

Simulação térmica e energética de edificações a partir de dados climáticos simplificados: validação através do método BESTEST

Building simulation using simplified weather data: validation through the BESTEST method

Fernando Simon Westphal
Roberto Lamberts

Resumo

A validação de uma ferramenta computacional para análise do desempenho térmico e energético 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.

Palavras-chave: simulação, dados climáticos simplificados, validação, BESTEST.

Abstract

This paper presents the validation of a software of programme for the analysis of thermal performance and energy consumption buildings that uses simplified weather data. The ability of the programme to represent the building envelop thermal performance is tested through the comparative validation method established in the ASHRAE Standard 140 (BESTEST method). The prediction of the electric energy consumption is verified by using the HVAC BESTEST method. Concerning the envelop model, the programme achieved good results for the lightweight walls, but the annual loads estimated for cases with high thermal inertia were higher than the outputs of other programmes available in BESTEST. The electricity consumption of the air-conditioning system estimated by the programme was within the range of results of other programmes listed in the HVAC BESTEST report.

Keywords: building simulation, simplified weather data, validation, BESTEST

Fernando Simon Westphal
Departamento de Engenharia
Civil
Centro Tecnológico
Universidade Federal de Santa
Catarina
Núcleo de Pesquisa em
Construção
Laboratório de Eficiência
Energética em Edificações
CEP: 88040-900 - Pantanal -
Florianópolis, SC - Brasil
Tel: (48) 331-5184
E-mail: fernando@labeee.ufsc.br

Roberto Lamberts
Departamento de Engenharia
Civil - Centro Tecnológico
Universidade Federal de Santa
Catarina
Núcleo de Pesquisa em
Construção
Laboratório de Eficiência
Energética em Edificações
Tel: (48) 331-7090
E-mail: lamberts@ecv.ufsc.br

Recebido em 24/05/04
Aceito em 04/11/04

Introdução

Os equipamentos de climatização são responsáveis por 48% da energia elétrica consumida em prédios públicos e comerciais (GELLER, 1992). O desenvolvimento de sistemas mais eficientes envolve desde o projeto arquitetônico da edificação até a utilização de complexos sistemas de automação e controle. Atualmente, existem diversos programas para a análise de alternativas de projetos mais eficientes, desenvolvidos com simulação computacional. Por enquanto, no Brasil essas ferramentas são pouco utilizadas por escritórios de projeto. Seu uso está mais concentrado em universidades e centros de pesquisa.

Um dos motivos para o uso inexpressivo da simulação energética de edificações é a falta de arquivos de dados climáticos horários para diferentes cidades e que possam ser utilizados pelos programas existentes. Atualmente, existem apenas 14 arquivos de dados horários de cidades brasileiras (GOULART et al., 1998) no formato TRY (*Test Reference Year*): Porto Alegre, Florianópolis, Curitiba, São Paulo, Rio de Janeiro, Vitória, Brasília, Belo Horizonte, Salvador, Natal, Recife, São Luís, Belém e Manaus. Em contrapartida, o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), do Ministério de Agricultura e Reforma Agrária, possui uma base de dados climáticos simplificados (Normais Climatológicas) para 206 estações meteorológicas espalhadas pelo país (INMET, 1992).

Usando dados climáticos desse tipo, Alvarez et al. (1985) apresentam um procedimento de cálculo com resultados muito próximos a um programa de simulação horária, salientando que ferramentas simplificadas poderiam ajudar arquitetos e engenheiros nos estágios iniciais de projeto de edificações. Com o mesmo objetivo, Signor et al. (2001) desenvolveram equações simplificadas para estimativa do consumo de energia elétrica em edificações comerciais artificialmente condicionadas. As equações podem ser utilizadas para análises rápidas sobre a influência de dez parâmetros de projeto no consumo de energia elétrica de uma edificação.

A partir de arquivos climáticos horários de 78 localidades da Austrália, Mason e Kingston (1993) estabeleceram correlações entre o consumo de energia em aquecimento e graus-dia de aquecimento; e entre o consumo de energia em resfriamento e graus-dia de resfriamento. Através do método, as regiões sem registro de dados climáticos podem ter o consumo de energia de edificações estimado através de interpolação entre

os valores calculados para as localidades com dados climáticos disponíveis.

Degelman (1991) salienta a dificuldade de se obterem arquivos climáticos com dados horários para várias regiões do mundo. Visando a solucionar esse problema, Degelman desenvolveu uma metodologia para gerar arquivos climáticos horários a partir de dados simplificados. Usando uma semana típica para estimar o consumo anual de energia em edificações, Degelman (1997) reduziu o tempo de simulação em 50% no programa DOE-2.1E. Mas as diferenças obtidas entre o consumo anual estimado através dos dados simplificados e o consumo estimado através do ano climático completo (arquivo TMY com 8.760 horas de dados) chegaram a 18%. Além de reduzir o tempo de simulação, permitindo análises rápidas, o uso de dados simplificados pode ser útil em regiões sem dados horários disponíveis. Entre as recomendações finais, o autor sugere que os programas existentes sejam adaptados para permitir a simulação com dados simplificados.

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 e Lamberts (2003). Em vez de dados climáticos de registros horários, o programa utiliza valores de temperatura de bulbo seco, umidade relativa, pressão atmosférica e nebulosidade, extraídos das Normais Climatológicas 1961/1990 (INMET, 1992). O INMET 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 Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) possuem essas informações monitoradas em vários municípios do país.

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.

Metodologia

Ferramenta Analisada

Westphal (2002) apresenta um algoritmo para análise térmica e energética de edificações utilizando dados climáticos simplificados para a

representação da influência do clima no desempenho térmico 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.

Validação de programas de simulação

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 estimados por um determinado programa mediante medições de campo em um modelo semelhante ao simulado. Porém, nem sempre é possível efetuar em uma edificação todas as medições necessárias para validar um programa de simulação térmica.

Dada essa dificuldade para efetuar a validação empírica, o *National Renewable Energy Laboratory* (NREL) desenvolveu um método de validação chamado BESTEST (JUDKOFF; NEYMARK, 1998). O BESTEST foi desenvolvido para ajudar no teste e detecção de erros em programas de simulação térmica 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; JUDKOFF, 2002), foi desenvolvido para permitir o teste dos modelos de sistemas de condicionamento de ar, no qual quatro parâmetros de entrada são variados: ganhos de calor sensível (a) e latente (b), temperaturas de bulbo seco interna (c) e externa (d). 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 encobrir o erro de outra.

Jensen (1995) aplicou uma metodologia de validação no programa ESP-r (desenvolvido na Escócia) envolvendo: clima, coeficiente de 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.

Método BESTEST (ASHRAE Standard 140)

Segundo Judkoff e Neymark (1998), a validação de um programa pode ser feita de três 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 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 = 1.609 m); 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).

O caso base (código 600 para paredes leves e 900 para paredes pesadas) corresponde a uma edificação de 6,0 m de largura por 8,0 m de comprimento, com pé-direito de 2,7 m. A fachada

sul, com 8,0 m de extensão, possui duas janelas de 6,0 m² cada, conforme a representação da Figura 1.

Salienta-se que a metodologia é aplicada para uma localidade no hemisfério norte, o que justifica a colocação das áreas envidraçadas na fachada sul, para testar a influência da radiação solar no modelo. No hemisfério sul, a fachada norte seria a orientação (vertical) que recebe maior incidência de radiação solar.

O sistema de condicionamento de ar do caso base é representado para fornecer os dados de carga térmica de aquecimento e resfriamento. Considera-se que o equipamento seja 100% eficiente, sem perdas nos dutos de ar e sem limite de capacidade. O sistema de aquecimento é acionado sempre que a temperatura da sala for menor do que 20 °C, e o sistema de resfriamento é acionado se a temperatura da sala for maior do que 27 °C. A taxa de infiltração é de 0,5 troca de ar por hora (64,8 m³/h) e a ventilação, adicional a infiltração, é de 1.703,16 m³/h.

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	Set-point de aquecimento reduzido	SETBACK
650	950	Ventilação noturna	NT.VENT

Tabela 1 - Casos da ASHRAE Standard 140 simulados na ferramenta analisada

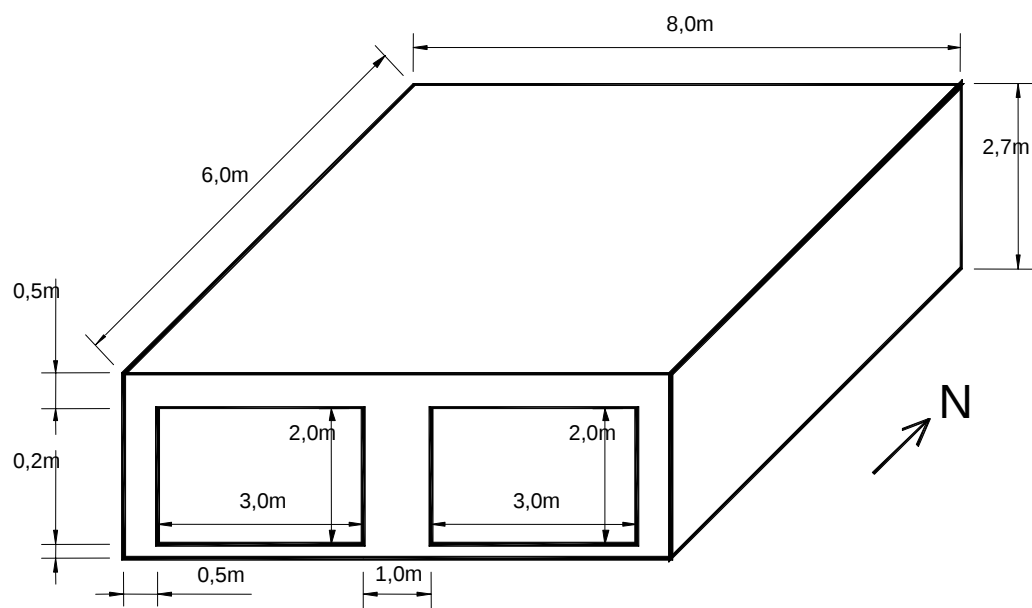


Figura 1 - Representação gráfica do caso base da ASHRAE Standard 140

Representando as cargas internas, considera-se um ganho de calor sensível de 200 W, durante 24 horas por dia, sendo 60% carga radiante e 40% convectiva. Não há ganho de calor latente.

As paredes leves (casos da série 600) são constituídas de 1,2 cm de argamassa na face externa, uma manta de fibra de vidro de 6,6 cm de espessura, com acabamento interno em madeira (0,9 cm), totalizando 9,7 cm de espessura. A transmitância térmica de superfície a superfície é de 0,56 W/m².K e a capacidade térmica total é de 14,53 kJ/m².K. O piso é composto de um isolante de 1,0 m de espessura, totalizando resistência térmica de 0,04 W/m².K.

A cobertura, tanto para os casos com paredes leves quanto para os casos com paredes pesadas, é composta de madeira na face externa (1,9 cm), uma manta de fibra de vidro com 11,2 cm de espessura e acabamento interno em argamassa (1,0 cm), totalizando 14,1 cm de espessura. A transmitância térmica é de 0,33 W/m².K, de superfície a superfície, e a capacidade térmica total é de 18,17 kJ/m².K. A absorptância das superfícies externas é igual a 0,6.

O caso 620 é similar ao 600, sendo o posicionamento das janelas alterado. Em vez de as duas janelas estarem localizadas na fachada sul, modela-se uma na fachada leste e outra na fachada oeste.

O caso 640 é idêntico ao 600, porém a temperatura de controle de aquecimento é reduzida para 10 °C durante as 7 primeiras horas do dia. A partir das 7h, a temperatura de controle para o sistema de aquecimento volta a ser 20 °C.

O caso 650 difere do 600 apenas por possuir o sistema de aquecimento permanentemente desligado e o sistema de resfriamento desligado durante a noite, das 18h às 7h do dia seguinte. Nesse período, considera-se apenas o funcionamento dos ventiladores, insuflando ar externo para dentro da sala.

Os casos da série 900 apresentam as mesmas características dos casos da série 600, com exceção do tipo de parede e piso. Adotam-se componentes construtivos de mesma transmitância térmica da série 600, mas com maior densidade específica e maior capacidade térmica. As paredes pesadas apresentam capacidade térmica total de 145,14 kJ/m².K e são compostas de blocos de concreto, isolante térmico e acabamento interno em madeira, totalizando 17,1 cm de espessura. O piso, com capacidade térmica de 112,00 kJ/m².K, é composto de 1,0 m de isolante e concreto maciço de 8,0 cm de espessura.

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 pelo Air-conditioning and Refrigeration Institute (ARI) 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, na medida em 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; JUDKOFF, 2002).

Resultados

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.

Casos com paredes leves

A Figura 2 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 m² de área de janela nas fachadas leste e oeste, em vez de 12 m² de janela na fachada sul, como no caso 600.

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 sete primeiras horas do dia não resultou em uma redução significativa na carga anual de aquecimento (caso 640 apresentado na Figura 2).

Já a carga anual de resfriamento estimada pelo programa Teste esteve dentro do intervalo de resultados apresentados pelos demais programas listados no BESTEST (Figura 3). 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 4 e 5.

Os casos 600, 640 e 650 apresentaram picos de carga de resfriamento inferiores ao menor valor apresentado pelos programas listados no BESTEST (Figura 5), porém as diferenças não ultrapassaram 10%.

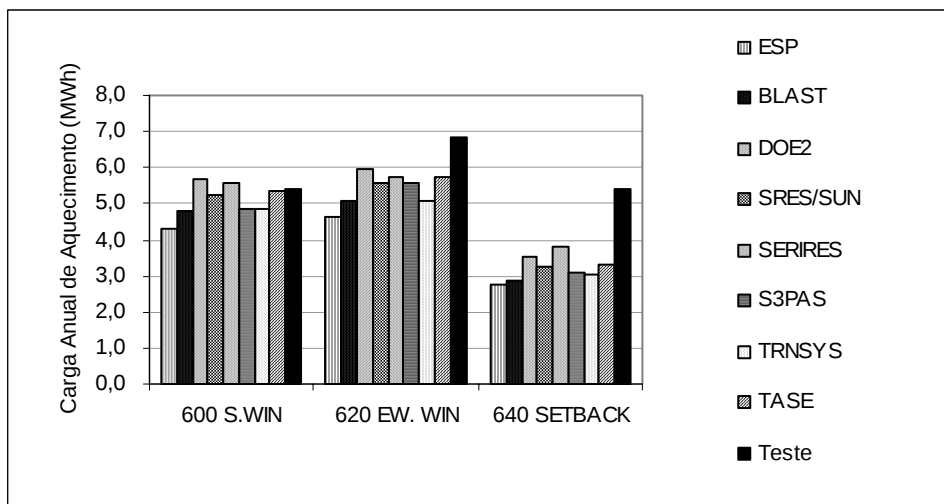


Figura 2 - Carga anual de aquecimento para os casos com paredes leves (MWh)

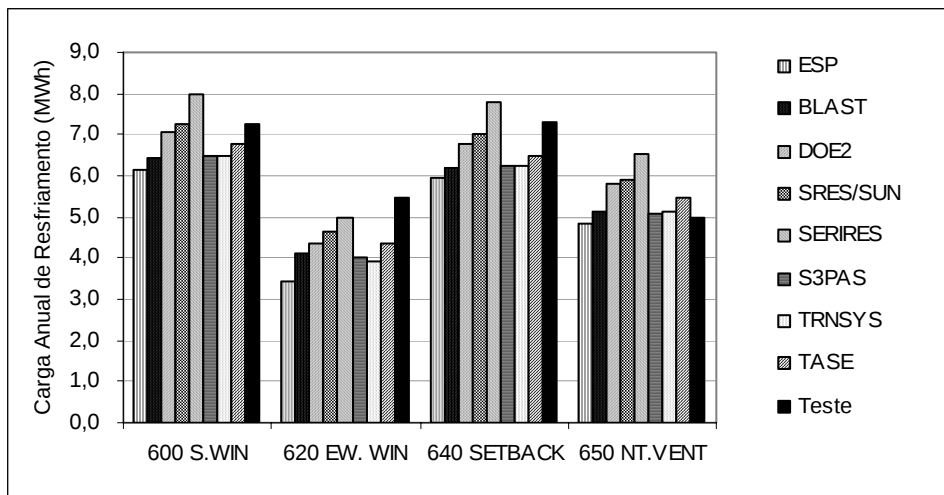


Figura 3 - Carga anual de resfriamento para os casos com paredes leves (MWh)

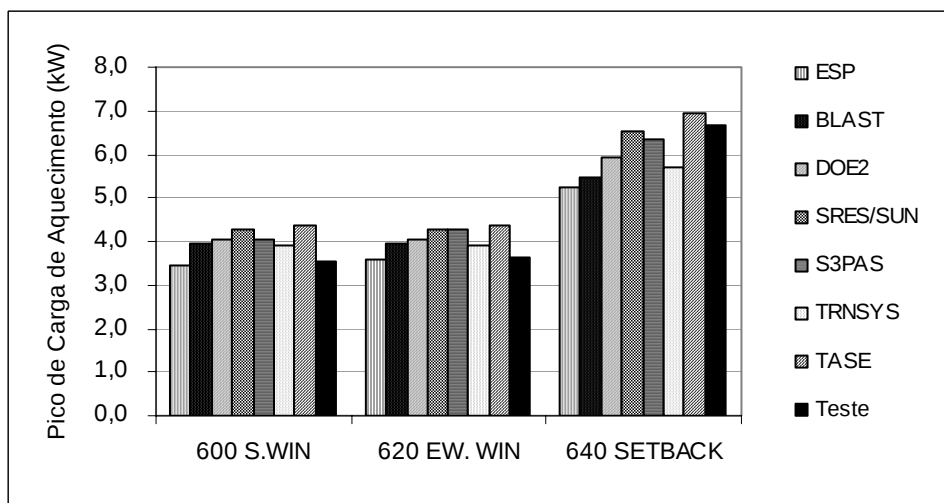


Figura 4 - Pico de carga de aquecimento para os casos com paredes leves (kW)

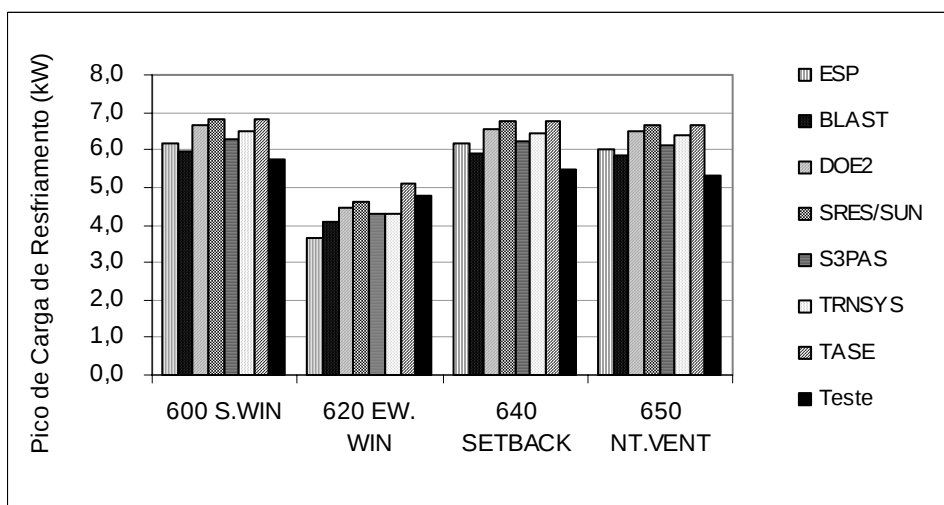


Figura 5 - Pico de carga de resfriamento para os casos com paredes leves (kW)

Casos com paredes pesadas

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

A Figura 6 mostra a carga anual de aquecimento para os casos com paredes pesadas. Os resultados obtidos com o programa analisado foram 153% (caso 920) e 367% (caso 940) superiores ao máximo verificado entre os programas apresentados no BESTEST. A Figura 7 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.

Os picos de carga térmica de aquecimento para os casos com paredes pesadas são apresentados na Figura 8. O programa Teste apresentou resultados dentro do intervalo de valores fornecidos pelos demais programas listados no BESTEST. A Figura 9 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.

Como esperado, a alta massa térmica das paredes provocou atenuação no pico de aquecimento e resfriamento (Figuras 8 e 9). Porém, a carga total computada para os casos com paredes leves e paredes pesadas é praticamente a mesma (Figuras 6 e 7). 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 se utilizam 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.

Radiação solar

A metodologia usada para estimar a radiação solar incidente em cada superfície dos modelos simulados apresentou bons resultados em comparação aos valores estimados pelos outros programas listados no método BESTEST, conforme pode ser observado na Figura 10.

A radiação solar transmitida através das janelas também foi bem estimada pelo programa, estando dentro da faixa de resultados apresentados pelos outros programas testados no BESTEST. A Figura 11 apresenta os valores estimados para uma janela na fachada oeste (caso 620 ou 920) e para uma janela na fachada sul (caso 600 ou 900).

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 mostraram resultados um pouco diferentes dos demais programas e das soluções analíticas listadas na metodologia de validação. A Figura 12 mostra os resultados obtidos no programa testado em três casos do HVAC BESTEST. O gráfico apresenta os resultados obtidos antes de efetuar as correções no programa e depois de corrigir as falhas detectadas nas simulações de acordo com a metodologia HVAC BESTEST.

Entre os problemas corrigidos no programa Teste, citam-se:

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

A Figura 13 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.

De modo geral, os resultados dos programas listados no HVAC BESTEST não apresentam grandes diferenças entre si. Por se tratar de um

modelo de edificação quase adiabática, com poucas trocas de calor com o ambiente externo, os programas apresentaram praticamente os mesmos valores de carga térmica estimada.

O alto grau de detalhamento do desempenho do condicionador de ar adotado na metodologia contribui para a identificação de falhas no algoritmo de cada programa a ser testado, o que proporciona resultados muito próximos entre todas as ferramentas de simulação.

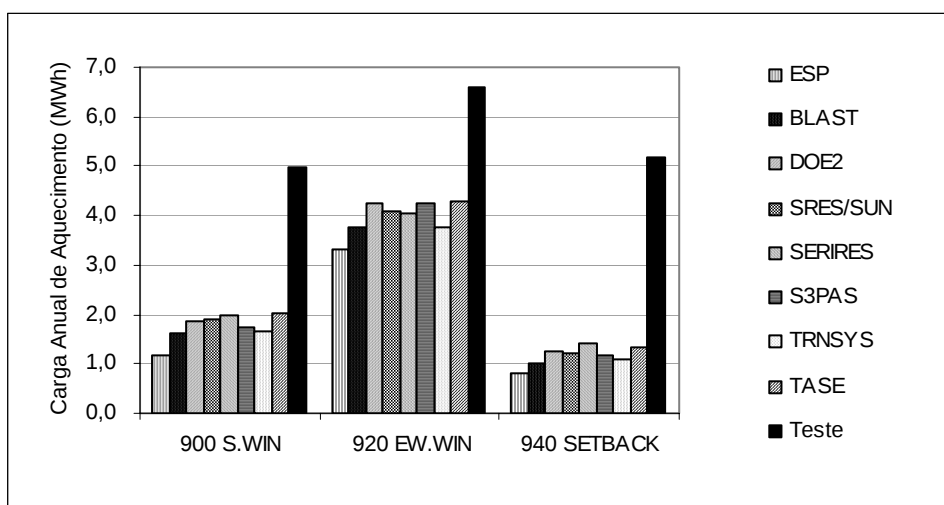


Figura 6 - Carga anual de aquecimento para os casos com paredes pesadas (MWh)

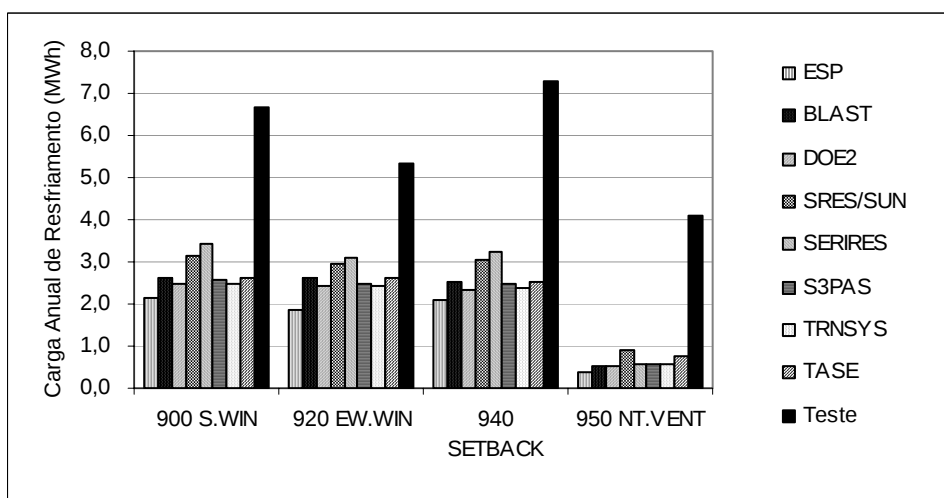


Figura 7 - Carga anual de resfriamento para os casos com paredes pesadas (MWh)

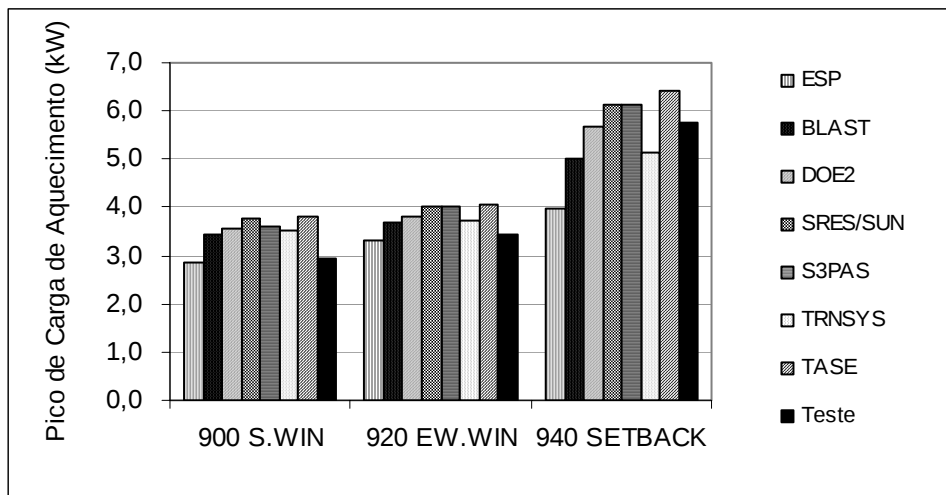


Figura 8 - Pico de carga de aquecimento para os casos com paredes pesadas (kW)

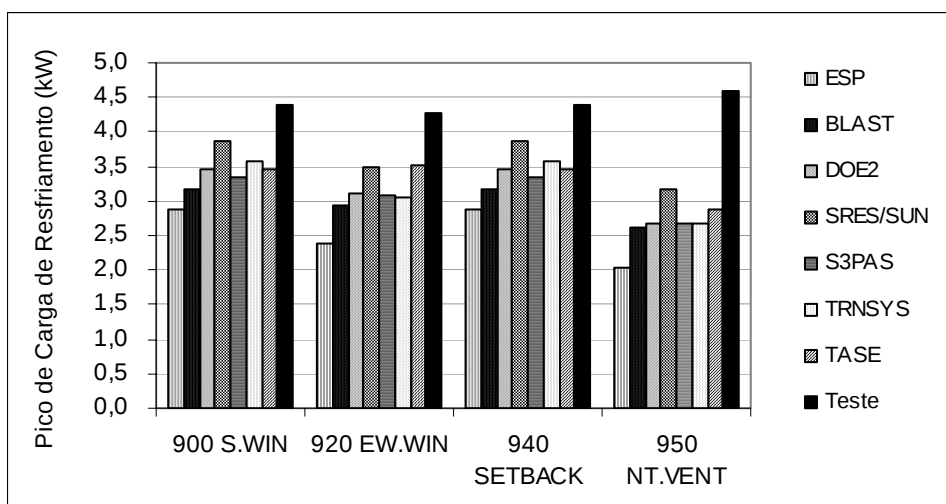


Figura 9 - Pico de carga de resfriamento para os casos com paredes pesadas (kW)

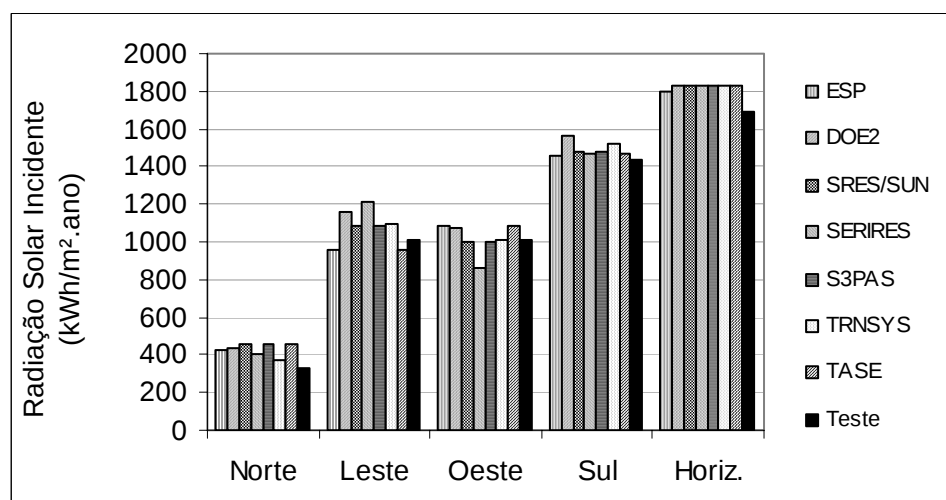


Figura 10 - Radiação solar incidente por ano (kWh/m²)

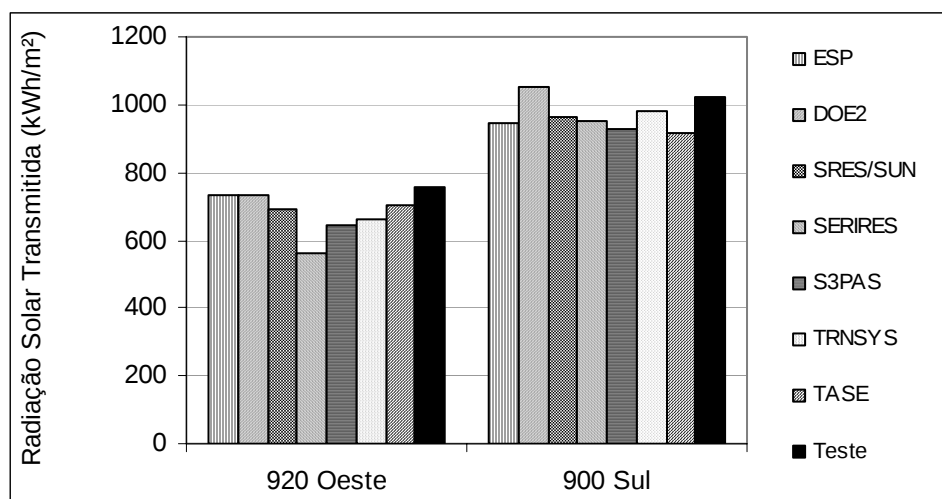


Figura 11 - Radiação solar transmitida por ano (kWh/m²)

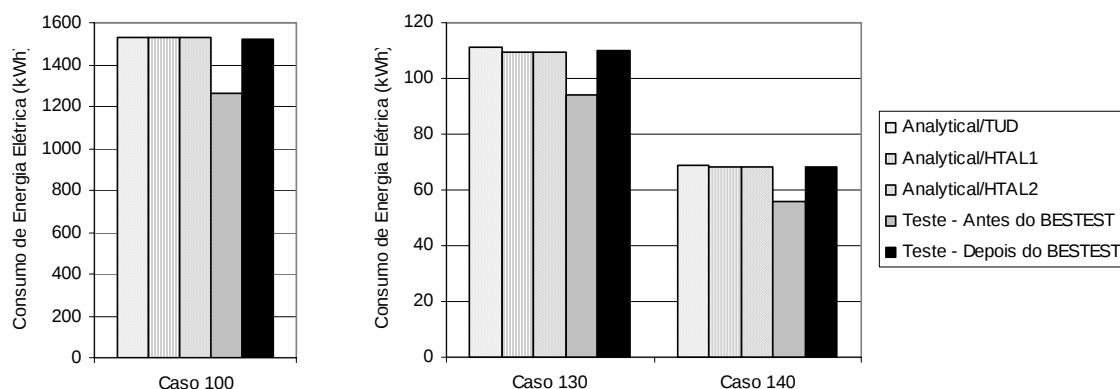


Figura 12 - Resultados para os primeiros casos simulados no HVAC BESTEST, antes e depois das correções no algoritmo

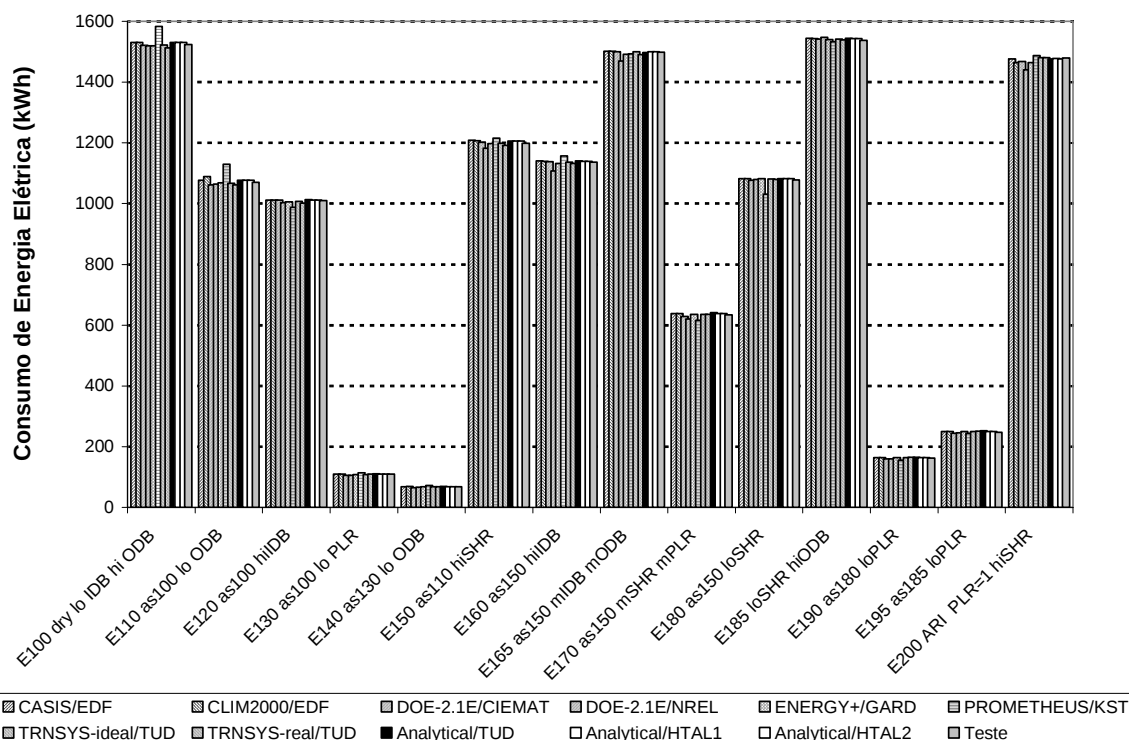


Figura 13 - Consumo de energia elétrica dos 14 casos simulados no HVAC BESTEST

Conclusões

Na validação do programa através do método BESTEST (ASHRAE Standard 140) obtiveram-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.

Esse comportamento deve ocorrer 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. Dessa 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. O método de cálculo está sendo adaptado para utilização com o programa de simulação EnergyPlus, mediante o desenvolvimento de uma interface brasileira para o programa, que permitirá sua aplicação prática na análise do desempenho de edificações em todo o país.

Referências

ALVAREZ, S.; VELÁZQUEZ, R.; ROLDAN, A. Determination of the long-term thermal performance of buildings by means of a

“compressed” meteorological test year. In: CLIMA 2000 ON BUILDING AND DESIGN PERFORMANCE, 1985, Copenhagen. **Proceedings...** Copenhagen: [s.n.], 1985. p. 283-287.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS (ASHRAE). **Handbook of Fundamentals**. Atlanta, USA: ASHRAE, 1997.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS (ASHRAE). **ANSI/ASHRAE Standard 140-2001: Standard Method of Test for the Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs**. Atlanta, USA: ASHRAE, 2001.

DEGELMAN, L. A statistically-based hourly weather data generator for driving energy simulation and equipment design software for buildings. In: INTERNATIONAL IBPSA CONFERENCE (BUILDING SIMULATION), 2., 1991, Nice, França. **Proceedings...** Nice: IBPSA, 1991. p. 592-599.

DEGELMAN, L. Examination of the concept of using “typical-week” weather data for simulation of annualized energy use in buildings. In: INTERNATIONAL IBPSA CONFERENCE (BUILDING SIMULATION), 5., 1997, Praga, República Tcheca. **Proceedings...** Praga: IBPSA, 1997. cód. P016. CD-ROM.

GELLER, H. S. **O uso eficiente da eletricidade: uma estratégia de desenvolvimento para o Brasil**. Rio de Janeiro: INEE – Instituto Nacional de Eficiência Energética, 1992. 223 p.

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

JENSEN, S. O. Validation of building energy simulation programs: a methodology. *Energy and Buildings*, [S.l.]: Elsevier, v. 22, p. 133-144, 1995.

JUDKOFF, R.; NEYMARK, J. The BESTEST Method for Evaluating and Diagnosing Building Energy Software. In: ACEEE SUMMER STUDY ON ENERGY EFFICIENCY IN BUILDINGS, 1998, Monterey, Califórnia, USA. **Proceedings...** Berkeley: ACEEE, 1998. v. 5, p. 175-190.

MASON, M. D.; KINGSTON, T. M. Let’s talk about weather. In: INTERNATIONAL IBPSA CONFERENCE (BUILDING SIMULATION), 3., 1993, Adelaide. **Proceedings...** Adelaide, Austrália: IBPSA, 1993. p. 487-494.

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)**. Technical Report NREL/TP-550-30152. United States: IEA/NREL, Jan. 2002.

SIGNOR, R.; WESTPHAL, F. S.; LAMBERTS, R. Regression analysis of electric energy consumption and architectural variables of conditioned commercial buildings in 14 Brazilian cities. In: INTERNATIONAL IBPSA CONFERENCE (BUILDING SIMULATION), 7., 2001, Rio de Janeiro. **Proceedings...** Rio de Janeiro: IBPSA, 2001. p. 1373-1379.

WESTPHAL, F. S. **Desenvolvimento de um algoritmo para estimativa do consumo de energia elétrica de edificações não residenciais a partir de dados climáticos simplificados**. 2002. 94 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

WESTPHAL, F. S.; LAMBERTS, R. A methodology to analyse the thermal loads of non-residential buildings based on simplified weather data. In: INTERNATIONAL IBPSA CONFERENCE (BUILDING SIMULATION), 8., 2003, Eindhoven, Holanda. **Proceedings...** Eindhoven: IBPSA, 2003. v. 3, p. 1385-1392.