} \quad [\text{Eq. 1}]$$

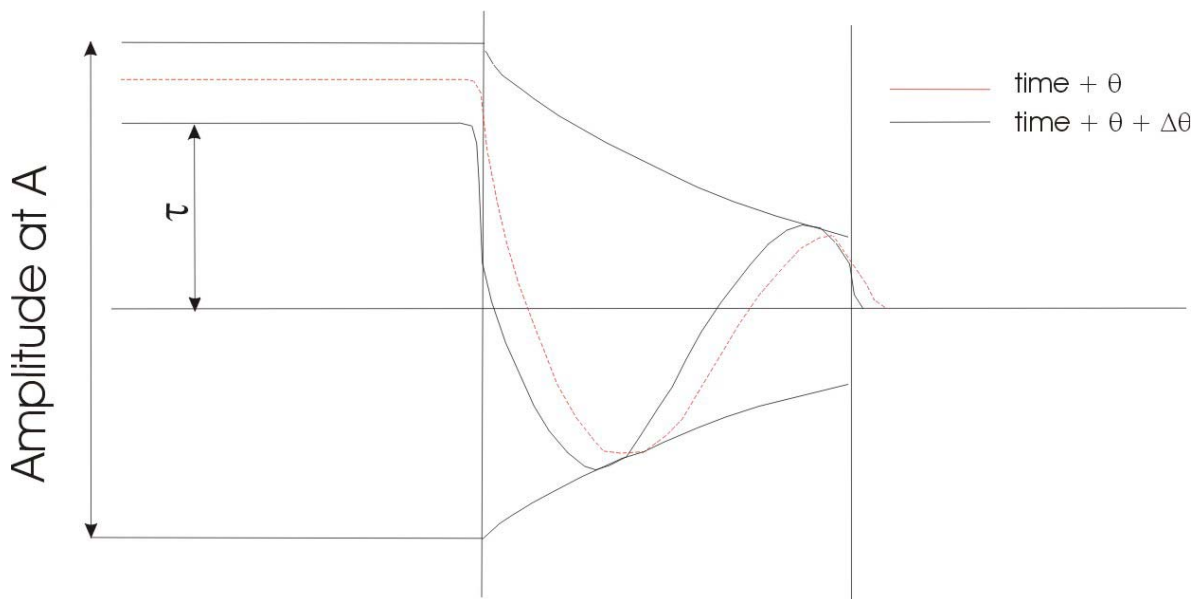
Onde:  $\theta$  é o tempo;  $x$ : a distância,  $t$  a temperatura e  $\alpha$  a difusividade térmica do material

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho c} \quad [\text{Eq. 2}]$$

onde  $\lambda$  é a condutividade térmica do material,  $\rho$  a densidade e  $c$  o calor específico.

Quando se adota a solução cíclica estável para a equação de Fourier é mais fácil considerar variações senoidais simples. Com esta aproximação, o problema pode ser analisado em dois estágios. Primeiramente há a transferência média de calor para o ambiente, como se fosse uma transferência no estado estacionário convencional; em seguida há a troca cíclica em torno da condição média. As trocas cíclicas podem ser mais bem visualizadas considerando a Figura 1, que mostra uma camada homogênea entre dois espaços.

A energia pode ser fornecida pelos pontos de temperatura ambiental A ou B e pelas superfícies exteriores C ou D. A figura 2 ilustra os ciclos de temperatura induzidos por uma variação senoidal de temperatura em A, enquanto se mantém a temperatura em B constante.



**Figura 1: Variação cíclica da temperatura em A induz um ciclo cuja amplitude se reduz com a distância através do material (MILBANK & LYNN, 1974).**

As flutuações em A dão origem a ciclos de temperatura de menor amplitude, os quais decaem exponencialmente através do material. Mudanças de fase ocorrem em cada interface superfície/ar e também entre as superfícies do material. Duas relações entre temperatura e energia são de interesse nesse caso:

- a energia cíclica em A, que causa o ciclo de temperatura de A,
- a transferência cíclica através do material até B, que resulta do balanço de temperatura de A.

Diagramas similares podem ser construídos para ganhos de energia em uma superfície.

Obviamente, no mundo real, haverá usualmente os ganhos de energia nas duas superfícies, tanto quanto nos dois pontos ambientais. Felizmente, o efeito total dessas transferências pode ser obtido somando o efeito separado de cada relação entre temperatura e energia, fazendo-se a consideração usual de que as características térmicas são constantes num intervalo relevante de temperatura.

A solução para estas equações de condução cíclica é dada em livros-texto e será apresentada mais adiante. Três fatores podem ser desenvolvidos, cada um dependendo da espessura e das propriedades térmicas dos materiais, bem como da frequência da excitação senoidal. Os fatores são expressos como números complexos, o que em termos práticos significa que cada valor é associado a uma mudança de fase, que pode ser temporal ou espacial.

### 1.1 Admitância

A admitância,  $Y$ , fator que dá o nome ao procedimento, é definida como a quantidade de energia ( $q_i$ ) que ingressa pela superfície, por balanço unitário de temperatura ( $t_i$ ) no ponto ambiental. A admitância é definida como a recíproca da resistência térmica, ou impedância, de um elemento para o fluxo cíclico de calor no ponto ambiental e tem as mesmas unidades de  $U$  ( $W/m^2\text{ }^\circ\text{C}$ ).

### 1.2 O uso dos fatores para frequência fundamental

A resposta térmica tem sido frequentemente considerada para o caso de ingresso senoidal de energia. Na prática, uma onda senoidal pura para o ciclo de temperatura supõe que os ciclos de energia e de temperatura se repetem dia após dia. O ciclo real pode então ser dividido em uma série de termos senoidais, com acréscimo de frequência e amplitude reduzida, em geral. Estes termos são chamados de fundamentais e harmônicos do ciclo de entrada. Quando cada termo senoidal é combinado com as admitâncias, fatores de superfície e fatores de decremento apropriados para sua frequência, a previsão da temperatura final é obtida somando os resultados de cada harmônico.

Para tornar os cálculos mais fáceis, Danter, 1973 (citado em MILBANK & LYNN, 1974) propôs que os fatores para frequência fundamental de 24 horas sejam aplicados para o ciclo real de energia. Esta idéia é a base para o método da admitância. Trata-se de uma aproximação, pois os fatores dependem da frequência de excitação. De qualquer maneira, para muitos problemas, particularmente aqueles relacionados a ganhos solares, ventilação e transferências por condução, a aproximação é aceitável.

### 1.3 Variações na temperatura interna do ambiente

O valor principal da variação de temperatura ambiental interna é calculado pela equação a seguir:

$$t_{ei} = \frac{Q_x}{\sum AY + C_v} \quad [\text{Eq. 3}]$$

onde  $t_{ei}$  é a diferença de temperatura entre ambientes interno e externo;  $\sum AY$  a somatória do produto das áreas ( $A$ ) pelas admitâncias  $Y$ , de cada componente empregado no estudo;  $Q_x$  o ganho de calor cíclico no ponto ambiental, em  $W$ ;  $C_v$  o termo de condutância por ventilação, em  $W/^\circ\text{C}$ , obtido pela equação a seguir.

$$\frac{1}{C_v} = \frac{3}{NV} + \frac{1}{4,8 \sum A} \quad [\text{Eq. 4}]$$

Onde  $N$  é o número de renovações de ar por hora no ambiente;  $V$  o volume do ambiente, em  $m^3$ ; e  $\sum A$  a somatória das áreas de aberturas existentes.

#### 1.4 Ganhos cíclicos no ponto ambiental

Através de superfícies externas opacas

O ganho cíclico  $Q_f$  através da estrutura opaca é dado por:

$$\begin{aligned} Q_f &= \sum_{i=1}^a (f_i A_i U_i) t_{eo} \\ &= \sum_{i=1}^a (f_i A_i U_i) t_{ao} + \sum_{i=1}^a (f_i A_i U_i) (R_s \alpha I_\tau) \end{aligned} \quad [\text{Eq. 5}]$$

Onde  $f$  é o fator decremento;  $A$  a área da superfície considerada;  $U$  a transmitância térmica para a superfície considerada, em  $\text{W/m}^2\text{C}$ ;  $\alpha I_\tau$  a radiação solar cíclica total absorvida pela superfície, em  $\text{W/m}^2$ ;  $R_s$ : resistência superficial externa em  $\text{m}^2\text{C/W}$ ;  $t_{eo}$  = temperatura sol-ar em  $^\circ\text{C}$ ;  $t_{ao}$ : temperatura cíclica externa em  $^\circ\text{C}$ .

A temperatura cíclica externa pode ser calculada conforme o método Deplanches (citado em RORIZ, 1991), quando não se dispõe de dados horários de temperaturas, mas apenas as temperaturas máxima e mínima.

Os valores de  $t_{eo}$ ,  $t_{ao}$  e  $\alpha I_\tau$  são cíclicos, com período de 24 horas; por isso são apresentados com variação horária.

#### Condução cíclica através do vidro

As trocas cíclicas  $Q_v$  através do vidro, sem considerar a radiação solar, são dadas por:

$$Q_v = AUt_{ao} \quad [\text{Eq. 6}]$$

onde  $Q_v$  é o ganho de calor solar através do vidro, em  $\text{W}$ ;  $A$  a área envidraçada, em  $\text{m}^2$ ;  $t_{ao}$ : temperatura externa do ar obtida no item anterior, em  $^\circ\text{C}$ .

Considera-se o fator decremento como unitário, devido à pequena inércia térmica. O efeito da radiação solar no vidro é tratado separadamente.

#### Ganhos solares através do vidro

O fator de ganho solar  $S$  é usado para calcular o ganho principal de energia através da janela e veneziana combinada. Ele não é afetado pelo tipo de construção da parede. Segundo LOUDON, 1970, o ganho de calor pelos vidros, devido à radiação solar, é dado por:

$$Q_{vR} = S \cdot I_T \quad [\text{Eq. 7}]$$

Onde:  $Q_{vR}$  é o ganho de calor devido à radiação solar no vidro, em  $\text{W}$ ;  $I_T$  a radiação total incidente na superfície vertical, em  $\text{W/m}^2$ ;  $S$ : fator solar para o vidro, definido, segundo CROISSET, 1968, como:

$$S = \frac{\alpha U}{h_e} + \tau \quad [\text{Eq. 8}]$$

Sendo  $\tau$  a transmitância total do vidro devido à radiação solar,  $\alpha$  a absortância,  $U$  a transmitância térmica total e  $h_e$  a condutância superficial externa.

## **Ganhos casuais**

O tratamento de ganhos casuais gerados internamente, isto é, ocupação, luzes, etc, supõe que estes ganhos são imediatamente realizados como carga do ambiente. São considerados os ganhos devido à presença humana, quantificados de acordo com a atividade exercida pelo organismo humano no ambiente; ganhos de calor devidos ao sistema de iluminação artificial e ganhos de calor devidos a motores e equipamentos:

### **1.5 Vantagens do método**

A principal vantagem do método da admitância é que a determinação de temperatura e energia aceitáveis é dada por um procedimento simples de resolver. Além disso, os três parâmetros, admitância, fator decremento e fator de superfície dão aos projetistas uma indicação qualitativa do provável comportamento das construções. De qualquer maneira, todas as técnicas de cálculo partem de suposições incertas, com aproximações e restrições, e o método da admitância deve ser visto como uma técnica de cálculo que fornece respostas realistas para o problema de temperaturas cíclicas aceitáveis em construções.

## **2. METODOLOGIA**

Foi desenvolvido um software, denominado UNICLIM, aplicando o método da admitância, adaptado (PINTO, 2002). Os dados climáticos utilizados são médias mensais de séries de dez anos. Para a radiação solar, é utilizada a informação sobre o número médio de horas de insolação, de acordo com a equação de Angstrom (LABAKI, 1995). Os valores das admitâncias foram calculados como produtos de matrizes complexas, de acordo com Milbank e Harrington=Lynn.

Para testar o programa, foi realizada uma comparação com dados de temperaturas internas obtidas em um protótipo construído no Campus da UNICAMP, em Campinas, SP. Foram comparados os dados obtidos para a temperatura interna e a temperatura externa

### **2.1 Descrição do protótipo**

O protótipo experimental foi construído sobre uma base de radier de concreto desempenado (3,20 x 3,70m), com piso interno em concreto com revestimento em argamassa de cimento desempenada. Possui paredes de tijolos de barro maciço sem revestimento ( $\frac{1}{2}$  tijolo / 10,0 cm espessura), assentados com argamassa comum de cimento e pintados na cor branca (interna e externamente). Dimensões externas de 2,20 x 2,70 m e internas de 2,00 x 2,50 m, com uma área útil de 5,00 m<sup>2</sup>, pé direito de 2,40m, e volume interno de 12,00 m<sup>3</sup>.

Na face superior, uma laje pré-moldada (cerâmica e concreto) também pintada de branco, com ático ventilado por aberturas em trama de tijolos de barro nos oitões das faces leste/oeste. A cobertura é de telha fibrovegetal, pintada externamente de branco, e junto ao caibramento de sustentação um filme de alumínio polido (isolante térmico tipo “foil”), reduzindo a influência da superfície mais exposta à radiação solar nos resultados das medições. As portas e janelas são de madeira (cedro), e para a superfície transparente foi adotado como referência o vidro incolor de 4mm.

Há duas aberturas para análise, voltadas para as faces norte e oeste (orientações mais problemáticas), com dimensões de 1,20 x 1,00m, e peitoril de 1,10m. A fachada maior está orientada a Norte/Sul (2,70m) e a menor a Leste/Oeste (2,20 m).

Quando uma das fachadas está sendo avaliada a outra tem sua abertura vedada por um painel com resistência térmica equivalente à parede de tijolos, estando ambas totalmente seladas para evitar a interferência da ventilação. Para facilitar o manuseio e troca de vidros e painéis equivalentes, optou-se por colocar o vidro numa moldura de madeira sobre batente, com alças e fechos de travamento, ficando a área envidraçada efetiva com as dimensões de 0,86 x 1,06 m, e área de 0,91 m<sup>2</sup>.

As superfícies envidraçadas não possuem aberturas para ventilação, sendo o interior dos protótipos um ambiente fechado. A intenção era de restringir as variáveis da equação, pois a ventilação poderia interferir na temperatura interna, trazendo o calor dissipado pelos dispositivos.

## 2.2 Medições

No terreno onde estão localizados os protótipos, em Campinas, há uma estação meteorológica para coleta de dados. Esta estação é da marca Campbell Scientific, e é composta por um DataLogger CR 10X e sensores de temperatura, umidade relativa do ar, radiação solar, velocidade e direção dos ventos, pluviosidade. Neste trabalho foram utilizados apenas os dados de temperatura.

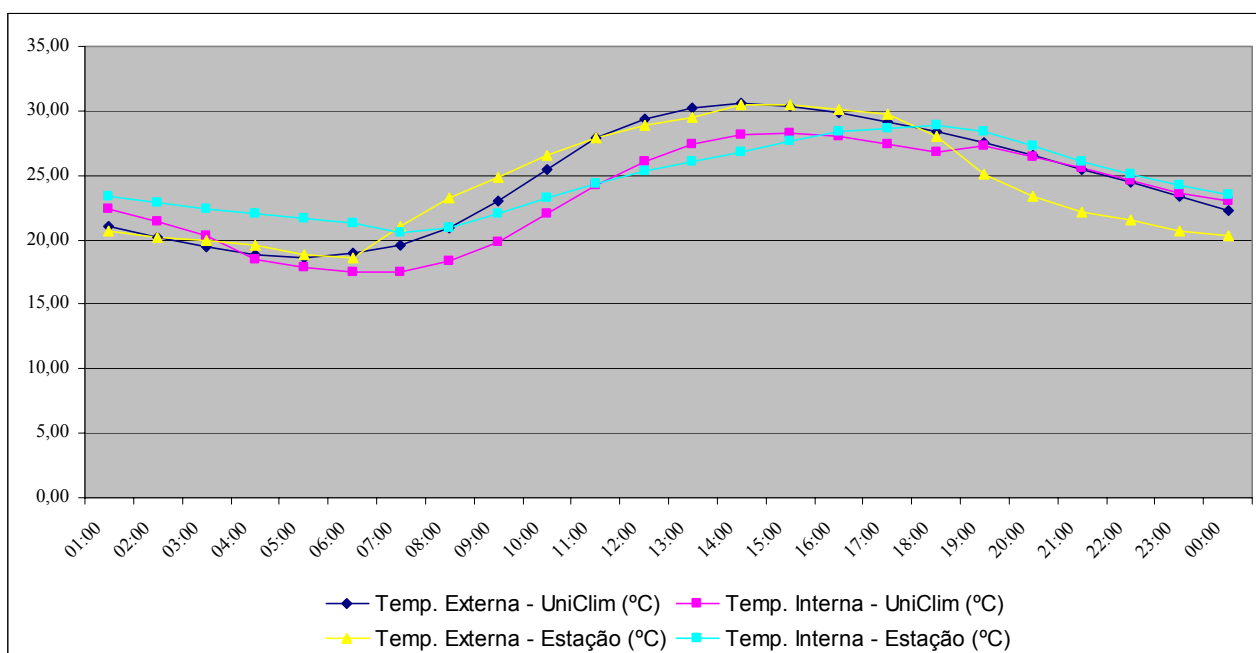
O sistema de aquisição de dados referentes ao desempenho térmico dos protótipos é composto de duas unidades básicas: um datalogger CR10x e um multiplexador AM416, com 32 canais de aquisição de dados, que fazem a coleta automática e o armazenamento dos dados registrados pelo sistema de aquisição, que coleta os dados de temperaturas no interior dos protótipos. A medição de temperaturas internas foi feita com termopares do tipo T (cobre constantan), 24 awg, ANSI (padrão americano), conectados ao multiplexador AM416. Os registros foram realizados pela estação a cada 30 segundos com totalizações a cada 10 minutos. Foi analisado o resultado para medição com a fachada envidraçada voltada para o Norte. São apresentados os resultados para um dia de verão - 19/01/2004, e um de inverno - 08/07/2004.

A situação simulada foi a mesma do processo de medições - sem ocupação, sem equipamentos ligados, pouca ventilação - a janela e a porta fechadas praticamente todo o tempo. Considerou-se duas horas de ventilação para a simulação.

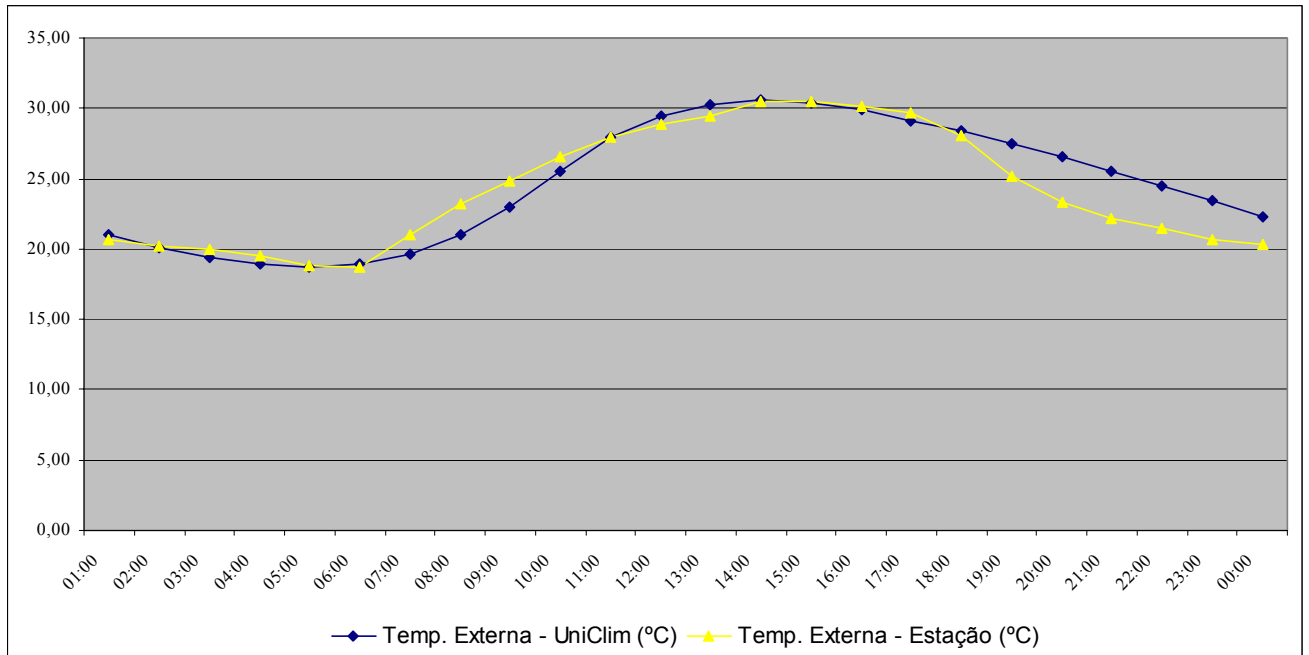
## 3 RESULTADOS

### 3.1 Resultados para o dia de verão

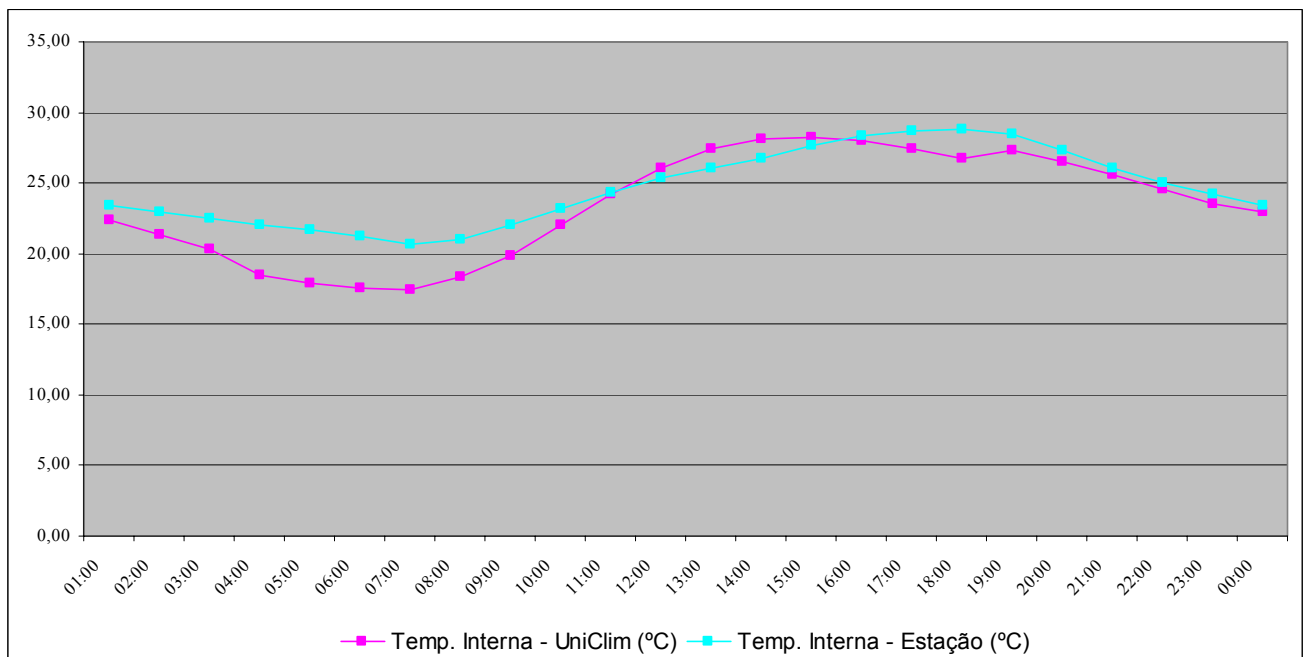
A figura 2 mostra os gráficos para as temperaturas externas e internas, obtidas experimentalmente e pela simulação com o UNICLIM. As figuras 3 e 4 mostram, respectivamente, as temperaturas externas e as temperaturas internas



**Figura 2: Temperaturas externas e internas, obtidas experimentalmente e através da simulação, para o dia de verão**



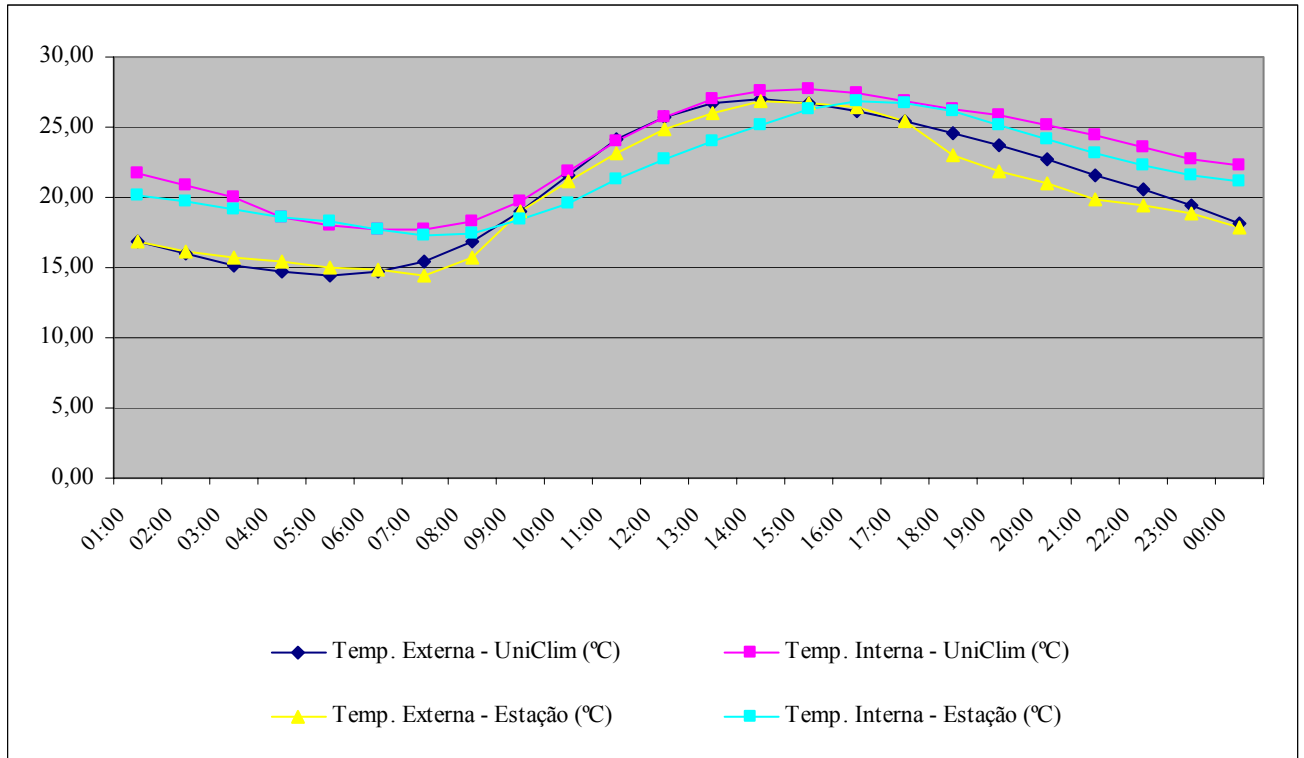
**Figura 3: Temperaturas externas, obtidas experimentalmente e através da simulação, para o dia de verão**



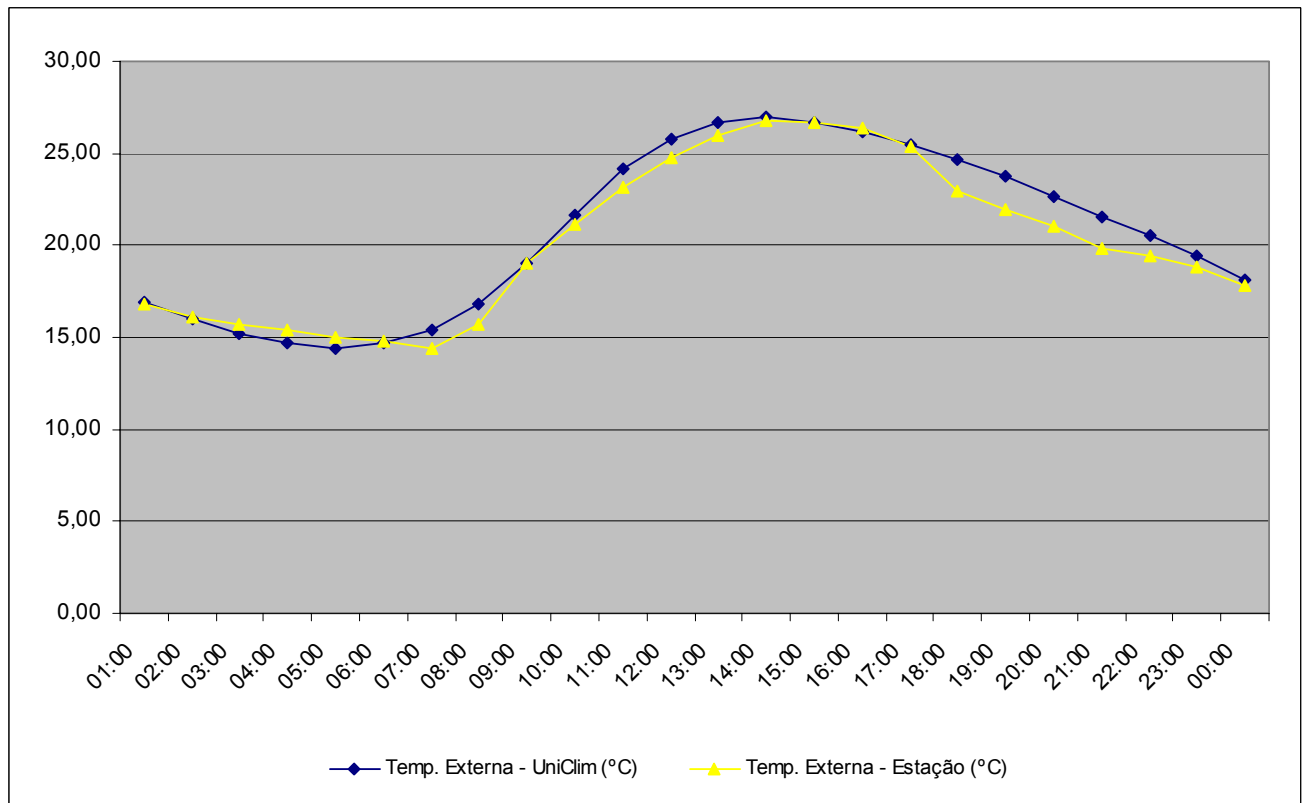
**Figura 4: Temperaturas internas, obtidas experimentalmente e através da simulação, para o dia de verão**

### 3.2 Resultados para o dia de inverno

A figura 5 mostra os gráficos para as temperaturas externas e internas, obtidas experimentalmente e pela simulação com o UNICLIM. As figuras 6 e 7 mostram, respectivamente, as temperaturas externas e as temperaturas internas

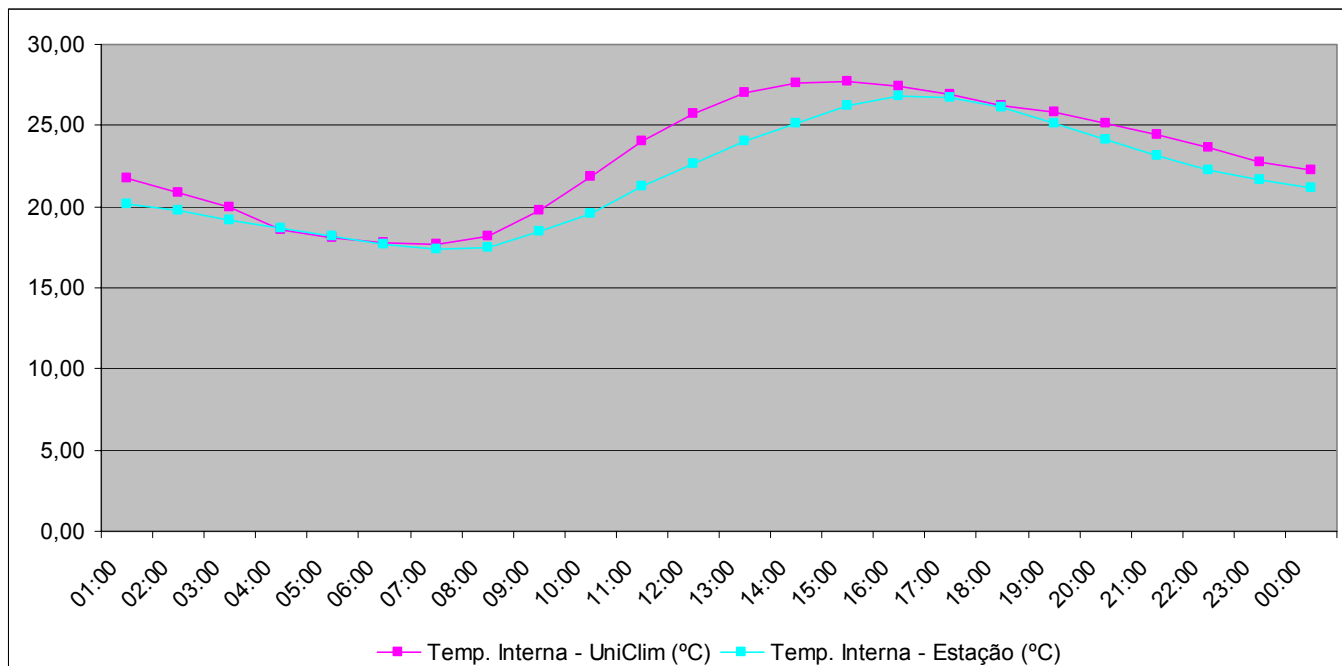


**Figura 5: Temperaturas externas e internas, obtidas experimentalmente e através da simulação, para o dia de inverno**



**Figura 6: Temperaturas externas, obtidas experimentalmente e através da simulação, para o dia de inverno**





**Figura 7: Temperaturas internas, obtidas experimentalmente e através da simulação, para o dia de inverno**

#### 4. DISCUSSÃO

Os resultados mostraram uma boa concordância entre os valores obtidos pelos dois métodos. Apesar de se tratar de um protótipo simples, todas as suas paredes são fachadas, recebendo radiação solar intensa. As condições de ventilação foram simples para se trabalhar. Trata-se de um software simples de ser usado, que pode ser de grande auxílio ao projetista, na fase de concepção, pois poderão ser testadas situações diferentes com materiais, cores, orientações, protetores solares e outros.

#### 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CROISSET, M., *L'Hygrothermique dans le bâtiment*, Ed. Eyrolles, Paris, 1968.

LABAKI, L. C. *Tratamento de Dados Climáticos de Campinas, SP, para Análise de Desempenho Térmico de Edificações*. In: Encontro Nacional de Modelos de Simulação de Ambientes, 1995, Núcleo de Pesquisa em Tecnologia da Arquitetura e Urbanismo, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, USP, São Paulo. p. 123-136.

LOUDON, A. G. *Summertime Temperatures in Buildings without Air-Conditioning*. CROISSET, M., *L'Hygrothermique dans le bâtiment*, Ed. Eyrolles, Paris, 1968. In: The Journal of the Institution of Heating and ventilating engineers (ihve), environmental temperature symposium: fourth paper. The Building Services Engineer, março de 1970. p. 280-291.

MILBANK, N. O., LYNN, J. H. *Thermal response and the admittance procedure*. In: The Building Services Engineer. The Journal of the Institution of Heating and Ventilating Engineers, Volume 42, Maio de 1974, p 38-54.

PINTO, L. R., *Desempenho térmico de edificações: um programa de simulação computacional através do método da admitância*. 2002. Dissertação– Faculdade de Engenharia Civil, UNICAMP, Campinas

RORIZ, M. *Conforto Térmico e Economia de Energia em Edificações: um Modelo Simplificado de Avaliação*. Novembro de 1991.