

# COMPARAÇÃO ENTRE RESULTADOS COMPUTACIONAIS E EXPERIMENTAIS DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DE UM AMBIENTE

Edi Terezinha de Oliveira Grings  
e-mail: [editog@terra.com.br](mailto:editog@terra.com.br)

Artigo elaborado a partir da dissertação de mestrado apresentada para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, em 18/02/2003.

**Orientador: Paulo Otto Beyer**  
e-mail: [pob@mecanica.ufrgs.br](mailto:pob@mecanica.ufrgs.br)

## ABSTRACT

This work presents a comparison between computational and experimental results of the thermal behavior of an air-conditioned and non-air-conditioned environment. In order to do that, climatic data on radiation, wind speed and temperature were monitored in the period between the 11<sup>th</sup> and 20<sup>th</sup> of January 2002 and a climatic file was created. Simultaneously, the temperatures of a test-room, situated on the 3<sup>rd</sup> floor of a building in the town of Porto Alegre, were collected as well as the temperatures of the adjoining rooms.

The results of the thermal load and the environmental temperature obtained in the simulations were compared with the experimental data. There was a good agreement between the computational and experimental results.

**Key words:** Thermal behaviour of a construction, Simulation thermal of and environment.

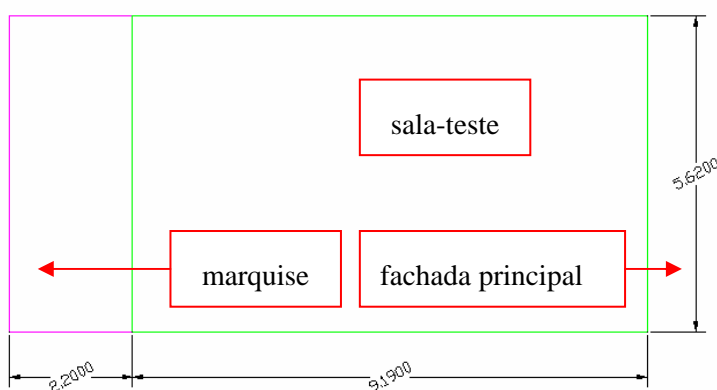
## 1. INTRODUÇÃO

A necessidade de manter o homem em condições de conforto térmico que lhe proporcione saúde e eficiência no trabalho faz com que o comportamento de ambientes climatizados artificialmente ou não seja avaliado. A insuficiência de energia elétrica disponível exige o controle do consumo e conseqüentemente sua análise. Estes fatores aliados à dificuldade de se determinar a carga térmica de um prédio, em função das variáveis envolvidas, têm feito com que cada vez mais sejam utilizados programas computacionais em simulações térmicas e energéticas de edificações.

Vittorino, 1994, realiza um estudo teórico-experimental de método de cálculo para a determinação de carga térmica, temperatura e umidade do ar de ambientes condicionados. Pedrini, 1997, desenvolve uma metodologia para calibrar modelos para simulações térmicas e energéticas de edificações. Os trabalhos mostram divergências entre resultados de simulação e resultados de medição. Rauber et al., 1993, realizam simulações com diversos programas computacionais e as diferenças entre eles são discrepantes. Hernandez et al., 2001, comparam resultados simulados por vários "softwares" com dados medidos e pontuam que se poderia chegar a diferentes conclusões a respeito de conforto térmico, em função dos diferentes resultados dos "softwares" utilizados.

Diante das discrepâncias encontradas entre os resultados de simulações realizadas por diferentes ferramentas computacionais, e as diferenças entre resultados computacionais e experimentais, este trabalho se propõe a avaliar a carga térmica em ambiente climatizado e a temperatura ambiente em evolução livre, encontradas através de simulação e comparar com resultados medidos.

A sala-teste está localizada no prédio Instituto Parobé no centro de Porto Alegre. A fachada principal do prédio forma 29° com o norte verdadeiro. A sala fica no terceiro pavimento de um prédio que possui quatro andares. As paredes da frente e dos fundos estão expostas ao ambiente externo, a da direita, a da esquerda, o forro e o piso se comunicam com outros ambientes internos, sendo que as salas abaixo e acima estão geralmente climatizadas nos dias de semana. As paredes da frente e dos fundos têm espessura de 50 cm e as laterais de 18 cm. O EnergyPlus gera arquivos do tipo .dxf que podem ser abertos no AUTOCAD. A figura 1 é um croqui da sala plotado a partir do arquivo .dxf. As dimensões são dadas em metro.



**Figura 1 - Croqui da sala-teste gerado através do arquivo .dxf.**

O período definido para a realização dos ensaios foi de 11 a 20 de janeiro de 2002, visto que se pretendia determinar a potência sensível de refrigeração, por isso foi necessário que as medições ocorressem em período de temperatura alta.

## **2. OBJETIVO DO TRABALHO**

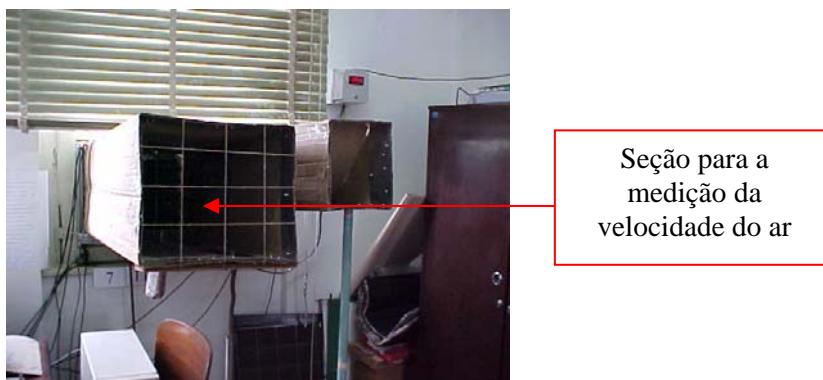
Apesar das vantagens de tempo e custo, muitas vezes há divergências significativas entre os resultados reais e computacionais, por isso pretende-se comparar os resultados da simulação da carga térmica e da temperatura de uma sala, realizada com o programa EnergyPlus, versão 1.0.2, com os resultados medidos.

## **3. MEDIDAS**

Para a determinação da potência sensível de refrigeração e a implementação das simulações foi necessário realizar as medidas das temperaturas de bulbo seco e úmido da sala-teste, da entrada e da saída do evaporador dos condicionadores de ar; temperaturas de bulbo seco e úmido externa; das temperaturas de bulbo seco das salas adjacentes; da radiação solar global e difusa; da velocidade e direção do vento; da corrente elétrica e tensão dos condicionadores de ar, refrigerador experimental, computadores e lâmpadas; das dimensões da sala, aberturas e espessuras das paredes e vidro e da velocidade do ar na entrada do evaporador. A aquisição das temperaturas, radiação e velocidade do vento foram feitas simultaneamente em intervalos de 5 min, por um aparelho HP-Data Acquisition.

#### 4. MEDIDA DA POTÊNCIA SENSÍVEL DE REFRIGERAÇÃO

Para a determinação da potência sensível de refrigeração foram utilizados dois condicionadores de ar instalados na sala. Na entrada e na saída do evaporador dos condicionadores de ar foram conectados dutos para impedir que houvesse a mistura entre o ar de retorno e o ar de insuflamento. As áreas dos dutos foram divididas em seções. No centro de cada seção foram medidas as velocidades do ar. Para a realização das medidas de velocidade do ar, foi utilizado um anemômetro de hélice. As velocidades do ar em cada condicionador foram determinadas através de uma média aritmética das velocidades das seções. As incertezas das medidas foram calculadas a partir da especificação do instrumento de medição, encontrando-se 0,12 m/s e 0,13 m/s.



**Figura 2 - Duto com divisões na entrada do evaporador.**

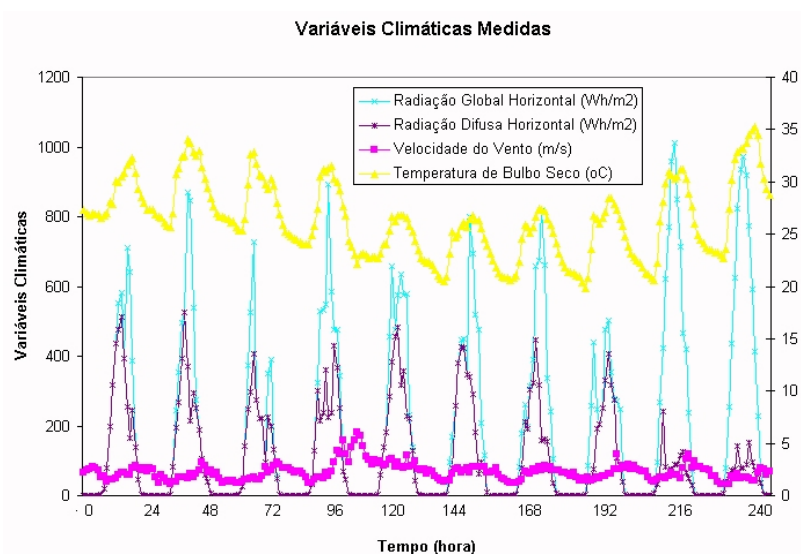
Para o cálculo da potência sensível de refrigeração foram utilizadas as vazões e temperaturas medidas. Neste cálculo a potência sensível média horária é obtido através da integração da potência no tempo dividida pelo intervalo de medição. As potências sensíveis foram medidas das 9 às 19 horas do dia 17 de janeiro e das 10 às 19 horas do dia 18 de janeiro de 2002. O resultado da potência sensível de refrigeração foi calculado a partir da medição individual das variáveis medidas, cada uma delas com uma incerteza associada. Para se fazer a análise da propagação das incertezas assume-se ter uma distribuição Gaussiana e utiliza-se o método de Kline e McClintock (Holman, 1971). Os resultados das médias horárias das potências sensíveis de refrigeração e das respectivas incertezas são apresentados na tabela 1, para os dias 17 e 18/01/2002.

**Tabela 1 - Potência Sensível de Refrigeração e Incerteza Associada.**

Hora	Potência (W)	Incerteza(W)	Potência(W)	Incerteza(W)
	17/01/2002	17/01/2002	18/01/2002	18/01/2002
9	1.458,2	±1,98E+02 W		
10	2.514,8	±2,90E+02 W	2.617,3	±3,03E+02 W
11	2.458,9	±2,83E+02 W	2.355,0	±2,72E+02 W
12	2.399,9	±2,79E+02 W	2.488,4	±2,85E+02 W
13	2.311,9	±2,68E+02 W	2.215,8	±2,59E+02 W
14	2.325,1	±2,69E+02 W	2.307,6	±2,67E+02 W
15	2.463,1	±2,85E+02 W	2.303,7	±2,67E+02 W
16	2.372,8	±2,73E+02 W	2.325,4	±2,70E+02 W
17	2.202,9	±2,59E+02 W	1.977,6	±2,45E+02 W
18	2.313,5	±2,69E+02 W	2.599,2	±3,02E+02 W
19	1.721,4	±2,21E+02 W	1.156,6	±1,81E+02 W

## 6. ARQUIVO CLIMÁTICO

Foi organizado um arquivo climático específico para o período em que foi feita a análise do desempenho térmico da sala-teste, com o objetivo de informar ao EnergyPlus as condições climáticas reais dos dias em que as potências de refrigeração foram medidas. Os dados coletados foram organizados num arquivo com dados horários, obtidos através da média aritmética das medidas. Os valores médios horários da radiação solar global horizontal e difusa horizontal, temperatura de bulbo seco e velocidade do vento são mostrados na figura 3.



**Figura 3 - Variáveis climáticas medidas.**

A temperatura de orvalho, a umidade relativa, a radiação infravermelha e a radiação direta normal foram calculadas a partir dos dados experimentais disponíveis e também inseridas no arquivo climático. A direção do vento foi estimada em  $240^{\circ}$ , valor apresentado pela biblioteca do programa EnergyPlus, para Porto Alegre.

## 7. SIMULAÇÃO

### 7.1 Período de Simulação e Localização.

O período simulado foi de 11 a 20 de janeiro, nos dias 12, 13, 19 e 20 em evolução livre e no restante do período com climatização durante o dia, em Porto Alegre.

### 7.2 Elementos da Construção

As camadas de materiais são declaradas na ordem em que são utilizadas na construção, no sentido de fora para dentro, sendo assim constituídas: paredes externas: 1 cm de argamassa + 48 cm de tijolos + 1 cm de argamassa; paredes internas: 1 cm de argamassa + 16 cm de tijolos + 1 cm de argamassa; piso: 1 cm de argamassa + 30 cm de concreto + 1 cm de argamassa + 1 cm de lajota; forro: 3,5 cm de madeira + 1 cm de argamassa + 30 cm de concreto + 1 cm de argamassa; porta externa: 3,5 cm de espessura de madeira e porta interna: 1 cm de espessura de madeira. As características termofísicas dos materiais foram definidas, como mostra a tabela 2.

**Tabela 2 - Características termofísicas dos materiais de construção.**

Nome	Tijolo	Argamassa	Lajota	Concreto	Madeira
Tipo	Rugoso	Médio	Médio	Médio	Médio
Espessura [m]	0,16-0,48	0,01	0,3	0,035-0,010	0,035
Condut. [W/mK]	1,05	1,15	1,05	1,75	0,23
Densidade [kg/m <sup>3</sup> ]	2000	2100	2000	2400	750
Calor espec. [J/kgK]	920	1000	920	1000	1340
Absortância térmica	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
Absot. Solar e visível		0,2-0,4	0,74		0,3

As vidraças são compostas por uma única placa de vidro simples de 3 mm de espessura, com transmitância solar normal de 0,837, refletância solar normal de 0,075, transmitância visível normal de 0,898, refletância visível normal de 0,081, transmitância normal de onda longa de 0, emissividade hemisférica de 0,84 e condutividade de 0,9 W/mK.

### 7.3 Descrição da Geometria

Modelam-se o espaço (teto, paredes e piso) e as aberturas através de coordenadas cartesianas em relação ao norte do prédio que está a 29° do norte verdadeiro. É necessário definir, também, a posição do primeiro ponto a ser informado (por exemplo, ponto superior esquerdo), e o sentido (horário ou anti-horário) em que estas coordenadas serão informadas. Como já foi colocado, a sala possui 9,19 m de comprimento, 5,62 m de largura e 4,49 m de altura. As janelas da frente (leste) têm em conjunto a parte superior circular. Como o programa limita-se a entradas de superfícies com três ou quatro lados, declarou-se retângulos com área aproximada à área real (2,17 m x 1,03 m, 1,85 m x 0,75 m e 1,46 m x 0,75 m). As janelas dos fundos (oeste) possuem 2,25 m x 0,60 m, 1,18 m x 0,60 m, 0,42 m x 0,60 m, 0,79 m x 0,96 m e a porta externa 2,53 m x 1,28 m. A porta lateral interna mede 2,10 m x 1,02 m.

O programa permite a entrada de dois tipos de sombreamentos: conectados ao prédio como marquises, ou não conectados como árvores e prédios próximos. A modelagem é feita da mesma forma que as superfícies, consiste no detalhamento das sombras através de coordenadas cartesianas. Para este caso, considerou-se o teto do corredor como sombra anexa ao prédio e os pilares como sombra isolada.

Ainda pode-se caracterizar as armações e divisões das esquadrias, que serão utilizadas pelo programa, no cálculo do balanço de energia das janelas. Consideram-se as bordas das aberturas com largura 0,150 m, projeção externa de 0,010 m, projeção interna de 0,026 m, condutância de 5 W/m<sup>2</sup>K, absortância solar 0,3 e emissividade térmica hemisférica 0,9.

### 7.4 Carga Térmica Resultante da Geração Interna de Calor

As correntes e as tensões das lâmpadas e dos equipamentos foram medidas, tabela 3, bem como o tempo em que estiveram ligados. O percentual de utilização da carga térmica em cada hora foi informado através de tabelas, denominadas “schedules” ou cotidianos. Informaram-se, também, através de “schedules” a infiltração e as temperaturas medidas durante o período em que o ambiente estava climatizado, bem como as temperaturas das salas adjacentes.

**Tabela 3 - Carga térmica gerada na sala.**

Fonte	Tensão (V)	Corrente (A)	Calor gerado
Pessoas	-	-	99 W/pessoa
Lâmpadas	116	1,15	798 W
Computadores e monitores	116	1,22	425 W
Motor-ventiladores	220	0,49 - 0,58	78 W
HP-Data Acquisition	116	0,08	9 W
Refrigerador experimental	116	2,00	12 W

### 7.5 Infiltração

Para estimar-se a vazão de ventilação obtida por infiltração, utiliza-se o método da área de frestas. Este método utiliza um coeficiente de chaminé  $C_s$ , que depende da altura da peça, e um coeficiente de vento  $C_w$ , que depende do andar e do grau de proteção do entorno [ASHRAE, 2001].

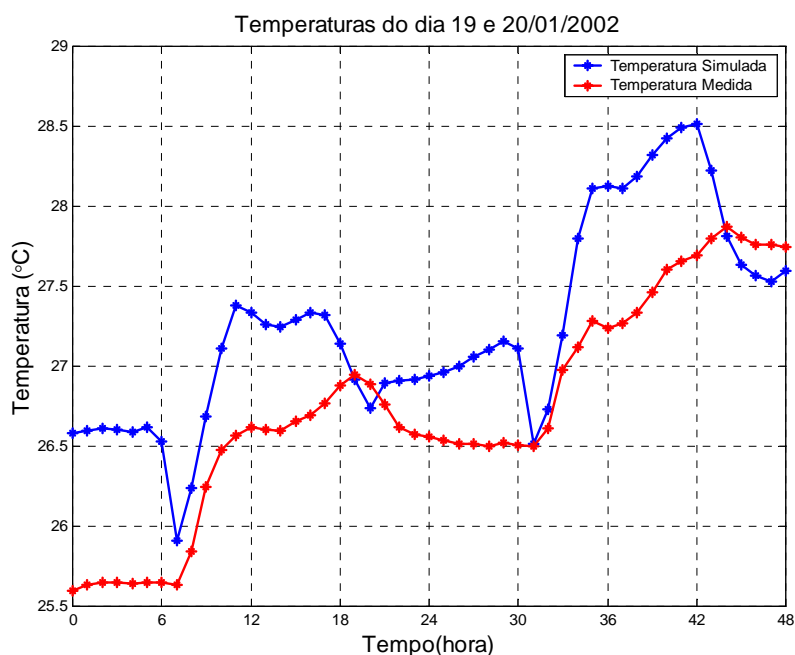
### 7.6 Sistema de Condicionamento de Ar

Utilizou-se a modalidade do ENERGYPLUS denominada “purchased air” onde informa-se a temperatura e o conteúdo de umidade do ar de insuflamento. A caracterização da temperatura e umidade interna é feita através do ajuste do termostato e controle de umidade (set-point), que estão conectados a "schedules". A partir da caracterização do prédio e do sistema, processa-se a simulação, e seus resultados permitem avaliar o desempenho térmico da zona, por meio da disponibilização da carga térmica, da temperatura ambiente, da umidade, das temperaturas das superfícies e outras em cada hora.

## 8. RESULTADOS

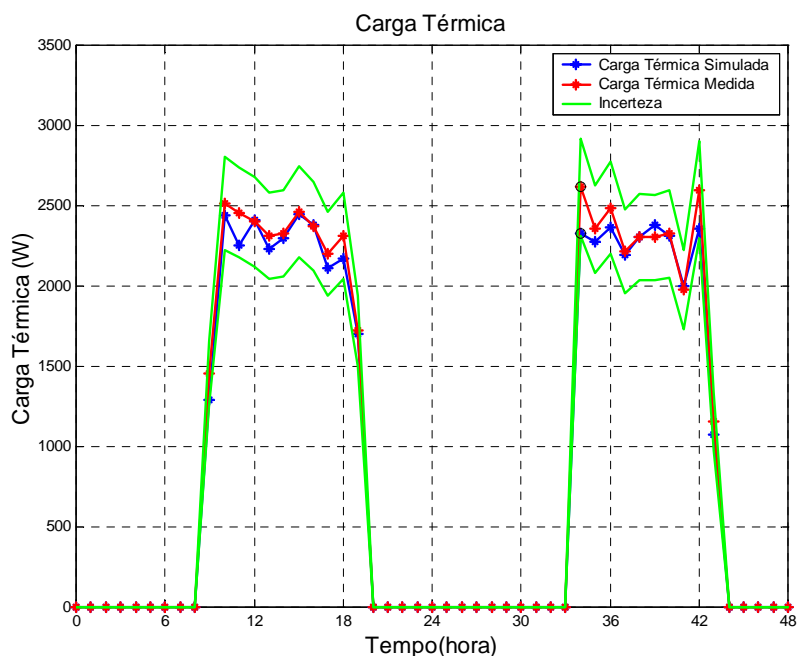
A figura 4 mostra o gráfico das temperaturas internas da sala-teste medidas e simuladas nos dias 19 e 20 de janeiro e 2002. A sala-teste não estava condicionada. A diferença máxima entre as temperaturas medidas e simuladas, nestes dois dias, foi de 1,0 °C e a diferença média foi de 0,5 °C. Este trabalho apresenta resultados semelhantes aos encontrados pelo trabalho de Hernandez et al, 2001, que, em um dia, encontraram diferença máxima na temperatura de 1,3 °C e diferença média de 0,6 °C com o “software” NBSLD modificado para reproduzir melhor as condições climáticas brasileiras.

O gráfico permite verificar, ainda, que não há uma queda acentuada na temperatura no período noturno, tanto nas temperaturas medidas como nas simuladas. A pouca variação deve-se ao tipo de edificação que, por ser antiga, tem paredes espessas, constituindo uma edificação "termicamente pesada" (elevada inércia térmica).



**Figura 4 - Gráfico da temperatura da sala-teste.**

O gráfico, da figura 5, mostra a carga térmica medida com a margem de incerteza prevista e a carga simulada nos dias 19 e 20 de janeiro e 2002. A sala-teste está condicionada.



**Figura 5 - Gráfico da carga térmica e incerteza.**

Observa-se, através do gráfico, que a diferença entre a carga térmica medida e simulada apresenta-se dentro do intervalo da incerteza prevista. A diferença máxima entre os resultados experimentais e simulados é de 288 W e ocorre às 10 h do dia 18/01. A diferença média é 74 W.

## 9. CONCLUSÃO

No estudo comparativo realizado considerou-se que houve uma boa concordância entre as temperaturas e as cargas térmica medidas e simuladas no período.

É necessário ressaltar que, dependendo da opção do usuário do programa computacional, as diferenças entre os resultados medidos e simulados poderão ser diferentes. É importante, portanto, que se conheçam as vantagens e limitações da ferramenta computacional disponível para simulações termoenergéticas.

A infiltração é uma grandeza difícil de ser determinada ou estimada, merecendo muitas horas de simulações e ajustes até se obter um valor adequado e coerente com a bibliografia disponível pesquisada.

Muitos fatores podem ter contribuído para as diferenças apresentadas entre os resultados medidos e simulados, tais como: as características termofísicas dos materiais, que podem não representar exatamente as que foram utilizados na construção; os dados de entrada obtidos a partir de medições que levam consigo uma incerteza da medida; a impossibilidade da entrada no programa de aberturas com forma geométrica circular; a hipótese que desconsidera o gradiente na temperatura do ar da zona e a utilização de equipamentos de medição simples, que limitam a precisão dos resultados.

Finalmente, merece que se diga que o EnergyPlus é uma ferramenta poderosa no campo das simulações térmicas, apresentando resultados com boa concordância, quando comparados a resultados experimentais, em simulações realizadas em edificações "termicamente pesadas".

## 9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASHRAE - American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., 2001. "**ASHRAE Handbook Fundamentals**", Atlanta.
- EnergyPlus Manual**. Version 1.0.2, July 2002. COPYRIGHT 1998-2002, GARD.
- Duffie, J.A., Beckman W.A., 1991. "**Solar Engineering of Thermal Processes**", 2 ed., John Wiley and Sons, New York.
- Hernandez, A. N., Tribess, A., Vittorino, F., 2001. "Evaluation of simulation software for non-conditioned houses", **XVI Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica**, Novembro 26-30, Uberlândia, vol.5, pp70-75.
- Holman, J. P., 1971. "**Experimental Methods for Engineers**", 2.ed., McGraw-Hill.
- Pedrini, A., 1997. "**Desenvolvimento de Metodologia de Calibração de Modelos para Simulações Térmica e Energética de Edificações**", Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil -UFSC.
- Rauber, D. L., et al. 1993. "Análise de softwares de simulação térmica para diferentes climas e sala comercial", **ENTAC 93 - Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído**, Novembro 17-19, São Paulo, vol.2, pp. 795-802.
- Vittorino, F., 1994, "**Estudo teórico-experimental de método de cálculo para a determinação de cargas térmicas, da temperatura e da umidade do ar e ambientes condicionados**", Dissertação de Mestrado em Engenharia. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.