

Influências dos algoritmos de condução e convecção sobre os resultados de simulações do comportamento térmico de edificações

The influence of conduction and convection algorithms on building thermal simulation results

Juliana Oliveira Batista
Roberto Lamberts
Saulo Güths

Resumo

As trocas de calor determinam o balanço térmico das edificações, afetando a temperatura interna. O desempenho térmico pode ser analisado em função dos somatórios de graus-hora de resfriamento e aquecimento, obtidos a partir de simulações computacionais. Este trabalho visa selecionar algoritmos de condução e convecção disponíveis no software EnergyPlus v.6.0, para aplicação na simulação computacional da Casa Eficiente, localizada em Florianópolis, SC. As simulações foram calibradas para o verão, com base em dados medidos in loco, analisando-se o balanço térmico das superfícies e os somatórios de graus-hora de resfriamento de um ambiente interno. Para a condução, os ganhos de calor simulados superestimaram as medições em até 4,4 vezes, com o método das diferenças finitas. Com o algoritmo CTF, os ganhos foram subestimados em até 90%. O somatório de graus-hora de resfriamento (período de 22 a 25/01/2008, temperatura-base de 26 °C) variou de 12,1 °C a 21,5 °C, em função dos coeficientes de convecção. O emprego dos algoritmos Simple para as paredes e Adaptive para o teto e o piso resultou nos menores desvios da temperatura do ar: 0,3 °C a 0,9 °C. Essa análise possibilitou uma seleção acurada dos algoritmos de condução e convecção, sendo eficaz para reduzir os desvios nas simulações do ambiente estudado.

Palavras-chave: Medições *in loco*. Desempenho térmico. Simulação computacional.

Abstract

The heat transfer components define the thermal balance of buildings, affecting their internal temperatures. Cooling and heating degrees-hours, obtained from simulations, are parameters for building thermal performance analysis. This study aims to determine the most appropriate conduction and convection algorithms available in the EnergyPlus v. 6.0, for computer simulation of the Casa Eficiente, an experimental dwelling located in Florianopolis, SC. EnergyPlus 6.0 simulations were calibrated against field measured data during summer, analyzing surfaces inside heat balance and room cooling degree hours. The simulation results for the Conduction Finite Difference Solution algorithm overestimated the measured heat gains by up to 4.4 times. For the CTF algorithm, the measured heat gains were underestimated by up to 90%. The cooling degree hours (period: 22 to 25/01/2008, base temperature = 26 °C) ranged from 12.1 °C to 21.5 °C, depending on convection coefficients. Lower air temperature deviations were obtained by using the Simple algorithm for the walls and the Adaptive algorithm for the ceiling and floor: ranging from 0.3 °C to 0.9 °C. This analysis enabled the selection of accurate conduction and convection algorithms for this building's thermal simulation, reducing the deviations in results for the studied environment.

Keywords: Field measured data. Thermal performance. Building simulation.

Juliana Oliveira Batista
Departamento de Arquitetura e Urbanismo, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo
Universidade Federal de Alagoas
Av. Lourival Melo Mota, s/n, Cidade Universitária
Maceió - AL - Brasil
CEP 57072-970
Tel.: (82) 3214-1266
E-mail: juliana82arq@gmail.com

Roberto Lamberts
Departamento de Engenharia Civil, Centro Tecnológico
Universidade Federal de Santa Catarina
Campus Universitário, Trindade
Caixa-Postal 476
Florianopolis - SC - Brasil
CEP 88040-900
Tel.: (48) 3721-7090
E-mail: lamberts@ecv.ufsc.br

Saulo Güths
Departamento de Engenharia Mecânica, Centro Tecnológico
Universidade Federal de Santa Catarina
Catarina
Tel.: (48) 3721-7709
E-mail: saulo@lmpt.ufsc.br

Recebido em 22/07/11
Aceito em 26/09/11

Introdução

Segundo Allard e Alvarez (1998), um edifício pode ser compreendido como um sistema complexo, onde ocorrem diversos mecanismos de transferência de calor e de massa, cujo resultado é representado pelo balanço térmico do ambiente. As trocas de calor por convecção, condução e radiação determinam o balanço térmico, influenciando a variação da temperatura no interior das edificações.

O comportamento térmico de uma edificação existente ou hipotética pode ser avaliado a partir de simulações computacionais, analisando-se a variação da temperatura interna, por exemplo. A modelagem computacional compreende o uso de modelos físicos que estimam o comportamento do sistema-edifício (PEDRINI, 1997). Este é descrito por meio de sua geometria, localização, propriedades termofísicas do envelope, especificações técnicas dos equipamentos elétricos, iluminação e condicionamento artificial, caracterizando-se também seus padrões de ocupação e uso.

Os somatórios de graus-hora de resfriamento ou aquecimento são critérios de avaliação do desempenho térmico de edificações e refletem o resultado do balanço térmico do ambiente. São calculados em função de limites de temperatura definidos de acordo com as exigências de conforto térmico dos ocupantes. Esse parâmetro pode ser utilizado na comparação do desempenho de diferentes configurações construtivas, conforme avaliado nos estudos de Pfafferott, Herkel e Jäschke (2003), Ghiaus e Allard (2006) e Yang e Li (2008).

É de fundamental importância a modelagem criteriosa dos fenômenos de transferência de calor. Segundo Westphal (2007), é necessário calibrar o modelo computacional, efetuando-se ajustes nos dados de entrada e verificando-se sua influência nos dados de saída do software. Esse processo denomina-se análise de sensibilidade, que pode ser efetuado comparando-se os resultados simulados com dados do monitoramento de edificações já existentes, tais como o consumo de energia e a variação da temperatura interna, a exemplo dos estudos de Geros *et al.* (1999) e Finn, Connolly e Kenny (2007).

O objetivo deste trabalho é selecionar algoritmos de condução e convecção disponíveis no software EnergyPlus v.6.0, para aplicação na simulação computacional da Casa Eficiente, localizada em Florianópolis, SC. As simulações foram calibradas para o período de verão, com base em dados medidos *in loco*, analisando-se o balanço térmico

das superfícies e os somatórios de graus-hora de resfriamento de um ambiente interno.

Método

O método consiste na aplicação de dados do monitoramento *in loco* de uma residência experimental para a calibração de simulações computacionais. Utilizou-se o software EnergyPlus v.6.0, que emprega o modelo de rede (*Airflow Network*), validado para a simulação da ventilação natural (GU, 2007). Medições e simulações dos fluxos de calor, das temperaturas superficiais e do ar interno foram utilizadas na análise do balanço térmico das superfícies internas, subsidiando a seleção dos parâmetros de modelagem computacional, relativos aos processos de condução e convecção.

Descrição do procedimento experimental

A Casa Eficiente, localizada em Florianópolis, SC, possui 206 m² de área construída, e seu projeto incorpora estratégias bioclimáticas adequadas ao clima quente e úmido local, tais como sombreamento, ventilação cruzada e ventilação mecânica noturna no verão (Figura 1). Construída para funcionar como laboratório de pesquisas e também como uma residência-modelo, é aberta à visitação pública¹.

O quarto de casal foi o ambiente escolhido para análise (Figura 2). Possui uma área interna igual a 17,1 m² e fachadas orientadas a sul, leste e norte. Na fachada leste, há uma janela que possui vidros duplos e persianas incorporadas às esquadrias, sendo a área efetiva de ventilação igual a 1,04 m² (6% da área de piso). As paredes externas, de tijolos maciços aparentes, são duplas e possuem isolamento interno de lã de rocha. A cobertura, de telha cerâmica, possui isolamento térmico de lã de rocha e manta refletiva de alumínio, com forro de madeira OSB. No ambiente encontra-se instalado um insuflador de ar para ventilação mecânica noturna, com vazão constante de 0,18 m³/s (8,6 renovações de ar por hora).

¹ A Casa Eficiente é uma residência experimental, construída em Florianópolis, resultado de uma parceria entre a Eletrosul, a Eletrobras e o Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LabEEE) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) (<http://www.eletrosul.gov.br/casaeficiente/br/home/conteudo.php?cd=8>).



Figura 1 - Vista externa da Casa Eficiente (fachada norte)

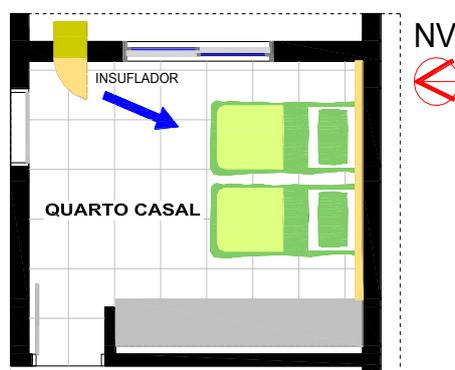


Figura 2 - Planta baixa do ambiente monitorado

No exterior da edificação, uma estação meteorológica monitora temperatura e radiação (horárias), precipitação (diária) e velocidade e direção do vento (registradas em intervalos de 1 min). Nos ambientes internos, são efetuadas medições de fluxos de calor, temperaturas do ar e temperaturas superficiais.

Os fluxos de calor através das paredes sul e leste e da cobertura são medidos por três fluxímetros a gradiente tangencial, com espessura igual a 300 micrometros e medindo 50 mm x 50 mm. A medição das temperaturas foi realizada por termopares do tipo T, AWG26. Para a medição das temperaturas superficiais os sensores foram colados em uma extensão de 50 mm sobre a superfície, para minimizar os efeitos de ponte de calor. Para a medição da temperatura do ar os termopares ficaram a 50 mm da superfície (Figura 3).

Os fluxímetros registram de modo integrado as trocas térmicas por convecção e radiação. Se a temperatura do ar interno é maior que a temperatura da superfície do componente, esta absorve calor, registrando-se fluxo negativo. Caso a temperatura da superfície seja maior que a temperatura do ar, o sensor registra perda de calor

pelo componente, transmitindo-o para o ar, indicada pelo sinal positivo. Desse modo, os ganhos de calor pela superfície correspondem a perdas de calor no ar interno, e vice-versa, conforme ilustrado na Figura 4. Os valores medidos indicam a densidade de fluxo de calor, em W/m^2 , registrada em cada sensor, que foi adotada como representativa de toda a área ocupada por elementos opacos de cada componente monitorado. Como todos os ambientes são térreos e não há fluxímetro instalado no piso do quarto de casal, foram utilizados dados do único fluxímetro instalado no piso, localizado na sala de jantar. Os registros dos sensores são armazenados em um sistema de aquisição controlado por um microcomputador, instalado no interior do ambiente monitorado. Foi contabilizada a variação horária dos ganhos e perdas de calor em cada superfície, bem como o somatório de ganhos e perdas correspondente a cada dia monitorado.

A temperatura horária do ar ambiente foi registrada por um sensor do tipo Hobo U12, observando-se também os registros efetuados pelos termopares instalados próximo das paredes sul e leste e também do teto, para verificar a ocorrência de estratificação.

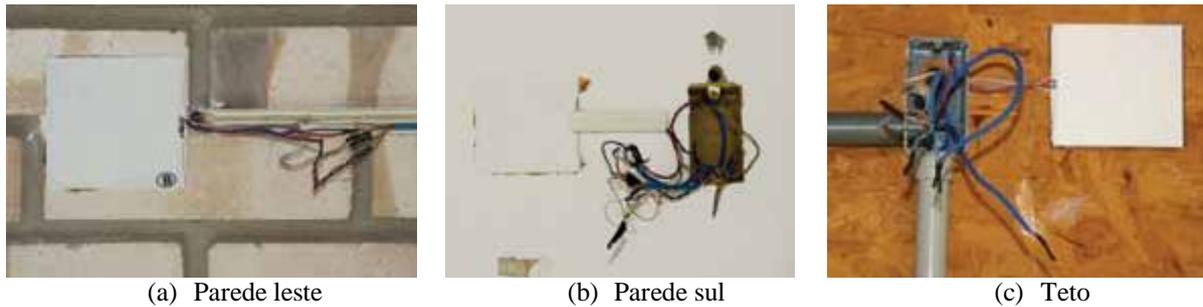


Figura 3 - Sensores instalados no quarto de casal



Figura 4 - Esquema representativo dos fluxos de calor nas superfícies internas

Com base na temperatura do ar interno, calcularam-se os somatórios de graus-hora de resfriamento para o período em análise (janeiro e fevereiro). Adotou-se uma temperatura-base igual a 26 °C, valor inteiro imediatamente superior à temperatura neutra de conforto calculada para o período de análise, que foi igual a 25,4 °C. A temperatura neutra de conforto (T_{neutra}) foi calculada de acordo com a equação proposta por De Dear e Brager (2002), em função da temperatura média externa ($T_{ext-média}$) (Equação 1):

$$T_{neutra} = 0,31T_{ext-média} + 17,8 \quad \text{Eq. 1}$$

O ambiente monitorado foi exposto à ventilação natural diurna, de forma combinada ou não com a ventilação mecânica noturna. Também foi monitorada uma situação na qual nenhuma estratégia de ventilação foi empregada. O ambiente permaneceu sempre desocupado, sem utilização da iluminação artificial. Houve geração de calor interno pelo computador do sistema de aquisição do monitoramento, ligado 24 h diárias, cuja potência é igual a 130 W.

O monitoramento foi desenvolvido em janeiro e fevereiro de 2008. Neste artigo foram analisadas quatro sequências de dias: 01 e 02/01; 08 a 10/01; 03 a 06/02; e 22 a 25/01, cada qual caracterizada por diferentes condições de ventilação. Os dados do monitoramento desses períodos foram utilizados na calibração das simulações, conforme apresentado em Análise de sensibilidade: definição

do modelo-base inicial. A sequência de 22 a 25/01/2008 foi utilizada para a análise do balanço térmico das superfícies internas, conforme apresentado em Análise do balanço térmico das superfícies internas.

Simulações computacionais e trocas térmicas

O EnergyPlus v.6.0 é uma ferramenta computacional destinada à simulação termoenergética de edificações, incluindo a modelagem de sistemas de condicionamento e ventilação natural, entre outras possibilidades (UNITED..., 2011).

O software oferece diferentes possibilidades de modelagem dos parâmetros de simulação. Para simular a ventilação natural e mecânica do ambiente, empregou-se o modelo de rede (*Airflow Network*). Segundo esse modelo, os ambientes são representados por nós, interligados pelas aberturas com o exterior e com outros ambientes internos. Como dados de entrada, são inseridos valores de coeficientes de pressão para cada abertura da fachada, de acordo com a incidência do vento. Esses coeficientes foram estimados com o aplicativo *Cp Generator* (TNO Building Research), desenvolvido a partir de medições em túneis de vento. Com o *Cp Generator* podem ser modeladas edificações de formato retangular, considerando-se as obstruções do entorno e

diferentes rugosidades do terreno. Essa ferramenta facilita a determinação dos coeficientes de pressão, mas as simplificações inerentes à modelagem da ventilação resultam em incertezas nos valores estimados. Nos casos de edificações com geometria complexa, são recomendáveis testes em túnel de vento, para a obtenção de resultados mais precisos.

Utilizando os dados de direção e velocidade do vento, os fluxos de ar são calculados e contabilizados no balanço energético do ar de cada zona térmica. No caso da ventilação mecânica, definem-se a localização da entrada e saída do ar e a vazão de insuflamento ou exaustão do ar, junto com o período de utilização da estratégia. Destaca-se que o modelo de rede calcula uma temperatura interna única para a zona térmica, desconsiderando os efeitos de estratificação do ar.

São avaliados neste trabalho algoritmos que o software utiliza para a simulação dos processos de condução e convecção. Quanto à radiação, é considerada totalmente difusa no interior do ambiente, e todas as reflexões, absorções e reemissões das superfícies internas são incluídas em um coeficiente de troca, denominado *ScriptF* (ENERGYPLUS, 2011).

O cálculo da condução emprega o algoritmo CTF – *Conduction Transfer Function* ou a solução por diferenças finitas (ConDFD). O algoritmo CTF relaciona o processo de condução com uma resposta transiente do componente construtivo a determinado conjunto de condições ambientais, a partir de coeficientes pré-calculados (funções de transferência) (IU; FISHER, 2004). Assim, o fluxo instantâneo por condução é relacionado com um histórico de valores de temperatura e fluxos de calor.

A solução por diferenças finitas emprega a discretização do componente construtivo em “nós” internos. O fluxo de calor no interior do componente é determinado em função do gradiente de temperatura entre nós adjacentes (ENERGYPLUS, 2011).

Quanto ao cálculo dos coeficientes de convecção, os métodos empregados podem utilizar valores constantes, distintos para paredes e teto, ou empregar equações cuja variável dependente é o diferencial de temperatura entre a superfície e o ar no interior da zona térmica ($\Delta T = T_{\text{sup}} - T_{\text{ar}}$). Para ambientes que empregam condicionamento passivo, a exemplo da ventilação natural, apenas o coeficiente de convecção natural é calculado. Isso representa uma limitação da simulação, pois não há possibilidade de cálculo da convecção forçada. Foram realizadas simulações utilizando-se três algoritmos: TARP (padrão do software), *Simple*

Natural (coeficientes constantes) e *Adaptive*. Este último possibilita a seleção de 29 tipos diferentes de equações para o cálculo do coeficiente de convecção, de acordo com a posição da superfície e a direção do fluxo de calor.

O algoritmo TARP utiliza o coeficiente de convecção (h) apresentado pela Norma ASHRAE para paredes verticais (Equação 1) (ASHRAE, 1985), e as equações desenvolvidas por Walton (1983) para superfícies horizontais ou inclinadas, que distinguem duas situações: estável (Equação 2), quando há tendência em retardar o movimento do fluxo de ar em relação à superfície; e instável (Equação 3), quando esse movimento é intensificado.

$$h = 1,31 |\Delta T|^{\frac{1}{3}} \quad \text{Eq. 1}$$

$$h = \frac{1,810 |\Delta T|^{\frac{1}{3}}}{1,382 + |\cos \Sigma|} \quad \text{Eq. 2}$$

$$h = \frac{9,482 |\Delta T|^{\frac{1}{3}}}{7,283 - |\cos \Sigma|} \quad \text{Eq. 3}$$

Onde:

h = coeficiente de convecção ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$);

$\Delta T = T_{\text{sup}} - T_{\text{ar}}$ ($^{\circ}\text{C}$), sendo T_{sup} = temperatura da superfície do componente e T_{ar} = temperatura do ar no interior da zona térmica; e

$\cos \Sigma$ = cosseno do ângulo de inclinação da superfície.

O algoritmo *Simple Natural* também considera a distinção entre a convecção estável ou instável e encontra-se descrito no ASHRAE Handbook (1985). Porém, utiliza coeficientes constantes para superfícies verticais ($h = 3,076 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$); superfícies horizontais ($h = 0,948 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ ou $h = 4,040$, respectivamente estável e instável) e superfícies inclinadas ($h = 2,281 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ ou $h = 3,870 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$, respectivamente estável e instável).

O algoritmo *Adaptive* baseia-se na metodologia desenvolvida por Beausoleil-Morrison (2000), que possibilita a seleção da equação apropriada para o cálculo do coeficiente de convecção em cada superfície interna de acordo com a natureza dos fluxos de calor (natural ou forçado, misto, total ou parcialmente turbulento). Entretanto, nas simulações que empregam a ventilação natural, apenas a convecção natural é considerada.

Calibração do modelo computacional

As simulações da Casa Eficiente foram desenvolvidas de acordo com as condições ambientais verificadas no período de

monitoramento. Para tal, o arquivo climático original, (TRY de Florianópolis de 1963) foi modificado. Os dados correspondentes aos meses de dezembro a abril foram substituídos pelos dados registrados pela estação meteorológica localizada ao lado da residência em 2007 e 2008. O modelo computacional da Casa Eficiente desenvolvido por Pereira (2009) foi adaptado, com a inclusão da ventilação mecânica, sendo submetido a um processo de calibração.

Foram realizados testes para dimensionar o período de *warmup days*, anterior a cada sequência de dias simulados. Esse período é necessário para atingir a convergência dos resultados do balanço térmico, recomendando-se 25 dias (ENERGYPLUS, 2011), tendo sido testado um período maior, 50 dias. Entretanto, observou-se que, para a configuração construtiva simulada, o período efetivamente utilizado variou de 3 a 4 dias.

Os padrões de ventilação foram os mesmos do monitoramento:

- (a) 01 e 02/01: janelas fechadas (24 h);
- (b) 08 a 10/01: janelas abertas entre 9h e 12h e entre 14h e 17h;
- (c) 22 a 25/01: janelas abertas entre 9h e 11h e entre 13h e 18h, com ventilação mecânica noturna (21h às 7h); e
- (d) 03 a 06/02: janelas fechadas (24 h), com ventilação mecânica noturna (21h às 7h).

A iluminação artificial e a ocupação do ambiente foram desconsideradas, pois foram inexistentes durante o monitoramento.

A calibração foi realizada em duas etapas. Na condição inicial, o ambiente foi mantido fechado e sem o emprego de nenhuma estratégia de ventilação (natural ou mecânica). Na sequência, foram testados valores-limites para a inserção dos dados de entrada referentes à ventilação natural. A cada teste, os resultados simulados foram comparados aos dados do monitoramento, verificando-se os desvios médios e os erros quadráticos das temperaturas do ar em relação às temperaturas medidas *in loco*, utilizando-se as equações 4 e 5. Foram mantidos os dados de entrada das simulações cujos resultados apresentassem os menores desvios médios e erros quadráticos, dando prosseguimento à análise de sensibilidade até se configurar o modelo-base inicial, concluindo-se a primeira etapa da calibração.

$$D.M. = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - x_i)}{N} \quad \text{Eq. 4}$$

$$E.Q. = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - x_i)^2}{N} \right\}^{\frac{1}{2}}$$

Eq. 5

Onde:

D.M. = desvio médio;

E.Q. = erro médio quadrático;

y_i = valor estimado e x_i = valor medido; e

N = número de observações.

Na primeira etapa, foram mantidos os algoritmos adotados como padrão pelo software para o cálculo da condução (CTF) e da convecção (TARP). Na segunda etapa, a calibração foi desenvolvida com base na análise do balanço térmico das superfícies internas, visando identificar a combinação de algoritmos de condução e convecção capazes de produzir os menores desvios nos resultados das simulações, quando comparados aos dados do monitoramento *in loco*. Para tal, foi analisado o período de 22 a 25 de janeiro. A variação diária dos ganhos e perdas de calor nas paredes externas e teto do ambiente, bem como os somatórios de ganhos e perdas correspondentes a cada dia monitorado, obtidos a partir das simulações, foram comparados aos dados do monitoramento, os quais representam o fluxo de calor em cada superfície, por convecção e radiação, de forma integrada.

Também foram calculados os desvios médios e os erros quadráticos das temperaturas do ar e os somatórios de graus-hora de resfriamento obtidos em cada simulação, calculados em função de uma temperatura base igual a 26 °C. No total, foram simulados 11 modelos, em que foram combinados os algoritmos CTF e CondFD (condução), com os algoritmos TARP, *Simple Natural* e *Adaptive* (convecção). Na conclusão dessa etapa, foi obtido o modelo-base final.

As análises foram finalizadas com a comparação entre os resultados das simulações do modelo-base inicial e do modelo-base final, que foi utilizado para ressimular o desempenho térmico do ambiente nos mesmos períodos simulados com o modelo-base inicial.

Resultados e discussão

Análise de sensibilidade: definição do modelo-base inicial

A análise de sensibilidade efetuada para os dias 01 e 02/01 corresponde a um período no qual o ambiente permaneceu fechado 24 h, sem utilizar ventilação natural ou mecânica, bloqueando-se totalmente a entrada da radiação solar pela janela, com o uso da persiana incorporada à esquadria na face exterior do vidro. As variáveis testadas foram:

- (a) temperatura do solo; e

(b) coeficiente de fluxo de massa de ar por frestas (k).

A temperatura média mensal do solo exerce grande influência no balanço térmico do ambiente e comumente é obtida a partir do arquivo climático, conforme simulado no Modelo 1. Os dados do arquivo climático podem ser processados pelo aplicativo Slab, associado ao EnergyPlus, que calcula as temperaturas mensais do solo considerando também as propriedades térmicas da laje de piso e a temperatura média interna da edificação (simulação do Modelo 2). Também foi simulado um modelo utilizando-se dados de temperatura do solo medidos *in loco* (termopar instalado sob o piso da sala da edificação) (Modelo 3).

O coeficiente de fluxo de massa de ar por frestas (k) é obtido a partir de referências da literatura e quantifica a infiltração de ar através das frestas de portas e janelas quando estas se encontram fechadas. Foram testados os seguintes valores: 0,0001 kg/s.m (modelo-base) e 0,00006 kg/s.m (Modelo 4), relativos às janelas de correr de duas folhas (plástico), segundo Liddament (1986). A Figura 5 ilustra as temperaturas medidas e simuladas no período. A Tabela 1 apresenta os desvios médios e erros quadráticos das temperaturas do ar simuladas em relação às medições. O Modelo 3 apresentou os melhores resultados: D.M. = 0,6 e E.Q. = 0,6, atestando a influência da temperatura do solo no resultado das simulações. Já a alteração no valor de k não afetou os desvios obtidos, conforme pode ser observado na Tabela 1.

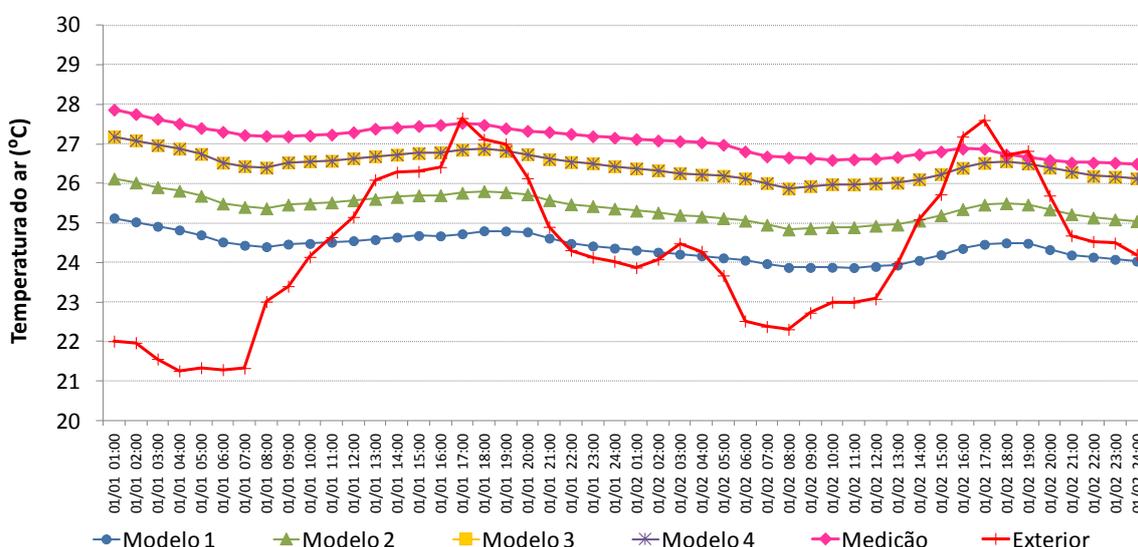


Figura 5 - Temperaturas do ar medidas e simuladas (01 e 02/01)

Tabela 1 - Análise de sensibilidade, dias 1º e 2 de janeiro

Modelo	Caracterização dos dados de entrada	Desvio	Erro Q.	Dados de entrada mantidos
1	modelo-base: Temp. solo arquivo climático e k = 0,0001 kg/s.m.	2,7	2,7	
2	1 + Temp. solo Slab	1,7	1,7	Não
3	1 + Temp. solo medida	0,6	0,6	Sim
4	3 + k = 0,00006 kg/s.m	0,6	0,6	Não

O Modelo 3 foi utilizado para a análise de sensibilidade de outro período: 08 a 10 de janeiro (Figura 6 e Tabela 2), no qual o ambiente foi exposto à ventilação natural apenas nos seguintes horários: 9h às 12h e 14h às 17h (assinalados em azul na Figura 6). Nos demais horários, manteve-se a janela fechada e totalmente sombreada pela persiana externa. As variáveis analisadas foram o coeficiente de descarga das aberturas (C_d) e parâmetros representativos das condições do entorno da edificação: altura da camada-limite (h) e expoente da velocidade do vento (e). O coeficiente de descarga é um parâmetro adimensional, diferenciado conforme a geometria da abertura, cujo valor máximo é 1,0 (SANTAMOURIS, 1998). Foram testados os valores 0,5 (Modelo 5), 0,65 (Modelo 6) e 1,00 (Modelo 7), sendo no Modelo 3 o valor de C_d igual a 0,6. Quanto ao expoente da velocidade do vento (e) e a altura da camada-limite (h), foram testados os seguintes pares de valores: 0,22 m e 370 m, terreno rugoso (Modelo 3), e 0,33 m e 460 m, ambiente urbano (Modelo 8). Segundo a Tabela 2, houve pouca variação nos desvios médios e erros quadráticos. Contudo, o uso do coeficiente de descarga menor ($C_d = 0,5$), associado com

parâmetros característicos de um entorno urbano ($e = 0,33$ m e $h = 460$ m), apresentou melhores resultados. Portanto, o Modelo 8 (D.M. = 0,3 e E.Q. = 0,4) foi utilizado na análise de sensibilidade do período seguinte.

A Figura 7 ilustra as temperaturas medidas e simuladas no período de 3 a 9 de fevereiro, caracterizado pelo emprego da ventilação mecânica noturna entre 21h e 7h (assinalado em verde na Figura 7). Nos demais horários, não foi utilizada nenhuma outra estratégia de ventilação, e a janela permaneceu fechada e totalmente sombreada pela persiana. Foram testados parâmetros de simulação relativos ao insuflamento do ar: o expoente do fluxo de massa de ar (n_1) e o coeficiente do fluxo de massa de ar (k_1) do equipamento, que caracterizam a infiltração do ar através dele quando se encontra desligado. Os valores de k_1 são calculados em função de n_1 , que por sua vez pode variar de 0,5 (Modelo 15) a 1,0 (Modelo 16), segundo Allard (1998). O valor $n_1 = 0,65$ (Modelo 8) é definido como padrão pelo software. Com base nesses três valores, foram calculados os valores de k_1 correspondentes, utilizando-se a Equação 6 (ALLARD; ALVAREZ, 1998).

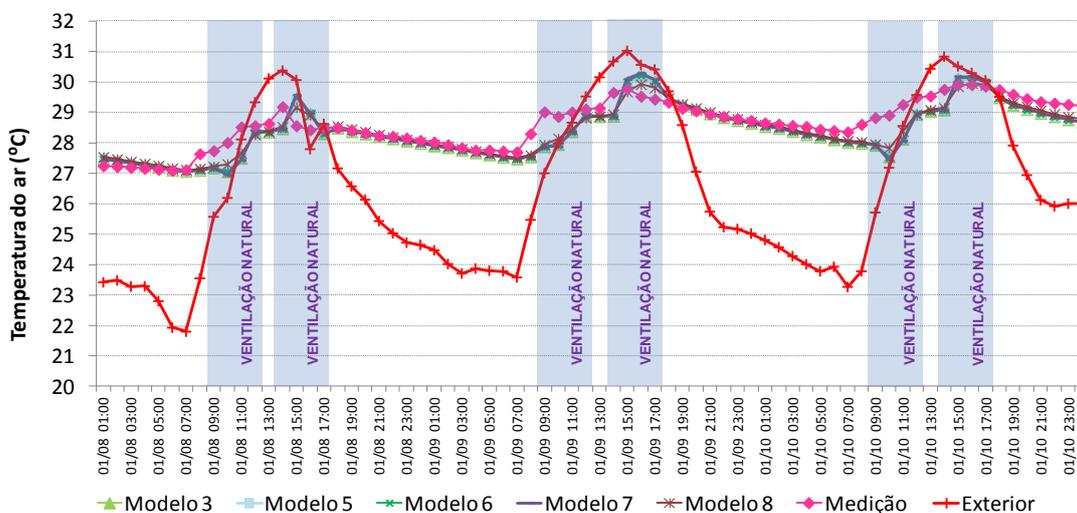


Figura 6 - Temperaturas do ar medidas e simuladas (08 a 10/01)

Tabela 2 - Análise de sensibilidade, dias 8 a 10 de janeiro

Modelo	Caracterização dos dados de entrada	Desvio	Erro Q.	Dados de entrada mantidos
3	Modelo 3: $C_d = 0,6$ m, $e = 0,22$ e $h = 370$ m	0,4	0,5	
5	$3 + C_d = 0,5$	0,3	0,5	Sim
6	$3 + C_d = 0,65$	0,4	0,5	Não
7	$3 + C_d = 1,00$	0,4	0,5	Não
8	$5 + e = 0,33$ m e $h = 460$ m	0,3	0,4	Sim

$$k_I = \frac{L_{cr} \times 9,7 \times (0,092)^{n_I}}{1000} \quad \text{Eq. 6}$$

Onde:

k_I = coeficiente do fluxo de massa de ar ($m^3 s^{-1} Pa^{-n}$);

L_{cr} = comprimento do orifício (m); e

n_I = expoente do fluxo de massa de ar (adimensional).

O aumento da pressão do ar (Pressure Rise – PR) representa outro parâmetro relacionado ao acionamento do equipamento. Não foram observadas recomendações na literatura sobre esse parâmetro, testando-se valores obtidos a partir de outras simulações contidas na biblioteca do software (UNITED..., 2011): 75 Pa, 125 Pa e 400 Pa. Por fim, os parâmetros correspondentes à abertura de insuflamento do ar foram avaliados: coeficiente de descarga (Cd_A), variação de pressão através da abertura (ΔP_A) e expoente do fluxo de massa de ar (n_A), tendo sido testados os valores recomendados pelo manual do software:

- (a) $Cd_A = 1$ e $\Delta P_A = 4$ Pa (Modelo 8); e
- (b) $Cd_A = 0,6$ e $\Delta P_A = 10$ Pa (Modelo 14).

Os valores de n_A simulados foram iguais a 0,65, padrão do software (Modelo 8), 0,5 (Modelo 15) e 1,0 (Modelo 16), valores mínimo e máximo admissíveis.

Observou-se que apenas a alteração do coeficiente de descarga da abertura de insuflamento (Cd_A) e da variação da pressão através da abertura (ΔP_A) resultou na redução do desvio médio e erro quadrático da simulação (Modelo 14). Na Figura 7 estão representados os resultados das simulações do Modelo 8, do Modelo 14 e das medições. Observou-se que os desvios em relação às medições foram menores nos horários em que ventilação mecânica é empregada, destacando-se as variações mais acentuadas das temperaturas simuladas nos horários de acionamento (21h) e interrupção do insuflamento (7h).

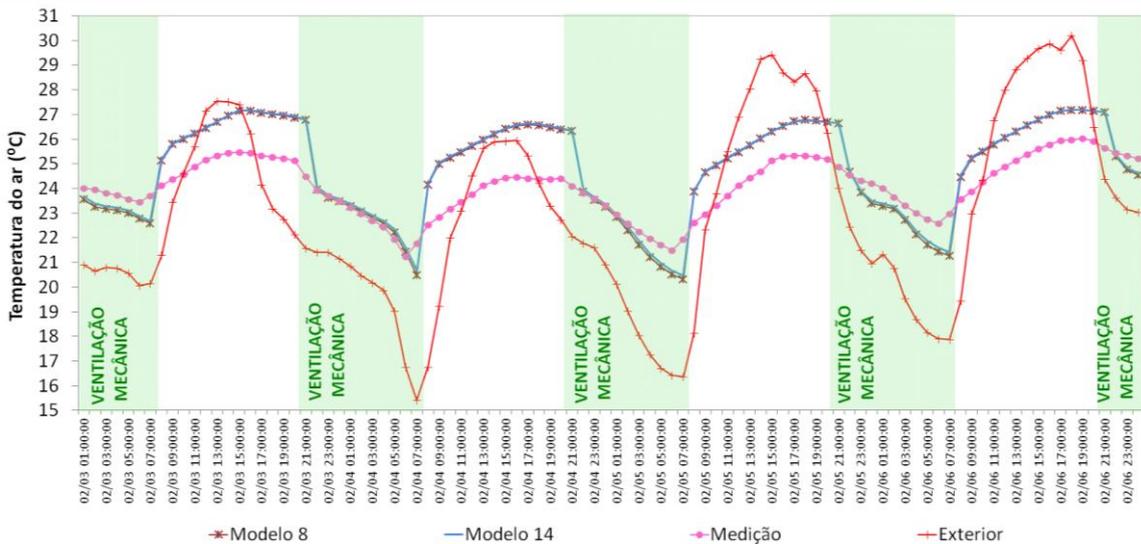


Figura 7 - Temperaturas do ar medidas e simuladas (03 a 06/02)

Tabela 3 - Análise de sensibilidade, dias 3 a 6 de fevereiro

Modelo	Caracterização dos dados de entrada	Desvio	Erro Q.	Dados de entrada mantidos
8	Modelo 8: $n_I = 0,65$; $k_I = 0,00008$; PR = 50; $Cd_A = 1$ e $\Delta P_A = 4$; $n_A = 0,65$ kg/m.s	0,6	0,7	
9	Modelo 8 + $n_I = 0,5$ e $k_I = 0,00017$	0,6	0,7	Não
10	Modelo 8 + $n_I = 1$ e $k_I = 0,00002$	0,6	0,7	Não
11	Modelo 8 + PR = 75	0,6	0,7	Não
12	Modelo 8 + PR = 125	0,6	0,7	Não
13	Modelo 8 + PR = 400	0,6	0,7	Não
14	Modelo 8 + $Cd_A = 0,6$ e $\Delta P_A = 10$ Pa	0,5	0,6	Sim
15	Modelo 14 + $n_A = 0,5$ kg/m.s	0,5	0,6	Não
16	Modelo 14 + $n_A = 1,0$ kg/m.s	0,5	0,6	Não

Desse modo, a análise de sensibilidade considerou o intervalo de uso da ventilação mecânica para o cálculo dos desvios médios e erros quadráticos (21h às 7h), uma vez que as variáveis testadas são relacionadas ao emprego da referida estratégia (Tabela 3). O Modelo 14 destacou-se como o modelo mais adequado (D.M. = 0,5 e E.Q. = 0,6). Quando se considera o intervalo total de 24 h diárias, os desvios médios e erros quadráticos foram os mesmos para todas as simulações, sendo respectivamente iguais a 1,1 e 1,3.

Os Modelos 8, 14, 15 e 16 foram simulados novamente, desenvolvendo-se a análise de sensibilidade para os dias 22 a 25 de janeiro, quando foi empregada a ventilação natural (9h às 11h e 13h às 18h) e a ventilação mecânica noturna

(21h às 7h). A Figura 8 ilustra as temperaturas medidas e simuladas no período. Também foram observados desvios menores nos horários em que a ventilação mecânica foi empregada. A Tabela 4 indica os valores dos desvios médios e erros quadráticos das temperaturas simuladas, distinguindo-se os intervalos com ventilação natural ou sem ventilação e os intervalos com ventilação mecânica. Assim como no período anterior, a diferença entre os modelos é pequena, mas o Modelo 15 apresentou o menor desvio médio (igual a 0,3) e erro quadrático (igual a 0,4) relativos ao intervalo de emprego da ventilação mecânica (21h às 7h), sendo, portanto, definido como o modelo-base inicial calibrado.

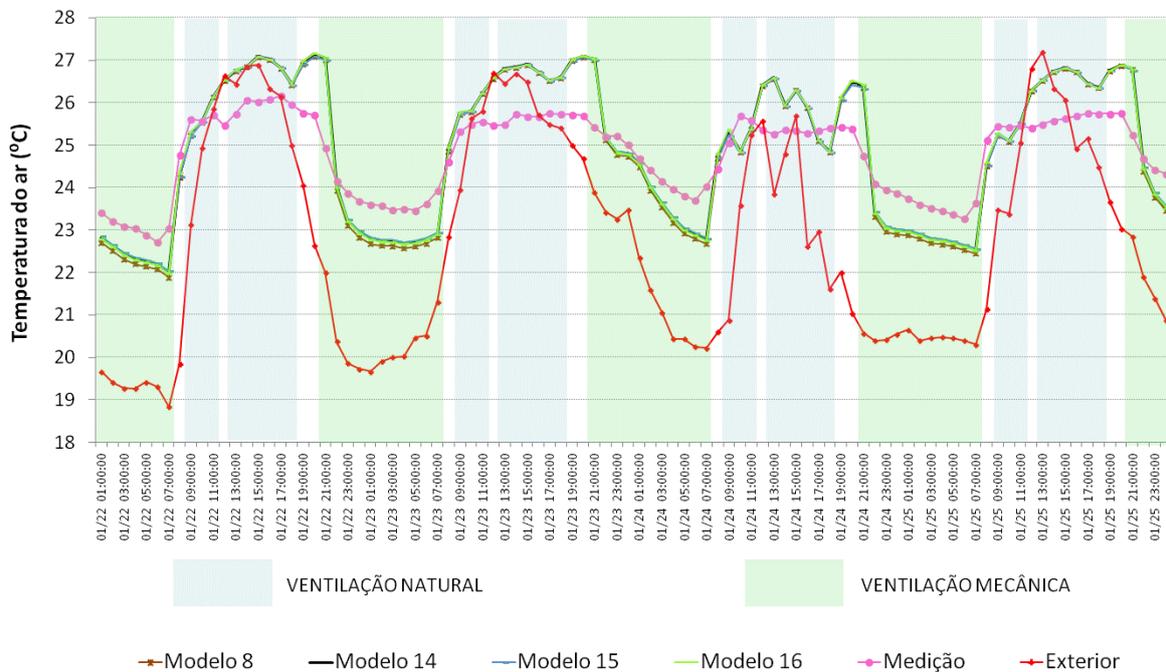


Figura 8 - Temperaturas do ar medidas e simuladas (22 a 25/01)

Tabela 4 - Análise de sensibilidade, dias 22 a 25 de janeiro

Modelo	Caracterização dos dados de entrada	24h		7h-21h (ventilação natural/fechado)		21h-7h (vent. mecânica)		Dados de entrada mantidos
		Desvio	Erro Q.	Desvio	Erro Q.	Desvio	Erro Q.	
8	Modelo 8	0,8	0,9	0,8	0,9	0,3	0,5	
14	Modelo 8 + $Cd_A = 0,6$ e $\Delta P_A = 10$ Pa	0,8	0,9	0,8	1,0	0,3	0,5	Não
15	Modelo 14 + $n_A = 0,5$ kg/m.s	0,7	0,8	0,8	0,9	0,3	0,4	Sim
16	Modelo 14 + $n_A = 1,0$ kg/m.s	0,8	0,9	0,9	1,0	0,3	0,5	Não

Calibração do modelo-base final

Análise do balanço térmico das superfícies internas

O Modelo 15, calibrado na etapa anterior, foi utilizado para a análise do balanço térmico das superfícies internas do ambiente: paredes sul e leste e o teto do quarto de casal. Os dados registrados pelo fluxímetro instalado no piso da sala de jantar também foram analisados, visto ser esse o único ponto de medição dos fluxos de calor no piso da edificação.

A Figura 9 ilustra o balanço térmico da parede sul. As linhas em vermelho indicam os valores máximo e mínimo dos fluxos de calor registrados durante o monitoramento, no dia assinalado. As diferentes colunas representam os fluxos de calor transmitidos pela superfície para o ar interno (perdas) ou absorvido por elas (ganhos), obtidos a partir da medição e das simulações. Os resultados das simulações com o algoritmo CondFD indicam que os ganhos de calor pela superfície são

superestimados, alcançando até o dobro dos valores medidos, enquanto as perdas de calor pela superfície são equivalentes aos valores medidos. Já as simulações com o algoritmo CTF subestimaram as perdas de calor para o ar interno em mais de 60%, enquanto os ganhos de calor pela superfície foram equivalentes às medições.

Os somatórios diários dos ganhos e perdas de calor pela superfície interna da parede sul (Figura 10) evidenciam que os ganhos (fluxos negativos) são superestimados. Os valores simulados com o algoritmo CondFD alcançam até o dobro dos valores medidos, enquanto o algoritmo CTF apresenta valores até 20% maiores que as medições. Quanto às perdas de calor para o ar interno (fluxos positivos), observa-se que as simulações subestimaram as medições em até 50%, obtendo-se resultados semelhantes quando do emprego dos algoritmos TARP e *Adaptive*. Já a combinação CondFD mais *Simple* resultou em valores superestimados em até 51%.

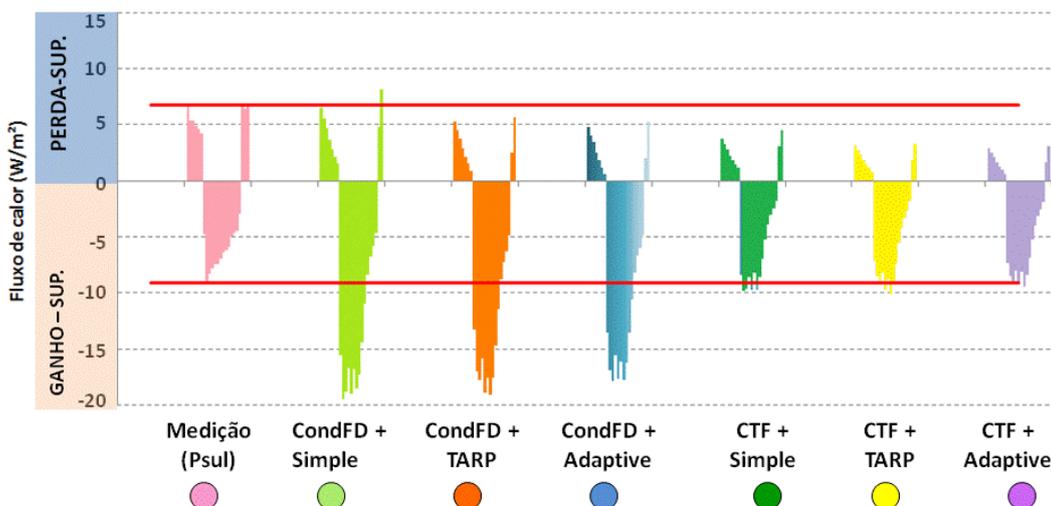


Figura 9 - Fluxos de calor na superfície interna da parede sul, medidos e simulados segundo combinações de algoritmos distintas (dia 25/01)

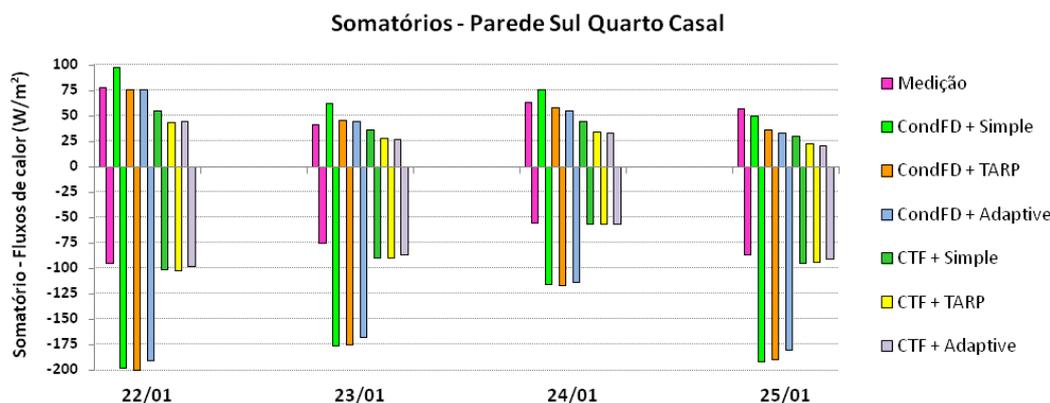


Figura 10 - Somatórios diários dos fluxos de calor na parede sul

A Figura 11 ilustra o balanço térmico da parede leste. As simulações com o algoritmo CondFD superestimaram as medições, em até 2,5 vezes para as perdas de calor (fluxos positivos) e em 4,4 vezes para os ganhos de calor pela superfície da parede (fluxos negativos). As simulações com o algoritmo CTF apresentaram resultados equivalentes às medições quanto aos ganhos de calor, enquanto as perdas foram subestimadas em até 38%.

Os somatórios diários dos fluxos de calor (Figura 12) salientam as diferenças entre os algoritmos de

condução. As simulações realizadas com o algoritmo CondFD apresentaram os maiores desvios, superestimando os ganhos de calor (fluxos negativos) em até 6,8 vezes, e em até 4 vezes as perdas de calor (fluxos positivos). Já nas simulações com o algoritmo CTF os ganhos de calor foram superestimados em até 79%, e as perdas de calor foram subestimadas em até 47%. Observou-se também que os resultados obtidos com os três algoritmos de convecção foram semelhantes, quando combinados ao mesmo algoritmo de condução (CondFD ou CTF).

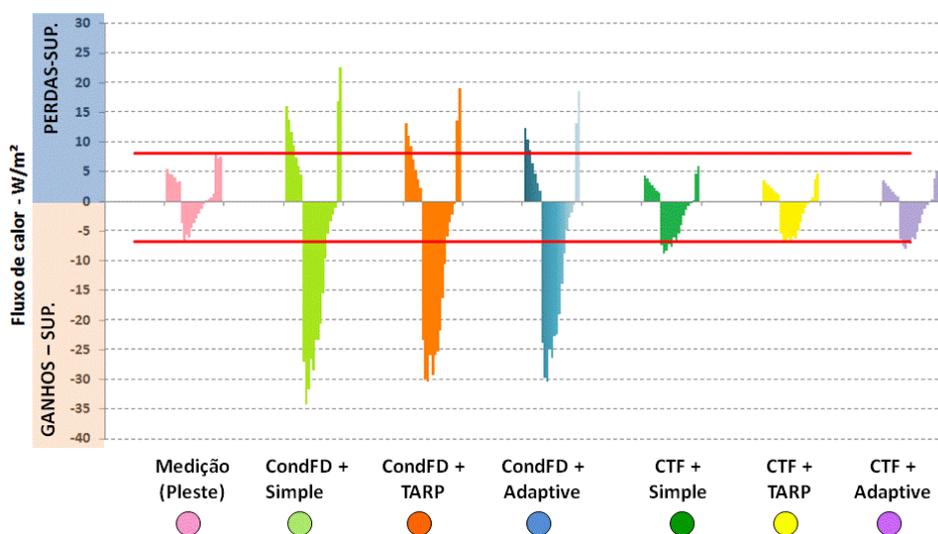


Figura 11 - Fluxos de calor na superfície interna da parede leste, medidos e simulados para combinações de algoritmos distintas (dia 25/01)

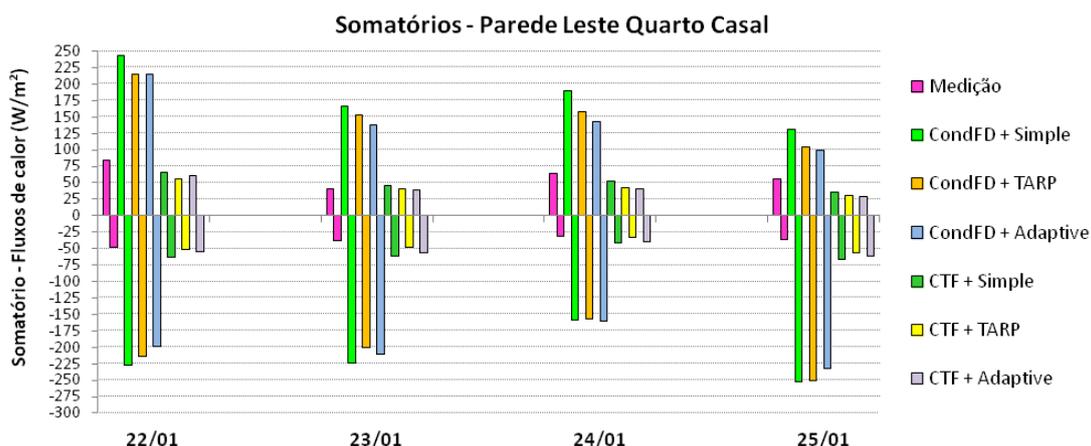


Figura 12 - Somatórios diários dos fluxos de calor na parede leste

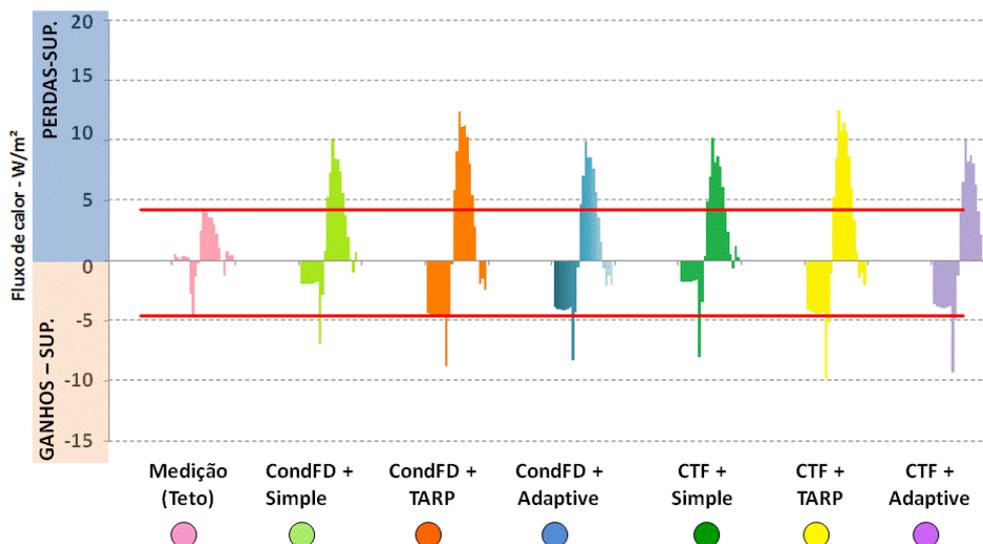


Figura 13 - Balanço térmico na superfície interna do teto (dia 25/01)

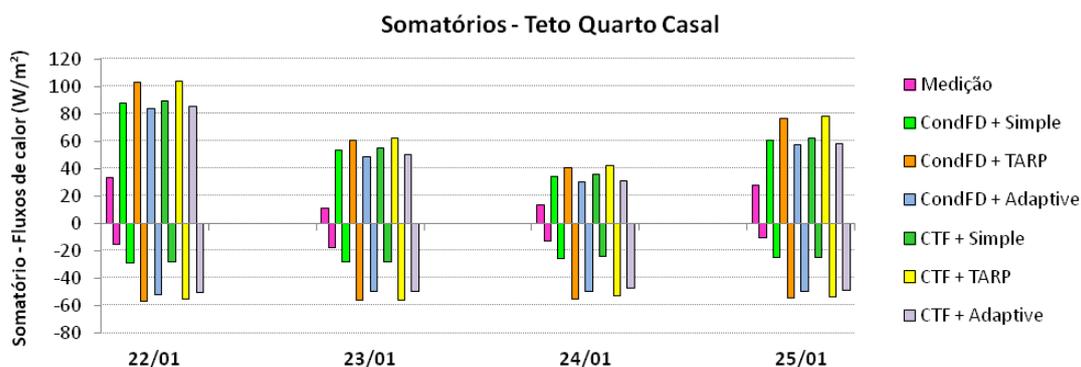


Figura 14 - Somatórios diários dos fluxos de calor no teto

O balanço térmico do teto é apresentado na Figura 13. Em todas as simulações, as perdas de calor (fluxos positivos) foram superestimadas em até 5 vezes. Os ganhos de calor pela superfície (fluxos negativos) foram superestimados em relação aos valores medidos, principalmente quando do uso dos algoritmos TARP e *Adaptive*. Igualmente, todos os somatórios dos ganhos e perdas de calor foram superestimados (Figura 14), destacando-se as simulações com o algoritmo *Simple*, cujos ganhos de calor (fluxos negativos) apresentaram os menores desvios, que superestimaram em 60% as medições. Ambos os algoritmos TARP e *Adaptive* apresentaram resultados semelhantes quanto aos ganhos de calor: até 5 vezes maiores do que os valores medidos. Quanto às perdas (fluxos positivos), os resultados foram até 5 vezes maiores que os valores medidos, sendo que os algoritmos *Simple* e *Adaptive* apresentaram resultados semelhantes entre si.

Convém salientar que a cobertura desse ambiente possui telha cerâmica, cujo comportamento

térmico sofre a influência da condensação no período noturno, sendo o teor de umidade acumulada no material é reduzido paulatinamente pela evaporação no período diurno. Entretanto, os processos de condensação e evaporação não são contabilizados pelo software. Portanto, não é possível identificar qual o algoritmo de condução mais apropriado para as simulações. Quanto à convecção, o emprego do algoritmo *Simple* resultou em desvios menores quando comparados aos resultados dos demais algoritmos, principalmente com relação aos ganhos de calor.

A análise do balanço térmico foi finalizada com o piso da sala de jantar. Embora os dados das medições não sejam originados no ambiente simulado, observa-se que as simulações desenvolvidas com ambos os algoritmos de condução apresentaram resultados semelhantes, superestimando as perdas de calor em até 3 vezes (Figura 15). Quanto aos ganhos (fluxos negativos), os resultados foram subestimados em até 90% com o emprego combinado dos algoritmos CTF e

Adaptive. Os somatórios dos ganhos e perdas de calor (Figura 16) indicam que os resultados correspondentes ao algoritmo *Simple* superestimam as perdas de calor (fluxos positivos), em maior proporção do que os outros algoritmos. Com base na análise dos dados do piso, não se identifica qual a opção de algoritmo mais indicada para a simulação da condução, mas pode-se afirmar que os algoritmos de convecção TARP e *Adaptive* apresentaram menores desvios em relação às medições adotadas como referência.

Com base no balanço térmico das superfícies monitoradas, verifica-se que o uso do algoritmo CTF apresentou os melhores resultados com relação às paredes. No teto e no piso não foi possível identificar qual a melhor opção para o cálculo da condução. Portanto, o algoritmo CTF foi selecionado para as simulações do modelo-base final.

Quanto à convecção, observou-se que o uso do algoritmo *Simple* apresentou os menores desvios em relação às medições na parede sul, quando

combinado ao algoritmo CTF. Já na parede leste e no piso, foram identificadas duas opções de algoritmos com resultados semelhantes em cada caso: *Simple* ou TARP (parede leste) e TARP ou *Adaptive* (piso). Por fim, com relação ao teto, não foi possível identificar a melhor opção de algoritmo de convecção. Assim sendo, sugere-se o emprego individualizado dos coeficientes de convecção para cada superfície, simulando-se as alternativas mencionadas para as paredes e o piso, combinadas aos algoritmos *Simple*, TARP e *Adaptive* para o teto. Desse modo, foram simulados outros oito modelos, e os resultados foram avaliados utilizando-se os seguintes parâmetros:

- (a) os desvios médios e erros quadráticos verificados em relação às temperaturas superficiais internas e temperatura do ar no interior do ambiente; e
- (b) os somatórios de graus-hora de resfriamento verificados nas simulações, comparando-os aos resultados da medição.

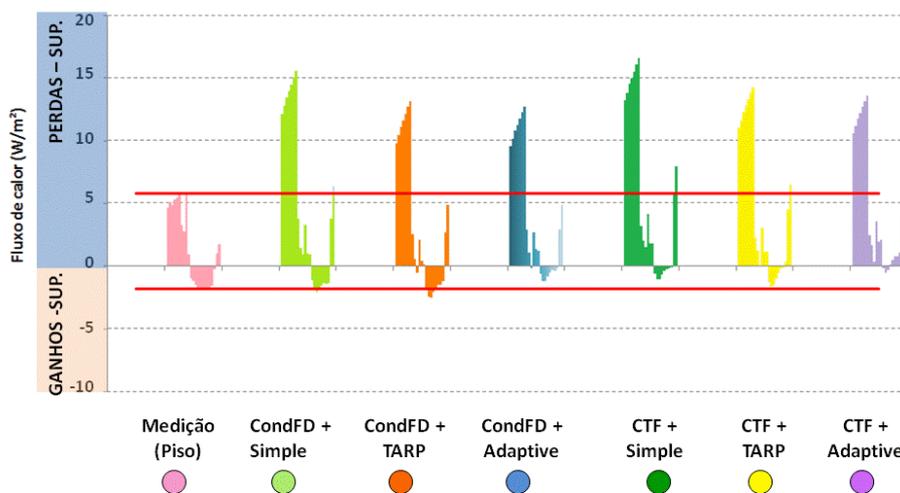


Figura 15 - Balanço térmico na superfície interna do piso da sala (dia 25/01)

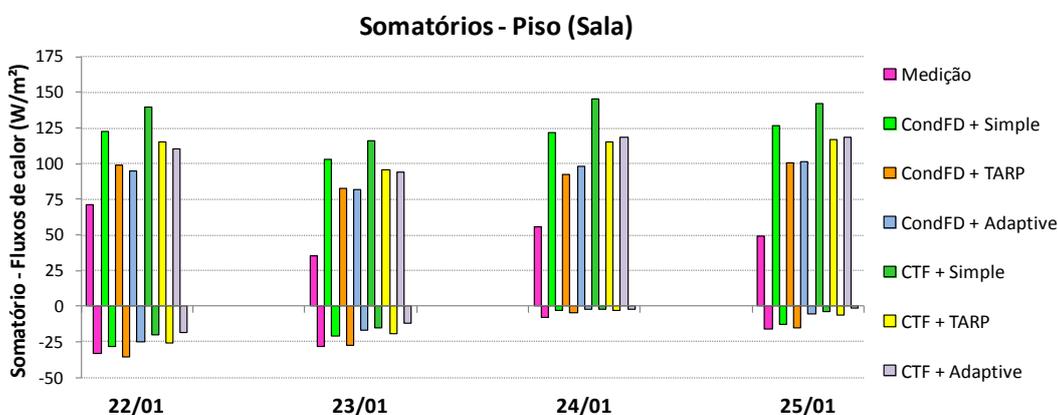


Figura 16 - Somatórios diários dos fluxos de calor no piso da sala

Temperaturas superficiais e do ar interno e somatório de graus-hora de resfriamento

A comparação entre os resultados das simulações e as temperaturas superficiais e temperaturas do ar medidas *in loco* encontram-se ilustrados nas Figuras 17 e 18.

Essas simulações foram desenvolvidas com o algoritmo de condução CTF. Na Figura 18, são apresentados dois conjuntos de resultados:

- (a) relativo à medição efetuada com o Hobo posicionado no centro do ambiente; e
- (b) correspondente à temperatura média do ar interno, calculada a partir das temperaturas registradas pelo Hobo central e pelos termopares nos pontos de medição das paredes sul e leste e no teto.

Os resultados correspondentes às temperaturas superficiais (Figura 17) indicam que a alternativa que emprega o algoritmo *Simple* para o cálculo da convecção em todas as superfícies resultou nos menores desvios, embora com pouca distinção em

relação aos demais modelos. Os menores erros quadráticos obtidos para as temperaturas superficiais foram iguais a 1,1, 0,5 e 2,8, respectivamente para teto, parede sul e parede leste. No caso das temperaturas do ar, os Modelos CTF + TARP e CTF + ADAPTIVE apresentaram o maior desvio (aproximadamente 0,8 °C), enquanto os desvios correspondentes aos demais modelos foram semelhantes e inferiores a 0,6 °C). Também nesse caso o modelo CTF mais *Simple* apresentou os menores desvios.

Observando-se os somatórios de graus-hora de resfriamento, ilustrados na Figura 19, as distinções entre os resultados das simulações tornam-se acentuadas. Todas as simulações superestimaram o somatório calculado a partir da medição *in loco*, calculado em função da temperatura média interna, para uma temperatura-base igual a 26 °C. Entretanto, a combinação de algoritmos *Simple* (paredes) + *Adaptive* (teto e piso), resultou em um somatório igual a 12,1 °C, o menor desvio em relação ao valor obtido durante o monitoramento *in loco*, igual a 8,4 °C.

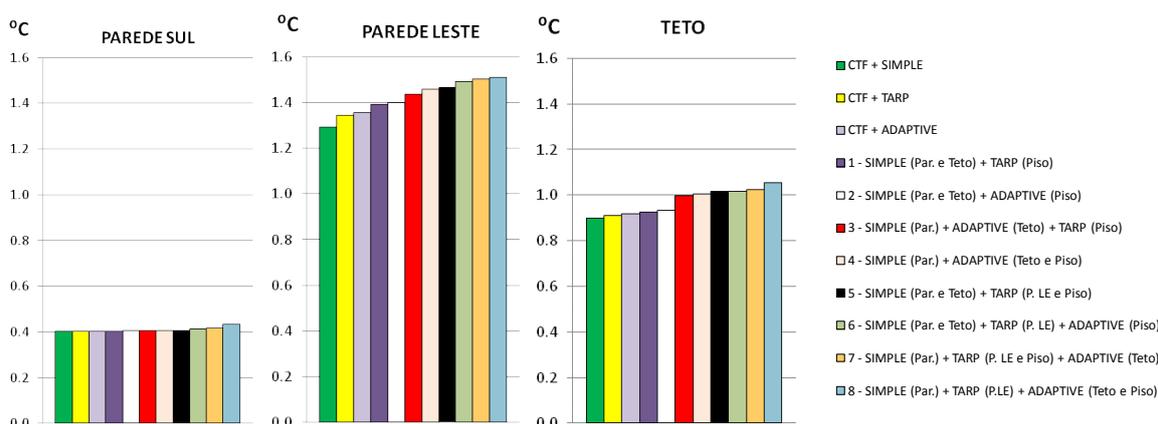


Figura 17 - Desvios médios relativos às temperaturas superficiais internas (período: 22 a 25/01)

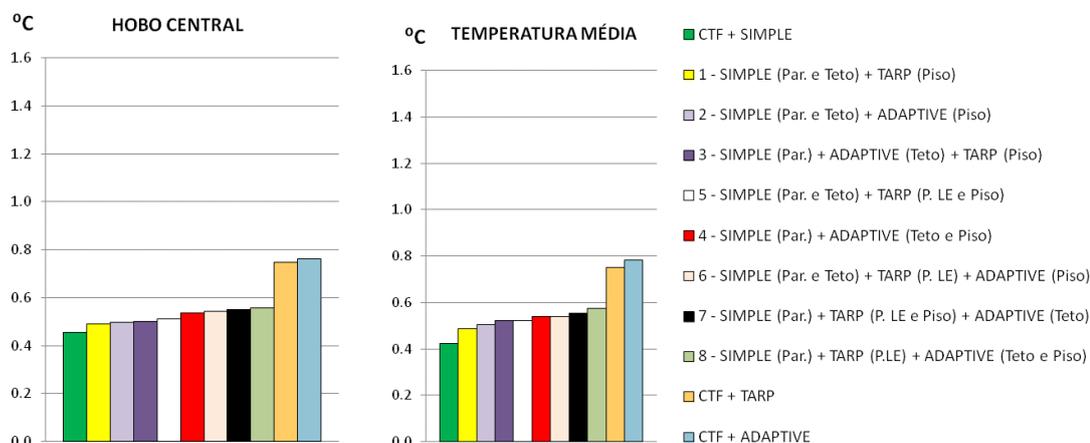


Figura 18 - Desvios médios relativos às temperaturas do ar interno (período: 22 a 25/01)

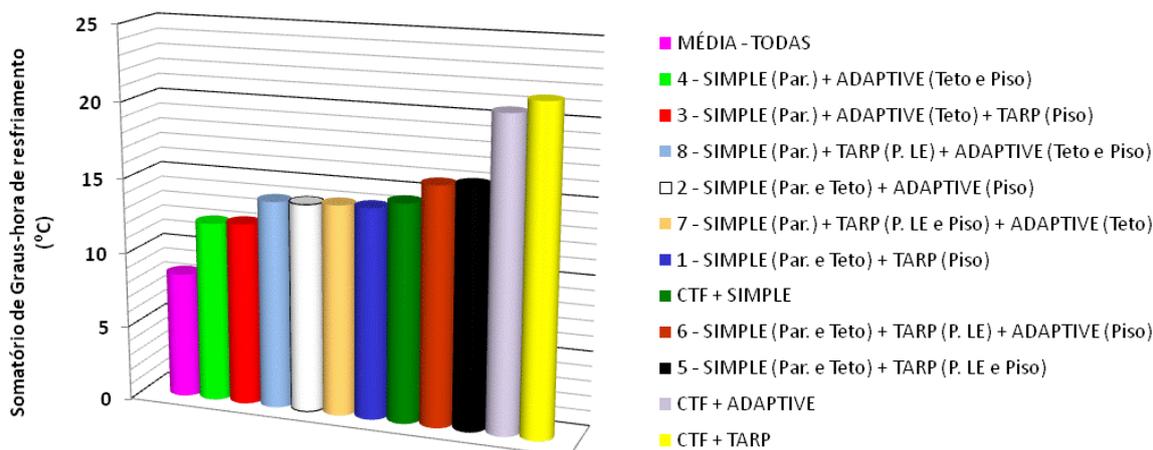


Figura 19 - Somatórios de graus-hora de resfriamento, simulações com algoritmo CTF (período: 22 a 25/01)

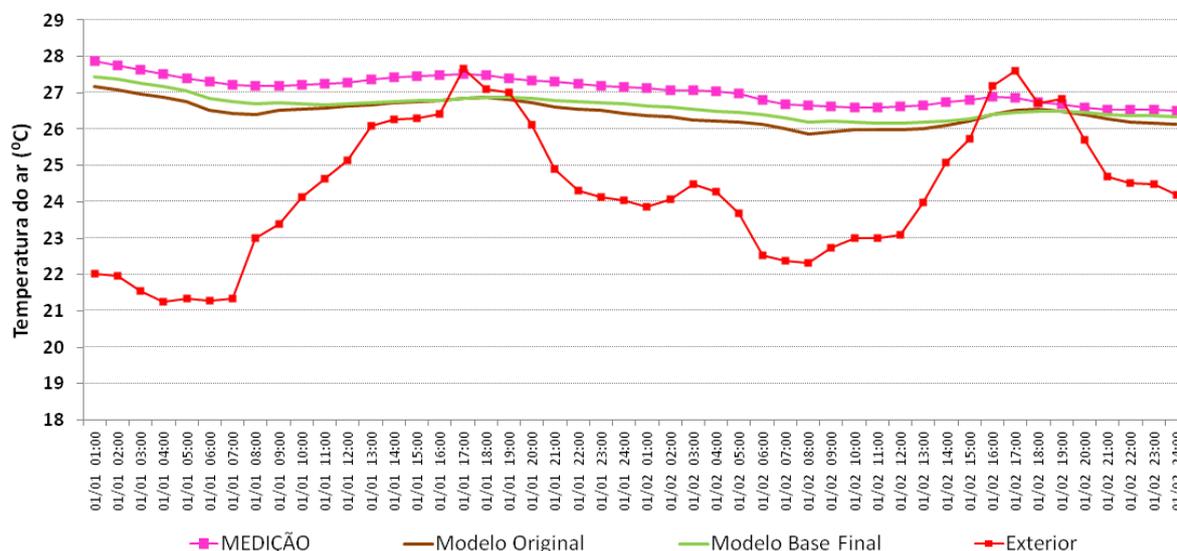


Figura 20 - Temperaturas do ar medidas e simuladas: dias 1º e 2 de janeiro

A distinção nos somatórios de graus-hora de resfriamento simulados evidencia a importância da escolha da combinação dos algoritmos de convecção, pois se observa uma variação de até 78% entre os resultados simulados. De acordo com os resultados obtidos, a combinação de algoritmos *Simple* (paredes) + *Adaptive* (teto e piso) foi selecionada para as simulações do modelo-base final, adotando-se o algoritmo CTF para o cálculo da condução.

Comparação entre o modelo-base inicial e o modelo-base final

O modelo-base final foi simulado para os mesmos períodos correspondentes às simulações realizadas durante a análise de sensibilidade (ver Análise de sensibilidade: definição do modelo-base inicial), portanto, sob diferentes condições de ventilação natural, empregando-se ou não a ventilação mecânica noturna.

As Figuras 20 a 23 ilustram as temperaturas do ar externo e as temperaturas internas, medidas e simuladas com o modelo original e com o modelo-base final, nos quatro períodos de análise.

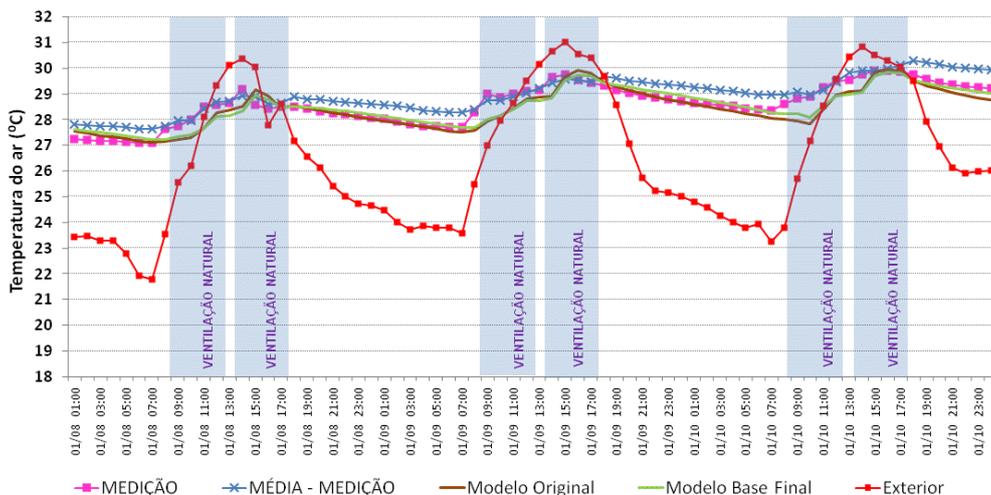


Figura 21 - Temperaturas do ar medidas e simuladas: dias 8 a 10 de janeiro

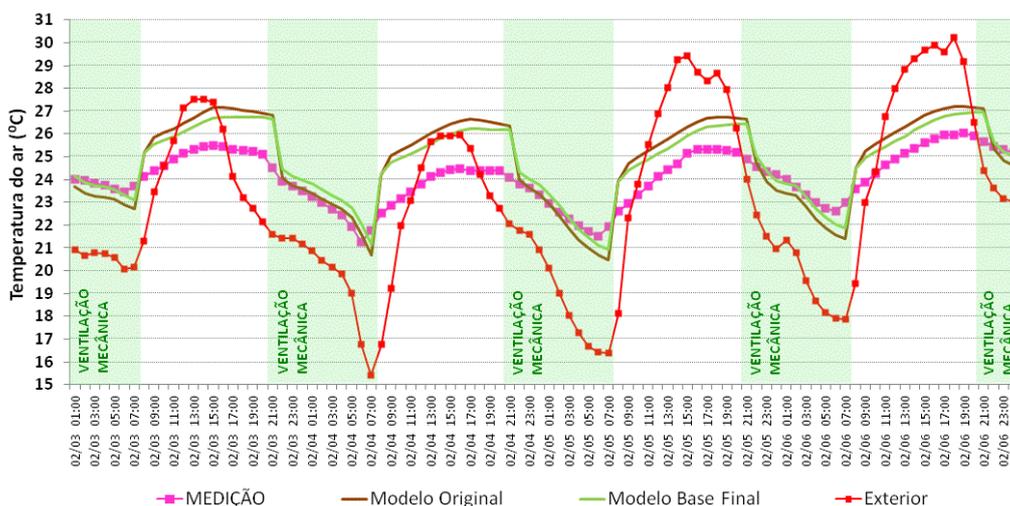


Figura 22 - Temperaturas do ar medidas e simuladas: dias 3 a 6 de fevereiro

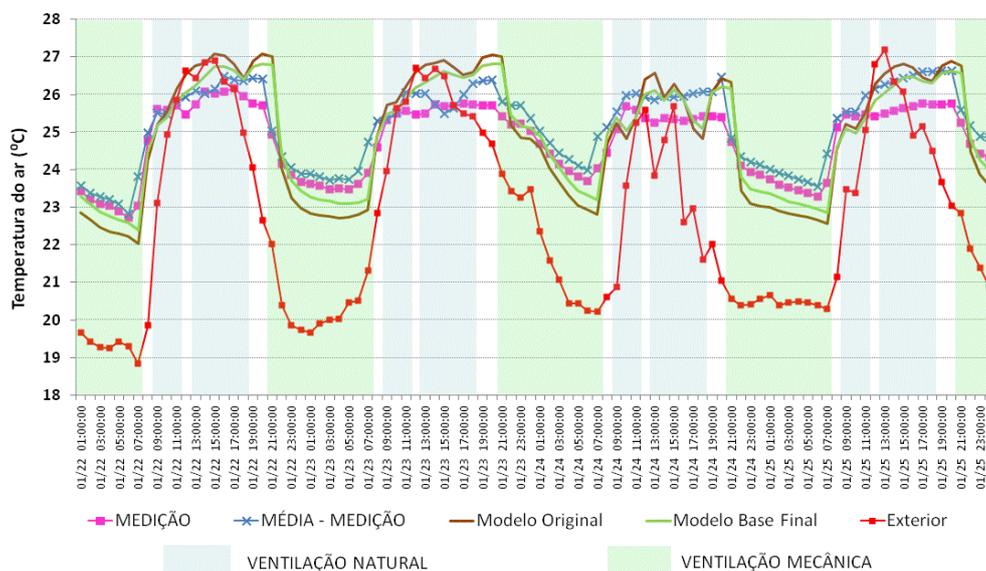


Figura 23 - Temperaturas do ar medidas e simuladas: dias 22 a 25/01

Tabela 5 - Resultados das simulações: modelo original x modelo-base final

No.	Período/descrição	Modelo original			Modelo-base final			$\Sigma^{\circ}\text{h (R)}$ MEDIDO
		D.M.	E.Q.	$\Sigma^{\circ}\text{h(R)}$	D.M.	E.Q.	$\Sigma^{\circ}\text{h(R)}$	
01 e 02/01								
1	Sem ventilação (natural e mecânica)	0,6	0,6	21,8	0,4	0,5	29,7	51,0
08 a 10/01								
2	Ventilação natural diurna (9h-12h e 14h-17h)	0,3	0,4	174,7	0,3	0,4	180,5	188,7*
03 a 06/02								
3	Ventilação mecânica (21h-7h)	1,1	1,3	26,4	0,9	1,0	14,9	0,0
22 a 25/01								
4	Ventilação natural diurna (9h-11h e 13h-18h) Ventilação mecânica (21h-7h)	0,8	0,9	25,3	0,5	0,6	15,5	0,3**

Nota: * e ** Valores correspondentes à temperatura média interna (medições em 4 pontos distintos):

* $\Sigma^{\circ}\text{h (R)}$ = 215,5 °C.

** $\Sigma^{\circ}\text{h (R)}$ = 8,4 °C.

Na Tabela 5 são apresentados os valores dos desvios médios (D.M.) e erros quadráticos (E.Q.) das temperaturas simuladas, e também os somatórios de graus-hora de resfriamento, $\Sigma^{\circ}\text{h (R)}$, para o modelo original e o modelo-base final. Todos os dados utilizados nessas comparações correspondem à temperatura do ar registrada pelo Hobo central no interior do ambiente. Apenas nos períodos assinalados com os números 2 e 4 há registros das temperaturas do ar medidas junto às paredes e teto, o que possibilitou calcular a temperatura média do ar interno nesses casos.

Comparando-se os resultados das simulações, observa-se que a substituição do algoritmo TARP, utilizado nas simulações dos modelos originais, pela combinação de algoritmos *Simple* (paredes) e *Adaptive* (teto e piso), adotados no modelo final, levou à redução dos desvios da temperatura do ar. Nas simulações originais, os desvios variam entre 0,3 °C a 1,1 °C. Com o modelo-base final, os desvios variam entre 0,3 °C a 0,9 °C. Considerando-se que a resolução do sensor utilizado para a medição da temperatura do ar interno (Hobo U12) é igual a $\pm 0,35$ °C, o processo de calibração do modelo computacional é considerado bem-sucedido.

Além disso, as diferenças dos somatórios de graus-hora de resfriamento das novas simulações, em relação às medições, foram reduzidas em relação às simulações originais. Desse modo, o modelo-base final se presta à análise do desempenho térmico do ambiente em questão sob diferentes condições de ventilação, natural ou mecânica.

Conclusões

A análise do balanço térmico das superfícies internas possibilitou a seleção acurada da combinação de algoritmos para a solução da condução e convecção utilizada nas simulações do ambiente em estudo, reduzindo-se os desvios dos resultados em relação às medições *in loco*, sob diferentes condições de ventilação.

Convém destacar que a calibração de simulações computacionais envolve diversos outros parâmetros que não estão inclusos no escopo deste trabalho, a exemplo da modelagem da convecção forçada, ainda não incorporada na simulação da ventilação natural a partir do modelo de rede.

Contudo, os resultados ora apresentados demonstram o impacto que a seleção dos algoritmos de condução e convecção produz nos resultados das simulações e ressaltam a importância da calibração dos modelos computacionais utilizados na avaliação do desempenho térmico de edificações.

Referências bibliográficas

- ALLARD, F.; ALVAREZ, S. Fundamentals of Natural Ventilation. In: ALLARD, F. (Ed.). **Natural Ventilation in Buildings: a design handbook**. London: James & James Science Publishers, 1998. p. 9-62.
- ASHRAE. **1985 ASHRAE Handbook: fundamentals**. American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, 1985.

- BEAUSOLEIL-MORRISON, I. **The Adaptive Coupling of Heat and Air Flow Modelling Within Dynamic Whole-Building Simulation**. 241 f. Glasgow UK, 2000. PhD Thesis. Department of Mechanical Engineering, University of Strathclyde, Glasgow, UK, 2000.
- DE DEAR, R.; BRAGER, G. S. Thermal Comfort in Naturally Ventilated Buildings: revisions to ASRHAE Standard 55. **Energy and Buildings**, v. 34, n. 6, p. 549-561, jul. 2002.
- ENERGYPLUS. **Engineering Manual**. Disponível em: <www.energyplus.gov>. Acesso em: 20 jun. 2011.
- FINN, D. P.; CONNOLLY, D.; KENNY, P. Sensitivity Analysis of a Maritime Located Night Ventilated Library Building. **Solar Energy**, v. 81, n. 6, p. 697-710, jun. 2007.
- GEROS, V. *et al.* Experimental Evaluation of Night Ventilation Phenomena. **Energy and Buildings**, v. 29, n. 2, p. 141-154, 1999.
- GHIAUS, C.; ALLARD, F. Potential for Free-Cooling by Ventilation. **Solar Energy**, v. 80, n. 4, p. 402-413, 2006.
- GU, L. Airflow Network Modeling in EnergyPlus. In: BUILDING SIMULATION, 10., Beijing, 2007. **Proceedings...** IBPSA: Beijing, 2007.
- IU, I.; FISHER, D. Application of Conduction Transfer Functions and Periodic Response Factors in Cooling Load Calculation Procedures. **ASHRAE Transactions**, v. 110, n. 2, p. 829-841, 2004.
- LIDDAMENT, M. W. **Air Infiltration Calculation Techniques**: an applications guide: AIVC. Bracknell, UK, 1986.
- PEDRINI, A. **Desenvolvimento de Metodologia de Calibração de Modelos para Simulações Térmica e Energética de Edificações**. 191 f. Florianópolis, 1997. 191 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1997.
- PEREIRA, C. D. **A Influência do Envelope no Desempenho Térmico de Edificações Residenciais Unifamiliares Ocupadas e Ventiladas Naturalmente**. 2009. 140 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.
- PFAFFEROTT, J.; HERKEL, S.; JÄSCHKE, M. Design of Passive Cooling by Night Ventilation: evaluation of a parametric model and building simulation with measurements. **Energy and Buildings**, v. 35, n. 11, p. 1129-1143, dez. 2003.
- SANTAMOURIS, M. Prediction Methods. In: ALLARD, F. (Ed.). **Natural Ventilation in Buildings**: a design handbook. London: James & James Science Publishers, 1998. p. 63-158.
- UNITED STADE OF AMERICA. Department of Energy. **EnergyPlus Energy Simulation Software**: about EnergyPlus. Disponível em: <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/energyplus_about.cfm>. Acesso em: 5 jul. 2011.
- WALTON, G. N. **Thermal Analysis Research Program Reference Manual**. National Bureau of Standards, NBSSIR 83-2655, 1983.
- WESTPHAL, F. S. **Análise de Incertezas e de Sensibilidade Aplicadas à Simulação de Desempenho Energético de Edificações Comerciais**. 147 f. Florianópolis, 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.
- YANG, L.; LI, Y. Cooling Load Reduction by Using Thermal Mass and Night Ventilation. **Energy and Buildings**, v. 40, n. 11, p. 2052-2058, 2008.