

## MEDIÇÃO E SIMULAÇÃO DA CARGA TÉRMICA DE AR CONDICIONADO DE UM AMBIENTE

**Paulo Otto Beyer**

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Engenharia Mecânica  
pob@mecanica.ufrgs.br

**Edi Terezinha de Oliveira Grings**

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Engenharia Mecânica  
editog@terra.com.br

*Resumo. O presente trabalho apresenta uma comparação entre resultados computacionais obtidos através do "software" EnergyPlus e experimentais do comportamento térmico de um ambiente condicionado ou não condicionado. Para tanto, mediram-se os dados climáticos de radiação, velocidade do vento e temperatura, no período de 11 a 20 de janeiro de 2002, e produziu-se um arquivo climático. Simultaneamente foi feita a aquisição das temperaturas de uma sala-teste, localizada no terceiro pavimento de um prédio na cidade de Porto Alegre e das salas adjacentes. As temperaturas do ar de insuflamento e de retorno dos condicionadores de ar, localizados na sala, foram medidas durante o dia, em seis dias do período de monitoramento. A velocidade do ar de retorno foi coletada e calculou-se a potência sensível de refrigeração. Os resultados da carga térmica e temperatura ambiente da sala-teste obtidos nas simulações foram comparados com os dados experimentais. Houve uma boa concordância entre os resultados computacionais e experimentais. Assim, conclui-se que o "software" EnergyPlus representa bem o comportamento térmico de uma edificação de elevada inércia térmica.*

*Palavras chave: EnergyPlus, simulação termo-energética, ar condicionado, carga térmica, comportamento térmico de edificações.*

### 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.

Entre os trabalhos disponíveis, 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 da Engenharia Mecânica da UFRGS, 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 programa computacional EnergyPlus utilizado gera arquivos do tipo .dxf que podem ser abertos no AUTOCAD. A figura 1 é uma perspectiva da sala gerada a partir do arquivo .dxf. Podem ser vistas no centro a sala simulada e medida, acima, abaixo e dos lados as salas adjacentes, na frente a marquise e pilares externos.

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, e por isso foi necessário que as medições ocorressem em período de temperatura alta.

### 2. Objetivo do trabalho

Apesar das vantagens inerentes ao uso de programas computacionais, muitas vezes há divergências significativas entre os resultados reais e calculados, e por isso pretende-se comparar os resultados da simulação da carga térmica e da

evolução livre da temperatura de uma sala, realizada com o programa EnergyPlus, com os resultados medidos desta sala.

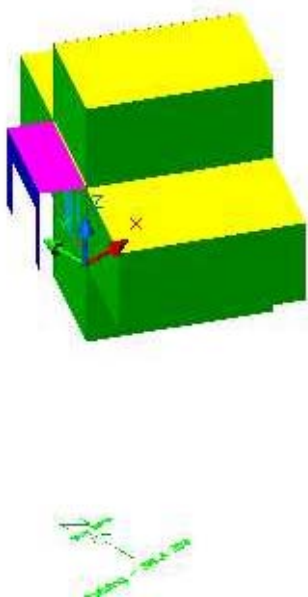


Figura 1. Sala simulada e medida

### 3. Medições

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.

#### 3.1. Medição da potência sensível de refrigeração

Para a determinação da potência sensível de refrigeração foram utilizados os 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 foi medida a velocidade do ar. Para a realização das medidas de velocidade do ar foi utilizado um anemômetro de hélice. A velocidade de entrada do ar em cada condicionador foi determinada através da 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 para cada condicionador. A figura 2 mostra um dos condicionadores medidos.



Figura 2. Condicionador medido

Para o cálculo da potência sensível de refrigeração foram utilizadas as vazões obtidas e as 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 em diversos dias, dando-se ênfase neste trabalho 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)<br>17/01/2002 | Incerteza(W)<br>17/01/2002 | Potência(W)<br>18/01/2002 | Incerteza(W)<br>18/01/2002 |
|------|----------------------------|----------------------------|---------------------------|----------------------------|
| 9    | 1.458                      | ± 198                      |                           |                            |
| 10   | 2.515                      | ± 290                      | 2.617                     | ± 303                      |
| 11   | 2.459                      | ± 283                      | 2.3550                    | ± 272                      |
| 12   | 2.400                      | ± 279                      | 2.488                     | ± 285                      |
| 13   | 2.312                      | ± 268                      | 2.216                     | ± 259                      |
| 14   | 2.325                      | ± 269                      | 2.308                     | ± 267                      |
| 15   | 2.463                      | ± 285                      | 2.304                     | ± 267                      |
| 16   | 2.373                      | ± 273                      | 2.325                     | ± 270                      |
| 17   | 2.203                      | ± 259                      | 1.978                     | ± 245                      |
| 18   | 2.314                      | ± 269                      | 2.599                     | ± 302                      |
| 19   | 1.721                      | ± 221                      | 1.157                     | ± 181                      |

### 3.2. Medição do arquivo climático

Foi medido e 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 foram medidos numa estação meteorológica instalada na cumeeira do prédio, conforme Fig. 3.



Figura 3. Estação meteorológica na cumeeira

Após coletados, os dados foram organizados num arquivo em base horária, obtidos através da média aritmética das medidas realizadas em intervalos de 5 minutos. Os valores médios horários da radiação solar global horizontal e difusa horizontal, temperatura de bulbo seco e velocidade do vento são mostrados na Fig. 4.

A temperatura de orvalho, umidade relativa, 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°, valor apresentado pela biblioteca do programa EnergyPlus para Porto Alegre.

### 4. Simulações

As simulações foram feitas com o programa computacional EnergyPlus.

Variáveis Climáticas Medidas

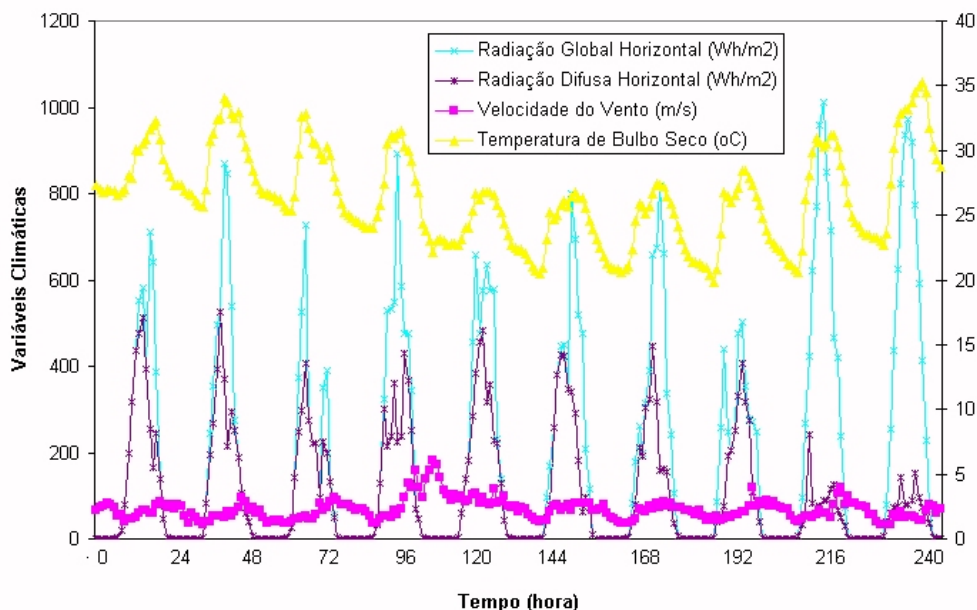


Figura 4. Dados climáticos medidos

4.1 Período de simulação

O período simulado foi de 11 a 20 de janeiro, nos dias 12, 13, 19 e 20 (fins de semana) em evolução livre e no restante do período, 11, 14, 15, 16, 17 e 18 (dias de semana) com climatização durante o dia.

4.2 Elementos da construção

As camadas de materiais são declaradas no programa 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 |
|--------------------------------|-----------|-----------|--------|-------------|---------|
| Acabamento                     | Rugoso    | Médio     | Médio  | Médio       | Médio   |
| Espessura [m]                  | 0,16-0,48 | 0,01      | 0,3    | 0,035-0,010 | 0,035   |
| Condutância [W/m K]            | 1,05      | 1,15      | 1,05   | 1,75        | 0,23    |
| Densidade [kg/m <sup>3</sup> ] | 2000      | 2100      | 2000   | 2400        | 750     |
| Calor específico [J/kg K]      | 920       | 1000      | 920    | 1000        | 1340    |
| Absortância infravermelho      | 0,9       | 0,9       | 0,9    | 0,9         | 0,9     |
| Absortância 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/m K.

4.3 Descrição da sala

Modelou-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. 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, consistindo 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, absorvância solar 0,3 e emissividade térmica hemisférica 0,9.

#### 4.4 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 ligadas. 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         |

#### 4.5 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 que depende da altura da peça e um coeficiente de vento que depende do andar e do grau de proteção do entorno (ASHRAE, 2001).

#### 4.6 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.

O programa foi rodado com os condicionadores ligados e com os condicionadores desligados, conforme o dia e hora em cálculo.

### 5 Resultados

A seguir são apresentados os resultados obtidos, em termos de temperaturas e de potências de refrigeração medidas.

#### 5.1 Temperaturas

A Fig. 5 mostra a evolução das temperaturas ao longo de todo o período medido. Aparecem a temperatura medida e as temperaturas simuladas, onde TEMP representa uma simulação onde se informam as temperaturas das salas adjacentes, e OSC uma simulação onde se utiliza uma correlação ajustada com os dados medidos e que representa a temperatura destas salas.

Durante os períodos climatizados as temperaturas medidas e simuladas convergem, pois as temperaturas medidas foram informadas ao programa de simulação. Durante os períodos em que os condicionadores estavam desligados, as temperaturas simuladas dependeram do programa.

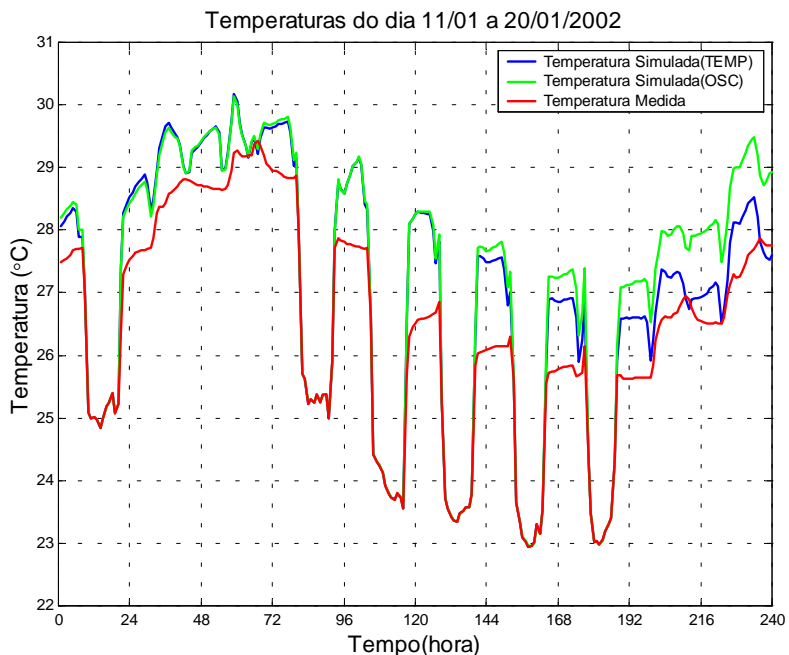


Figura 5. Evolução das temperaturas ao longo do período analisado (°C).

A figura 6 mostra o gráfico das temperaturas internas da sala-teste medidas e simuladas nos dias 19 e 20 de janeiro de 2002. A sala-teste não estava condicionada, ou estava em evolução livre. 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.

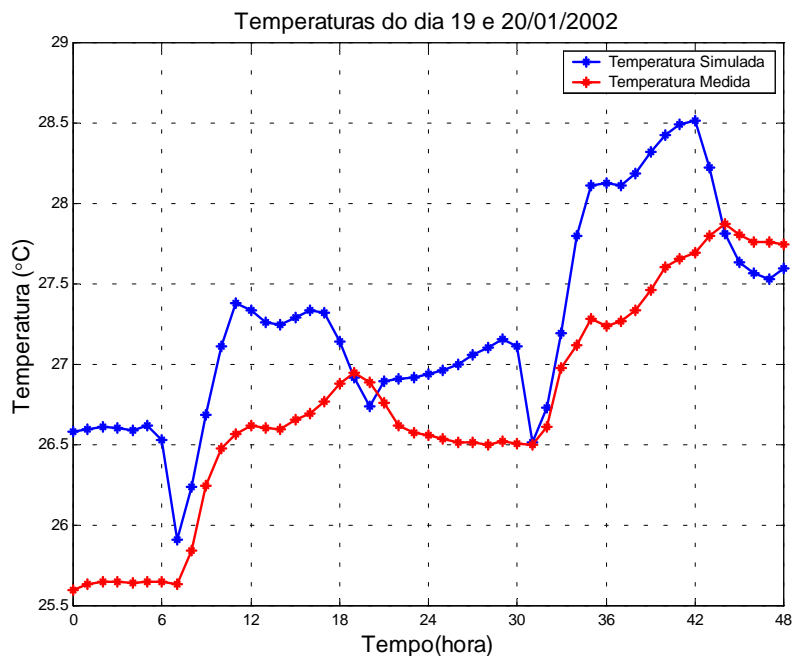


Figura 6. Evolução livre das temperaturas da sala-teste (°C)

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).

### 5.2 Potências de refrigeração

Na figura 7 podem ser vistas as cargas térmicas medidas e simuladas nos dias de semana 11 e 14 a 18 de janeiro de 2002. Pode ser vista a boa concordância entre os valores.

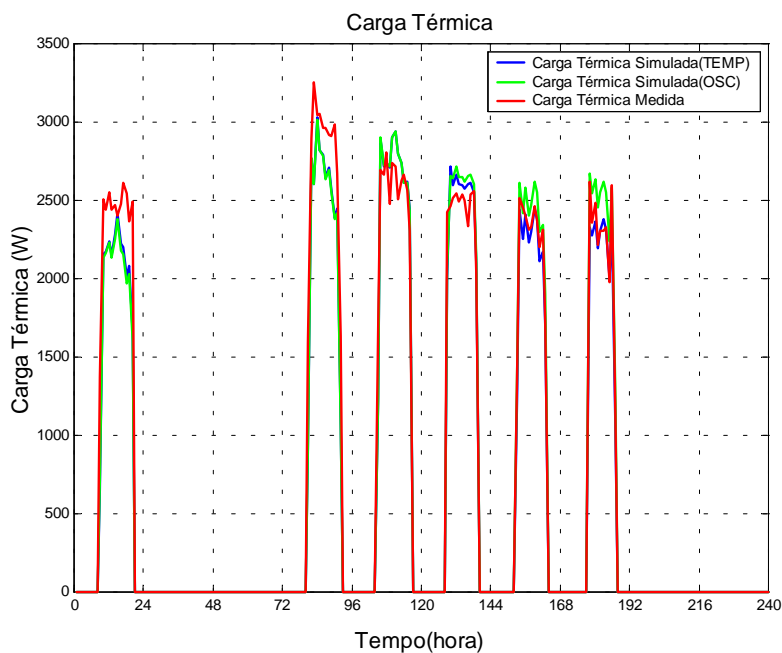


Figura 7. Cargas térmicas medidas e simuladas de 11 a 18/Jan/02 (W).

Para melhor visualização, o gráfico da figura 8 mostra a carga térmica medida com a margem de incerteza prevista e a carga simulada nos dias 17 e 18 de janeiro e 2002. A sala-teste está condicionada.

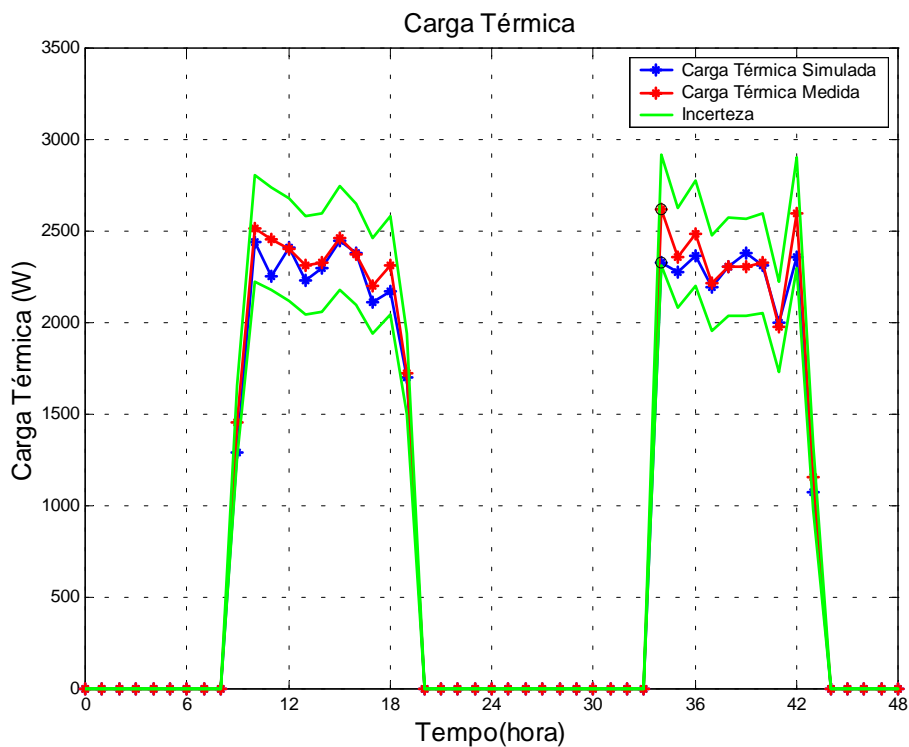


Figura 8. Cargas térmicas medidas e simuladas e incertezas para os dias 17 e 18/01/02 (W).

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 de 74 W.

## 6. Conclusões

No estudo comparativo realizado considerou-se que houve uma boa concordância entre as temperaturas e as cargas térmicas 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 semelhantes à testada.

## 7. Referências

- ASHRAE - American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., 2001. "ASHRAE Handbook Fundamentals", Atlanta.
- EnergyPlus Manual. 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.
- Grings, E.T.O., 2003, "Comparação entre Resultados Computacionais e Experimentais do Comportamento Térmico de um Ambiente", Dissertação de Mestrado em Engenharia, PROMEC, UFRGS.
- 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.
- Pedriani, 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 Climats 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 em Ambientes Condicionados", Dissertação de Mestrado em Engenharia. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

## EXPERIMENTAL AND COMPUTATIONAL RESULTS OF ROOM AIR CONDITIONING COOLING LOAD

Paulo Otto Beyer

Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Departamento de Engenharia Mecânica  
pob@mecanica.ufrgs.br

Edi Terezinha de Oliveira Grings

Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Departamento de Engenharia Mecânica  
editog@terra.com.br

## Abstract

This work presents a comparison between computational results, obtained through the use of the software EnergyPlus, 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. 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 supply and return temperatures of the air conditioners, situated in the test-room, were measured during the day, in 6 days of the monitoring period. The return air speed was measured and refrigeration sensitive capacity calculated.

The results of the thermal load and the environmental temperature of the test-room obtained in the simulations were compared with the experimental data. There was a good agreement between the computational and experimental results. Thus, one can conclude that the software EnergyPlus is a good representation of the thermal behavior of a construction with a high thermal inertia, which was the simulated building.

Keywords: EnergyPlus, energy modeling methods, air conditioning, air conditioning cooling load, building thermal behavior.