

## **FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA ANÁLISE ENERGÉTICA DE EDIFICAÇÕES A PARTIR DE DADOS CLIMÁTICOS SIMPLIFICADOS: VALIDAÇÃO ATRAVÉS DO MÉTODO BESTEST**

**Fernando Simon Westphal<sup>1</sup>; Roberto Lamberts<sup>2</sup>**

(1) Eng. Civil, M.Eng. E-mail: fernando@labeee.ufsc.br

(2) Eng. Civil, Ph.D. E-mail: lamberts@ecv.ufsc.br

LabEEE- Laboratório de Eficiência Energética em Edificações  
UFSC – CTC – ECV – NPC – Cep 88040-900. Cx Postal 476

### **RESUMO**

A validação de uma ferramenta computacional para análise de edificações a partir de dados climáticos simplificados é apresentada. A habilidade do programa em representar o desempenho térmico do envoltório de uma edificação é testada através do método de validação comparativa proposto na ASHRAE Standard 140 (método BESTEST). A estimativa do consumo de energia elétrica para o sistema de condicionamento de ar é verificada através do método HVAC BESTEST. Em relação ao modelo do envoltório, o programa testado apresentou bons resultados para os casos com paredes leves, porém a carga térmica anual estimada para os casos com alta inércia térmica ficou muito acima dos valores apresentados pelos demais programas disponíveis no BESTEST. O consumo de energia elétrica do sistema de condicionamento de ar estimado pelo programa esteve dentro do intervalo de resultados dos programas listados no relatório do método HVAC BESTEST.

### **ABSTRACT**

The validation of a building simulation tool, which uses simplified weather data, is presented. The ability of the programme to represent the building envelope thermal performance is tested through the comparative validation method presented in ASHRAE Standard 140 (BESTEST method). The prediction of the electric energy consumption is verified by using the HVAC BESTEST method. In the envelope modelling, the programme under analysis presented good agreement for cases with lightweight walls, but the annual loads estimated for cases with high thermal inertia were higher than other programmes outputs available in the BESTEST. The electric energy consumption of the air-conditioning system estimated by the programme was inside the range of results of other programmes listed in the HVAC BESTEST report.

### **1. INTRODUÇÃO**

O presente trabalho apresenta os resultados da validação de um programa para estimativa de consumo de energia elétrica de edificações não residenciais, artificialmente condicionadas por aparelhos de expansão direta. A metodologia de cálculo adotada no programa em análise é descrita em WESTPHAL (2002) e WESTPHAL et al. (2002). Ao invés de dados climáticos de registros horários, o programa utiliza valores de temperatura de bulbo seco, umidade relativa e pressão atmosférica extraídos das Normais Climatológicas 1961/1990 (INMET, 1992). O Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) do Ministério de Agricultura e Reforma Agrária apresenta esses dados para 206 estações meteorológicas, abrangendo praticamente todo o território nacional. Além dessa base de dados, as secretarias de agricultura e diversos órgãos ligados à EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária) possuem essas informações monitoradas em vários municípios do país.

Segundo JENSEN (1995), a validação de um programa computacional para simulação energética deveria compreender uma revisão bibliográfica, checagem do código, verificação analítica, comparação entre modelos, estudos de sensibilidade e validação empírica. Este último seria o procedimento mais aceitável em termos de validação, pois se trata da verificação dos resultados simulados por um determinado programa através de medições de campo em um modelo semelhante ao simulado. Porém, nem sempre é possível efetuar em uma edificação todas as medições necessárias para validação de um programa de simulação térmica.

Dada essa dificuldade para efetuar a validação empírica, o NREL (*National Renewable Energy Laboratory*) desenvolveu um método de validação chamado BESTEST (JUDKOFF e NEYMARK, 1998). O método BESTEST foi desenvolvido para ajudar no teste e detecção de erros em programas de simulação energética de edificações e, na realidade, não apresenta os resultados que cada programa deve fornecer para cada modelo simulado, mas apresenta uma base de dados de saída (carga térmica de aquecimento e resfriamento, temperatura interna, radiação solar incidente e transmitida através de superfícies envidraçadas) calculados por programas denominados Estados da Arte em simulação energética nos Estados Unidos e Europa.

Outro método semelhante, o HVAC BESTEST (NEYMARK e JUDKOFF, 2002), foi desenvolvido para permitir o teste dos modelos de sistemas de condicionamento de ar, no qual 4 parâmetros de entrada são variados: ganhos de calor sensível e latente, temperatura de bulbo seco interna e externa. Além dos dados de saída apresentados por programas computacionais de simulação energética, o HVAC BESTEST também apresenta a solução analítica de cada caso simulado.

Uma das vantagens, tanto do HVAC BESTEST, quanto do BESTEST, é que cada programa de simulação é examinado sobre uma extensa variação de parâmetros baseados em vários tipos de dados de saída, minimizando a possibilidade de uma variável estar encobrindo o erro de outra.

JENSEN (1995) aplicou uma metodologia de validação no programa ESP-r (desenvolvido na Escócia) envolvendo: clima, convecção na superfície externa e interna, radiação interna e externa em ondas curtas e longas, condução de calor em componentes construtivos, fluxo de ar, conforto térmico e controles do sistema de condicionamento de ar. Por fim, conclui que não é possível validar um programa por completo, mas pode-se aumentar sua confiabilidade aplicando-se uma metodologia de validação ampla e bem documentada.

## **2. OBJETIVO**

O objetivo deste trabalho é apresentar a validação, através dos métodos BESTEST e HVAC BESTEST, de um programa para análise térmica e energética de edificações que utiliza dados climáticos simplificados.

## **3. METODOLOGIA**

### **3.1 Ferramenta Analisada**

WESTPHAL (2002) apresenta um algoritmo para análise energética de edificações utilizando dados climáticos simplificados para a representação da influência do clima no consumo de energia elétrica de edificações condicionadas artificialmente. A partir das médias das temperaturas máximas e mínimas diárias (INMET, 1992) são gerados os dois dias extremos de carga térmica para cada mês do ano: o dia de maior pico de carga térmica e o dia com o pico de carga térmica mais baixo do mês. O cálculo da carga térmica para esses dias é feito através do método dos fatores de resposta (*Transfer Function Method*), apresentado no Manual de Fundamentos da ASHRAE (ASHRAE, 1997). O consumo mensal de energia elétrica do sistema de condicionamento de ar é estimado a partir de curvas de desempenho dos equipamentos e dos valores horários de carga térmica ocorrida no ambiente climatizado. Para os demais sistemas da edificação (iluminação e outros equipamentos elétricos) o consumo de energia é obtido pela integração da potência solicitada no decorrer do período de utilização. Todo o algoritmo de cálculo foi transcrito em linguagem BASIC e incorporado em planilhas eletrônicas.

### 3.2 Método BESTEST (ASHRAE Standard 140)

Segundo JUDKOFF e NEYMARK (1998), a validação de um programa pode ser feita de 3 maneiras: verificação analítica, a partir de uma solução numérica conhecida; verificação empírica, a partir de resultados de medição em um caso real; e teste comparativo, ou seja, entre diferentes programas ou versões de um mesmo programa. Este último método é o adotado no BESTEST, desenvolvido pelo *National Renewable Energy Laboratory* (NREL). O método BESTEST foi adotado pela ASHRAE como norma para teste e avaliação de programas computacionais para análise energética de edificações, sob o título de ASHRAE Standard 140 (ASHRAE, 2001).

A ASHRAE Standard 140 apresenta 40 casos, todos com maior sensibilidade às cargas dependentes do envelope. As variáveis testadas incluem: massa térmica, ganho de calor através de radiação solar direta, sombreamento nas janelas, zonas ensolaradas, efeito do solo, ventilação noturna, programação e ajuste da temperatura de controle de aquecimento e resfriamento. Atualmente, é utilizado apenas o clima frio e seco de Denver, Colorado (latitude = 39,8°N, longitude = 104,9°O e altitude = 1.609m); com verão seco, inverno seco e grandes variações diárias de temperatura (temperatura do ar média de 9,71°C, mínima de -24,39°C e máxima de 35,00°C). Segundo JUDKOFF e NEYMARK (1998), em uma próxima etapa o método deverá ser adaptado para clima quente e úmido.

O BESTEST foi desenvolvido para testar a maior quantidade de programas de simulação possível, com níveis de detalhamento diferentes. Porém, alguns casos não podem ser simulados em algumas ferramentas simplificadas, como a analisada neste trabalho. Os casos que testam o sombreamento de janelas, modelos com duas zonas e modelos sem condicionamento de ar (temperatura interna variando) não foram simulados. A Tabela 1 apresenta os casos da ASHRAE Standard 140 que puderam ser simulados no algoritmo desenvolvido por WESTPHAL (2002).

**Tabela 1. Casos da ASHRAE Standard 140 que foram simulados na ferramenta analisada.**

Código para o caso		Característica principal	Nomenclatura no BESTEST
Paredes leves	Paredes pesadas		
600	900	Caso base	S.WIN
620	920	Janelas nas fachadas leste e oeste	EW.WIN
640	940	<i>Set-point</i> de aquecimento reduzido	SETBACK
650	950	Ventilação noturna	NT.VENT

### 3.3 Método HVAC BESTEST

NEYMARK e JUDKOFF (2002) apresentam um procedimento de verificação analítica e comparativa para identificação de erros ou falhas na representação do desempenho de sistemas de condicionamento de ar em programas de simulação energética. Chamado de HVAC BESTEST, o método consiste em uma série de testes em regime permanente usando um sistema de condicionamento de ar de expansão direta cuidadosamente especificado em uma edificação com envelope altamente simplificado e praticamente adiabático (sem troca de calor com o ambiente externo).

O HVAC BESTEST possui ao todo 14 casos em que são variados: ganhos de calor interno sensível e latente, temperatura de controle de resfriamento e temperatura de bulbo seco externa (mantida constante nos arquivos climáticos fornecidos). As variações de cada parâmetro buscam isolar o efeito de cada variável no desempenho do sistema de condicionamento de ar de maneira que todas as situações de funcionamento sejam testadas: carga parcial, fator de calor sensível, serpentina seca versus serpentina úmida e a condição padrão adotada pela ARI (*Air-conditioning and Refrigeration Institute*) para avaliar o desempenho de condicionadores de ar. Como dados de saída, são analisados: consumo do compressor e ventiladores, carga sensível e latente na serpentina, eficiência do condicionador de ar (COP – *Coefficient of Performance*), temperatura interna e conteúdo de umidade do ambiente simulado.

O processo de desenvolvimento do HVAC BESTEST foi iterativo, de maneira que a execução das simulações levou ao aprimoramento da própria metodologia e dos programas testados, à medida que novas falhas e erros foram identificados. O relatório final apresentado por NEYMARK e JUDKOFF (2002) lista os resultados analíticos (resolvidos matematicamente por duas instituições de pesquisa) e simulados por programas norte-americanos e europeus. No decorrer dos testes de cada programa de

simulação, a equipe de desenvolvimento do HVAC BESTEST constatou que, geralmente, quando um programa apresenta grandes distorções em relação à solução analítica a causa é uma falha no algoritmo ou problema na documentação para uso da ferramenta de simulação.

Alguns dos erros detectados nos programas testados chegavam a provocar diferenças entre 30% e 40% para as soluções analíticas de cada caso. Depois da correção dos programas, essas diferenças foram reduzidas para menos de 6% (NEYMARK e JUDKOFF, 2002).

## 4. RESULTADOS

### 4.1 BESTEST (ASHRAE Standard 140)

Neste tópico são apresentados os resultados obtidos através da aplicação da ASHRAE Standard 140 (método BESTEST) na ferramenta de computacional em análise, aqui denominada de “Teste”. Os resultados dos outros programas disponíveis no BESTEST também foram transcritos e apresentados nos gráficos.

#### 4.1.1 Casos com paredes leves

A Figura 1 apresenta a carga anual de aquecimento estimada para os casos com paredes leves. O caso 650 não aparece no gráfico porque possui o sistema de aquecimento desligado em período integral. A simulação do caso 600 no programa Teste apresentou um resultado dentro da faixa de valores simulados pelos demais programas listados no BESTEST. O caso 620 apresentou uma carga anual de aquecimento 15% superior ao valor mais alto (DOE2) entre os demais programas. Este caso possui 6 m<sup>2</sup> de área de janela nas fachadas leste e oeste, ao invés de 12 m<sup>2</sup> de janela na fachada sul, como no caso 600.

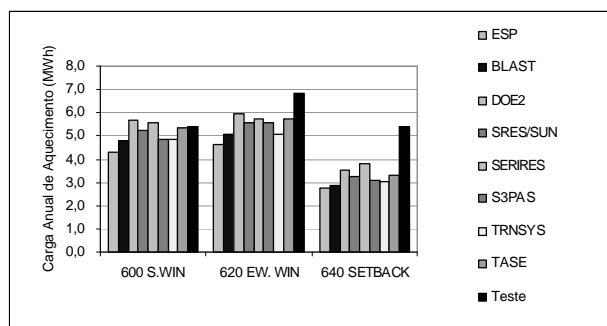


Figura 1. Carga anual de aquecimento para os casos com paredes leves (MWh).

As maiores diferenças entre os casos 620 e 600 para o programa Teste do que para os demais programas indicam uma fragilidade do método na representação do ganho de calor por radiação solar através de janelas.

Como o programa Teste utiliza apenas dois dias típicos por mês para o cálculo da carga térmica, a redução da temperatura de controle do aquecimento nas 7 primeiras horas do dia não resultou em uma redução significativa na carga anual de aquecimento (caso 640 apresentado na Figura 1).

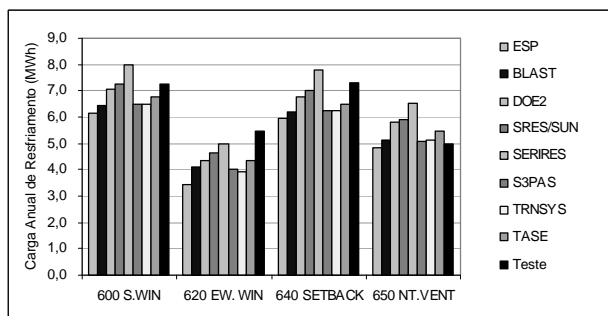


Figura 2. Carga anual de resfriamento para os casos com paredes leves (MWh).

Já a carga anual de resfriamento estimada pelo programa Teste esteve dentro do intervalo de resultados apresentados pelos demais programas listados no BESTEST (Figura 2). Apenas o caso 620 (janelas nas fachadas leste e oeste) apresentou um valor 10% superior ao resultado máximo, referente ao programa SERIRES. Tanto o pico de carga de aquecimento quanto o pico de carga de resfriamento para os casos com paredes leves foram bem estimados pelo programa analisado, como pode ser observado nas Figuras 3 e 4.

Os casos 600, 640 e 650 apresentaram picos de carga de resfriamento inferiores ao menor valor apresentado pelos programas listados no BESTEST (Figura 4), porém as diferenças não ultrapassaram 10%.

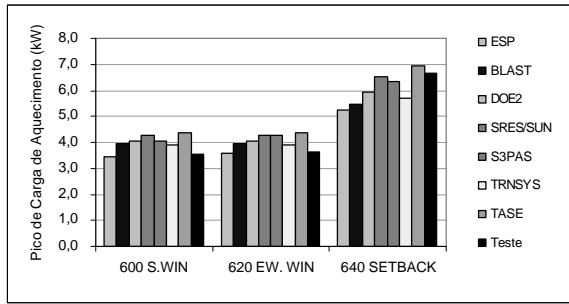


Figura 3. Pico de carga de aquecimento para os casos com paredes leves (kW).

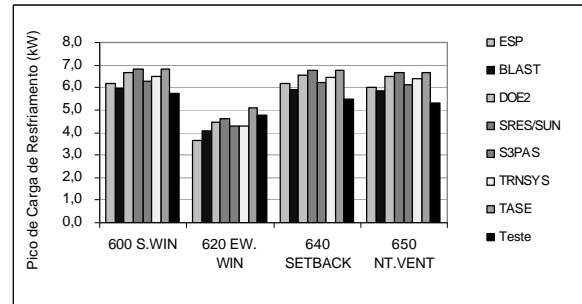


Figura 4. Pico de carga de resfriamento para os casos com paredes leves (kW).

#### 4.1.2 Casos com paredes pesadas

Na simulação dos casos do BESTEST com paredes pesadas, notou-se uma fragilidade do programa Teste em representar a influência da inércia térmica na carga anual de aquecimento e resfriamento.

A Figura 5 mostra a carga anual de aquecimento para os casos com paredes pesadas. Os resultados obtidos com o programa analisado foram 153% (caso 920) a 367% (caso 940) superiores ao máximo verificado entre os programas apresentados no BESTEST. A Figura 6 mostra a carga anual de resfriamento, com o programa Teste apresentando resultados entre 172% (caso 920) e 446% (caso 940) superiores aos máximos verificados entre os programas listados no BESTEST.

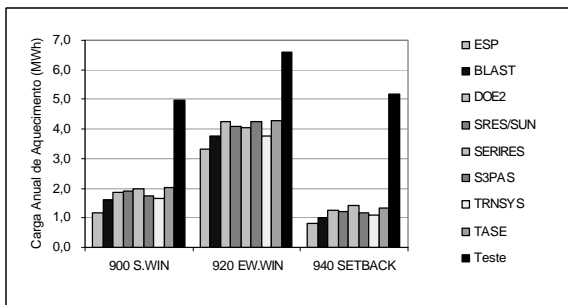


Figura 5. Carga anual de aquecimento para os casos com paredes pesadas (MWh).

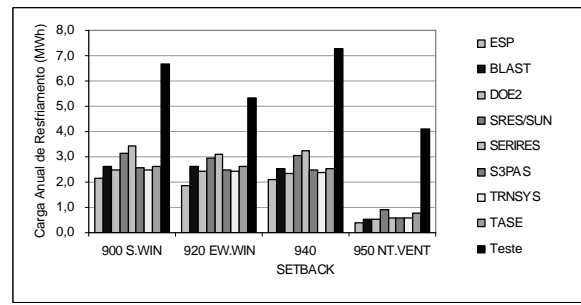


Figura 6. Carga anual de resfriamento para os casos com paredes pesadas (MWh).

Os picos de carga térmica de aquecimento para os casos com paredes pesadas são apresentados na Figura 7. O programa Teste apresentou resultados dentro do intervalo de valores fornecidos pelos demais programas listados no BESTEST. A Figura 8 apresenta os picos de carga térmica de resfriamento para os casos com paredes pesadas, na qual são observados valores até 45% mais altos (caso 950) do que o máximo entre os demais programas.

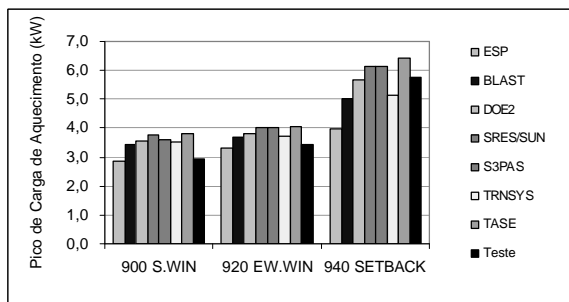


Figura 7. Pico de carga de aquecimento para os casos com paredes pesadas (kW).

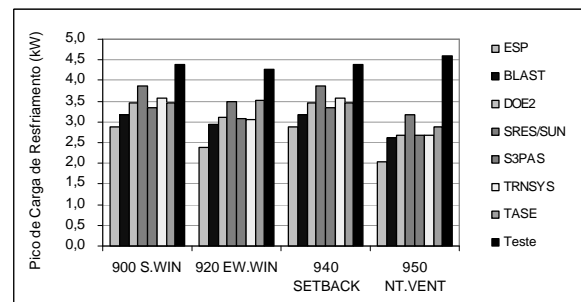


Figura 8. Pico de carga de resfriamento para os casos com paredes pesadas (kW).

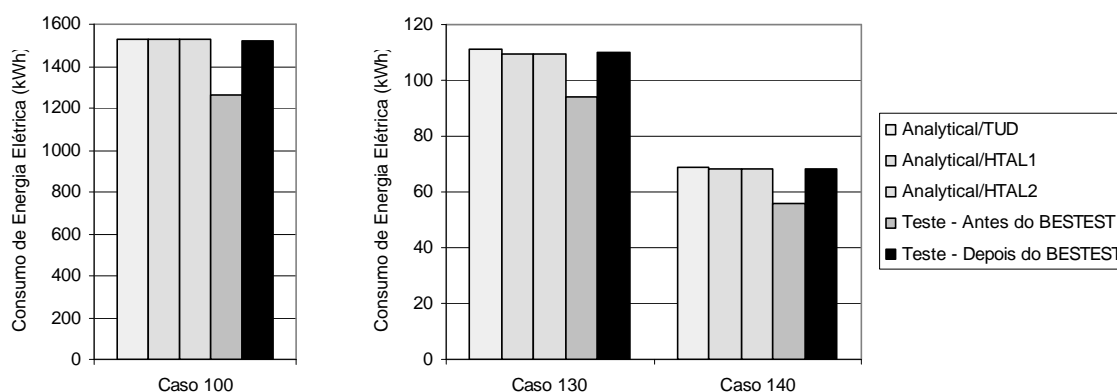
Como esperado, a alta massa térmica das paredes provocou atenuação no pico de aquecimento e resfriamento (Figuras 7 e 8). Porém, a carga total computada para os casos com paredes leves e paredes pesadas é praticamente a mesma (Figuras 5 e 6). Esse comportamento ocorre devido às iterações utilizadas para resolver os cálculos do método dos fatores de resposta, que são repetidas sobre o mesmo padrão diário de temperatura e radiação solar, pois utiliza-se apenas dois dias típicos por mês. Conseqüentemente, a carga térmica da hora 24 acaba influenciando a carga térmica da hora 1 do mesmo dia e não de um dia subsequente, que provavelmente teria outro padrão de variáveis climáticas.

As diferenças encontradas nos casos com alta massa térmica poderiam ser minimizadas pela adoção de mais de dois dias típicos por mês. Provavelmente, a geração de dias intermediários entre os dois dias típicos, mesmo por interpolação linear, pode amenizar o efeito provocado pela aplicação das cargas térmicas sobre o mesmo dia típico. Adicionalmente, os climas brasileiros (onde o programa será utilizado) são menos severos do que o clima seco e frio de Denver (Colorado, Estados Unidos), adotado na ASHRAE Standard 140 (ASHRAE, 2001). O programa em análise não representou bem a influência da massa térmica para esse clima, mas pode apresentar melhores resultados em um clima com menores variações de temperatura de um dia para o outro, como no Brasil.

## 4.2 HVAC BESTEST

Para simular os casos do HVAC BESTEST algumas adaptações tiveram que ser efetuadas no programa Teste, como a modelagem do ventilador externo (condensador) separado do ventilador interno (evaporador) do condicionador de ar.

As primeiras simulações dos casos apresentados no HVAC BESTEST apresentaram resultados um pouco diferentes dos demais programas e das soluções analíticas listadas na metodologia de validação. A Figura 9 mostra os resultados obtidos no programa testado em 3 casos do HVAC BESTEST. O gráfico apresenta os resultados obtidos antes de efetuar as correções no programa e depois de corrigir as falhas detectadas através das simulações de acordo com a metodologia HVAC BESTEST.

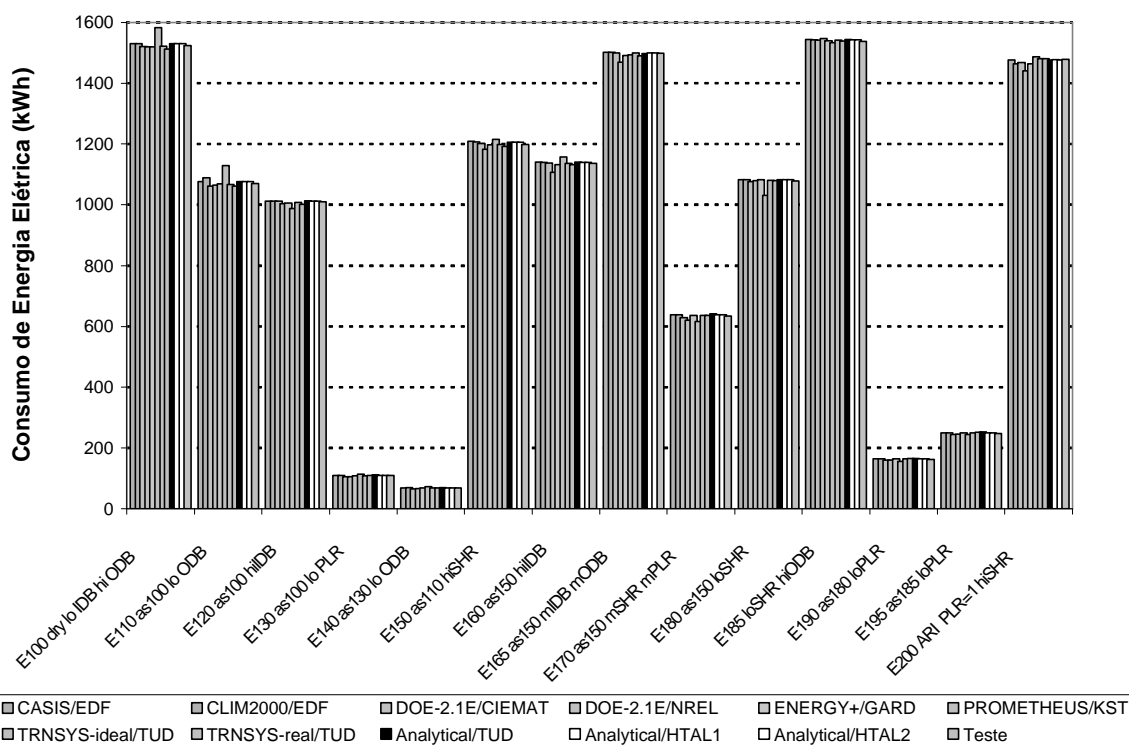


**Figura 9. Resultados para os primeiros casos simulados no HVAC BESTEST, antes e depois das correções no algoritmo.**

Entre os problemas corrigidos no programa Teste cita-se:

- a conversão de algumas variáveis numéricas de precisão simples para dupla precisão;
- a correção do algoritmo que ajusta o coeficiente de performance do condicionador de ar (COP) em função da carga parcial;
- a correção do algoritmo incluindo-se a carga térmica gerada pelo ventilador na carga térmica total da zona climatizada;
- a influência da condição de carga parcial no consumo dos ventiladores interno e externo.

A Figura 10 apresenta os resultados finais de consumo de energia elétrica anual dos 14 casos da metodologia de validação simulados no programa Teste e dos demais programas e soluções analíticas listadas no HVAC BESTEST. As diferenças percentuais absolutas entre o programa Teste e as soluções analíticas ficaram entre 0,1% e 0,7% para os casos sem carga latente na zona (casos 100 a 140) e entre 0,0% e 1,3% para os casos com carga latente (casos 150 a 200). Esses valores são inferiores aos máximos verificados nos demais programas: 6% para os casos sem carga latente na zona e 3% para os casos com carga latente.



## 5. CONCLUSÕES

Na validação do programa através do método BESTEST (ASHRAE Standard 140) obteve-se bons resultados para os modelos de edificação com paredes leves. A simulação de casos com envoltório de alta densidade revelou uma fragilidade do programa na representação da influência da inércia térmica na carga anual de aquecimento e resfriamento.

Este comportamento deve estar ocorrendo devido à utilização de apenas dois dias típicos por mês no cálculo da carga térmica da zona climatizada. Isso significa que as iterações para a determinação da carga térmica através do método dos fatores de resposta são desenvolvidas sobre o mesmo padrão diário de temperatura e radiação solar. Desta forma, a carga térmica da hora 24 irá afetar a carga térmica da hora 1 do mesmo dia e não de um dia subsequente, com comportamento climático diferente. Adicionalmente, o arquivo climático utilizado no BESTEST representa um clima muito severo (desértico), diferente do encontrado no Brasil, onde o programa será aplicado. Espera-se obter resultados melhores para os casos com alta massa térmica em climas brasileiros.

O modelo do sistema de condicionamento de ar foi testado através do método HVAC BESTEST. A simulação dos casos sugeridos pelo método permitiu a identificação e correção de falhas no algoritmo do programa. A diferença máxima obtida entre o consumo de energia elétrica estimado pela versão final do programa e o consumo apresentado como solução analítica na metodologia de validação foi de apenas 1,3%.

O programa testado poderia ser utilizado para analisar a carga térmica e estimar o consumo anual de eletricidade de edificações localizadas em 206 cidades brasileiras, incluindo 188 cidades para as quais não há disponibilidade de arquivos climáticos horários.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

ASHRAE. 1997. ASHRAE Handbook – Fundamentals. American Society of Heating, Refrigeratin and Air-Conditioning Engineers, Inc. USA, Atlanta: 1997.

ASHRAE. 2001. ANSI/ASHRAE Standard 140-2001: Standard Method of Test for the Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs. American Society of Heating, Refrigeratin and Air-Conditioning Engineers, Inc. USA, Atlanta: 2001.

JENSEN, S. O. 1995. Validation of building energy validation program: a methodology. Energy and Buildings, vol. 22, p 133-144.

JUDKOFF, R.; NEYMARK, J. 1998. The BESTEST Method for Evaluating and Diagnosing Building Energy Software. ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings Proceedings 1998. Vol.5, p. 175-190.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA – INMET. 1992. Normais Climatológicas (1961/1990). Governo Federal, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. 84p.

NEYMARK, J.; JUDKOFF, R. 2002. International Energy Agency Building Energy Simulation Test and Diagnostic Method for Heating, Ventilating, and Air-Conditioning Equipment Models (HVAC BESTEST - Volume 1: Cases E100-E200. International Energy Agency and National Renewable Energy Laboratory. Technical Report NREL/TP-550-30152. United States, January 2002.

WESTPHAL F. S. 2002. Desenvolvimento de um algoritmo para estimativa do consumo de energia elétrica de edificações não residenciais a partir de dados climáticos simplificados. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 26 de junho de 2002.

WESTPHAL, F. S.; LAMBERTS, R.; CUNHA NETO, J. A. B. 2002. Estimativa do consumo de energia elétrica de edificações climatizadas não residenciais utilizando dados climáticos simplificados. In: IX Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências Térmicas, 2002, Caxambu - MG. Anais do IX Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências Térmicas. 2002.