



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA**  
**CIVIL – PPGEC**  
**DOUTORADO EM ENGENHARIA CIVIL**  
**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: CONSTRUÇÃO CIVIL**  
**LINHA DE PESQUISA: CONFORTO AMBIENTAL E ENERGIA**

**EFICÁCIA DA VENTILAÇÃO MECÂNICA NOTURNA PARA**  
**RESFRIAMENTO: IMPACTO DE ESTRATÉGIAS HÍBRIDAS**  
**DE VENTILAÇÃO NO DESEMPENHO TÉRMICO DE**  
**RESIDÊNCIA EM FLORIANÓPOLIS-SC**

**JULIANA OLIVEIRA BATISTA**

**Florianópolis**

**2011**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA  
CIVIL – PPGEC  
DOUTORADO EM ENGENHARIA CIVIL  
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: CONSTRUÇÃO CIVIL  
LINHA DE PESQUISA: CONFORTO AMBIENTAL E ENERGIA**

**Juliana Oliveira Batista**

**EFICÁCIA DA VENTILAÇÃO MECÂNICA NOTURNA PARA  
RESFRIAMENTO: IMPACTO DE ESTRATÉGIAS HÍBRIDAS  
DE VENTILAÇÃO NO DESEMPENHO TÉRMICO DE  
RESIDÊNCIA EM FLORIANÓPOLIS-SC**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Civil

Orientador: Prof. Roberto Lamberts, PhD

**Florianópolis**

**2011**

Catálogo na fonte pela Biblioteca Universitária da  
Universidade Federal de Santa Catarina

B333e Batista, Juliana Oliveira  
Eficácia da ventilação mecânica noturna para resfriamento  
[tese] : impacto de estratégias híbridas de ventilação no desempenho térmico  
de residência em Florianópolis-SC / Juliana Oliveira Batista ;  
orientador, Roberto Lamberts. –  
Florianópolis, SC, 2011.  
286 p. : il., grafs., tabs.  
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa  
Catarina,  
Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil.

Inclui referências

1. Engenharia civil. 2. Ventilação. 3. Inércia térmica.  
4. Habitações. I. Lamberts, Roberto. II. Universidade  
Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil. III. Título.

CDU 624

**Juliana Oliveira Batista**

**EFICÁCIA DA VENTILAÇÃO MECÂNICA NOTURNA PARA  
RESFRIAMENTO: IMPACTO DE ESTRATÉGIAS HÍBRIDAS  
DE VENTILAÇÃO NO DESEMPENHO TÉRMICO DE  
RESIDÊNCIA EM FLORIANÓPOLIS-SC**

Esta Tese foi julgada adequada para a obtenção do Título de DOUTOR em Engenharia Civil e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGEC da Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC.

Florianópolis, x de xxxxx de xxxx.

Prof. Roberto Caldas Pinto de Andrade, Dr.  
Coordenador do PPGEC

Prof. Roberto Lamberts, PhD  
Orientador e Moderador

**Banca Examinadora:**

Prof. Fernando Oscar Ruttkay Pereira PhD. – ARQ/UFSC

Prof. EneDir Ghisi, PhD. – ECV/UFSC

Prof. Saulo Güths, PhD. – EMC/UFSC

Prof. Dr. Leopoldo Eurico Gonçalves Bastos – UFRJ

Prof. Dr. Maurício Roriz – UFSCAR



*À minha família e amigos, pelo carinho e  
paciência ao longo do último ano.*



## AGRADECIMENTOS

---

Agradeço acima de tudo a Deus, que me deu forças para superar minhas dificuldades e concluir esta importante etapa.

Ao professor Roberto Lamberts, pelo apoio e incentivo, nas diversas fases do doutorado. Obrigada pela confiança, pela paciência e pelas oportunidades de aprendizagem proporcionadas durante a minha permanência em Florianópolis. Obrigada sobretudo pela atenção e colaboração nas longas e decisivas orientações à distância.

Aos meus queridos amigos do LabEEE, pelas diversas colaborações e “ajudinhas” solicitadas ao vivo e virtualmente, em especial ao Marcio Sorgato, Rogério Versage e Deivis Marinoski. À Claudia Pereira, por ceder o modelo computacional da Casa Eficiente, generosa contribuição que foi fundamental para o desenvolvimento deste trabalho.

À Joyce Carlo e ao Ítalo Guimarães (UFV), pelas orientações quanto ao arquivo climático.

A todos os profissionais que se empenharam pelo sucesso do projeto LMBEE/Casa Eficiente e que colaboraram, direta ou indiretamente, para a realização deste trabalho: Sylvio Mantelli, professor Saulo Güths e equipe do LMPT/UFSC e companheiros de pesquisa na Casa Eficiente durante os anos de 2006 a 2008: Vinicius Rocha, Marcio Andrade, Rosana Debiasi, Ana Kelly Marinoski, Cláudia Pereira e Sérgio Parizotto.

À engenheira Karine Christiane Cunha de Souza, pela colaboração com os experimentos desenvolvidos na Casa Eficiente;

Aos professores Enedir Ghisi, Fernando Pereira, Saulo Güths e Leopoldo Gonçalves, pelas contribuições apresentadas na qualificação desta tese, fundamentais para a sua conclusão. Ao professor Maurício Roriz, pelas contribuições a esta tese e também em outros momentos da minha carreira acadêmica.

À direção da FAU/UFAL, pela oportunidade de afastamento das atividades didáticas, fundamental para dar início à fase de redação da tese.

Aos amigos sempre dispostos a contribuir, estejam ao meu lado ou a quilômetros de distância: Leonardo Bittencourt, Gianna Barbirato, Evelise Didoné, Solange Goulart, Isabela Passos, Elizabeth Duarte, Lívia Melo e Gabriela Morais. À Andrea Triana, por não me deixar desanimar nos momentos difíceis, lembrando-me sempre que há coisas boas por vir.

À Eletrosul e à Eletrobras, pela bolsa de estudos concedida para o gerenciamento das atividades do LMBEE/Casa Eficiente.

Este trabalho avalia o potencial da ventilação mecânica noturna como estratégia de resfriamento para um ambiente residencial durante o verão, quando associada a configurações construtivas com baixa e média inércia e diferentes padrões de ventilação natural no período diurno. Como objeto de estudo utilizou-se a Casa Eficiente, uma residência experimental localizada em Florianópolis-SC, monitorada entre os meses de dezembro de 2007 a abril de 2008. Simulações computacionais desenvolvidas com o *software* EnergyPlus v. 6.0 foram calibradas com base nos dados do monitoramento efetuado no quarto de casal, avaliando-se a influência dos algoritmos de condução e convecção nos resultados. Os somatórios de graus-hora de resfriamento calculados para o ambiente em estudo no período de 22/01 a 25/01/2008 (temperatura base = 26<sup>o</sup>C) apresentaram uma variação de até 78%, dependendo da combinação de algoritmos empregada. Uma vez calibrado, o modelo foi utilizado na análise do desempenho da ventilação mecânica noturna. Os critérios de avaliação foram os somatórios de graus-hora de resfriamento e os percentuais de horas de desconforto, verificados em diferentes horários do dia, sob diferentes padrões de ventilação diurna. Foram quantificados os balanços térmicos internos correspondentes a esses horários, caracterizando-se o comportamento dos componentes da envoltória quanto aos ganhos e perdas de calor. Em função dos diferentes padrões de ventilação simulados, combinados a duas configurações construtivas (inércia baixa e inércia média), foram observadas diferenças de 15% a 290% nos somatórios de graus-hora de resfriamento. Os resultados demonstraram os benefícios do emprego da ventilação mecânica noturna, que reduziu a temperatura do ar, incrementando as perdas de calor pela envoltória durante a madrugada. Observou-se também que a admissão da ventilação durante a tarde diminuiu o efeito de amortecimento das temperaturas internas. Este estudo possibilitou caracterizar a dinâmica do comportamento térmico de um ambiente residencial, quantificando o seu desempenho em diferentes períodos do dia, a fim de indicar alternativas para compatibilizar o uso de estratégias híbridas de ventilação aos padrões de ocupação, de acordo com o nível de inércia térmica.

**Palavras-chave:** Ventilação mecânica noturna, ventilação natural, inércia térmica, residência.



This work investigates the potential of mechanical night ventilation as a cooling technique for a residential room during summer, when associated to low-inertia and medium-inertia building envelopes, under different daytime ventilation patterns. Field experiments were carried out in the Casa Eficiente, an experimental dwelling located in Florianópolis-SC, from December 2007 to April 2008. EnergyPlus 6.0 simulations were calibrated against field data measured in the master bedroom, analyzing the influence of conduction and convection algorithms in the simulation results. It was observed a variation up to 78% in cooling degree hours of the bedroom (period: 22/01 to 25/01/2008, base temperature = 26 °C), depending on algorithms combination. After calibration, the model was used for simulations of mechanical night ventilation performance. The cooling degree-hours and the percentage of discomfort hours were established as evaluation criteria, for different times of day, under different daytime ventilation patterns. It were quantified the corresponding heat balances to the bedroom, analyzing heat gains and losses related to each building component. The differences in cooling degree-hours ranged from 15% to 290%, depending on ventilation patterns simulated and envelope features (low-inertia or medium-inertia). The results demonstrated the benefits of mechanical night ventilation use, which reduced air temperature and improved thermal losses by building envelope at early morning. Also, it was observed that daytime ventilation reduced the effect of lowering internal peak temperatures when applied during afternoon. From this study, it was possible characterizing the dynamic of thermal behaviour of a residential room, quantifying its performance at different intervals of the day, leading to recommendations to suit hybrid ventilation strategies to the occupation patterns, according to the room inertia level.

**Key-words:** Mechanical night ventilation, daytime natural ventilation, thermal inertia, dwellings.



## LISTA DE FIGURAS

---

Figura 2.1 – Temperaturas e umidades relativas do ar em Florianópolis. ....	38
Figura 2.2 – Regime de ventos em Florianópolis. ....	39
Figura 2.3 – Carta bioclimática de Givoni (1992) e percentuais de horas correspondentes a cada estratégia de condicionamento térmico para Florianópolis. ....	40
Figura 2.4 – Zoneamento bioclimático brasileiro. ....	41
Figura 2.5 – Carta bioclimática da NBR 15220-3 e dados climáticos do arquivo TRY de Florianópolis. ....	43
Figura 2.6 – Temperaturas médias e máximas horárias nos meses mais quentes do ano em Florianópolis. Fonte: Arquivo TRY de Florianópolis (LabEEE, 2010). ....	45
Figura 2.7 – Localização da residência monitorada. ....	47
Figura 2.8 – Vista externa da Casa Eficiente (fachada Norte). ....	47
Figura 2.9 – Fachadas dos quartos de solteiro e de casal (orientação das janelas: Leste). ....	48
Figura 2.10 – Telhas cerâmicas (quarto de casal) e teto-jardim (quarto de solteiro). ....	49
Figura 2.11 – Planta baixa da edificação, indicando-se a incidência dos ventos predominantes. ....	49
Figura 2.12 – Vista interna da Casa Eficiente (sala de estar). ....	50
Figura 2.13 – Insuflador de ar posicionado no quarto de casal. ....	50
Figura 2.14 – Insuflador de ar posicionado no quarto de solteiro. ....	50
Figura 2.15 – Insuflador de ar posicionado no quarto de casal. ....	51
Figura 2.16 – Insuflador de ar posicionado no quarto de solteiro. ....	52
Figura 2.17 – Esquema de funcionamento dos insufladores de ar (quarto de solteiro). ....	53
Figura 4.1 – Planta baixa e cortes do ambiente estudado: quarto de casal. ....	96
Figura 4.2 – Estação meteorológica LMBEE/Casa Eficiente. ....	97
Figura 4.3 – Sensor HOBO posicionado no quarto de casal. ....	97

Figura 4.4 – Fluxímetro (a) e termopares (b) posicionados na parede Leste do quarto de casal. ....	98
Figura 4.5 – Posicionamento dos fluxímetros no interior do quarto de casal.....	98
Figura 4.6 – Esquema representativo dos fluxos de calor nas superfícies internas.....	99
Figura 4.7 – Corte transversal da Casa Eficiente, indicando a localização do fluxímetro instalado no piso da sala de jantar. ....	99
Figura 4.8 – ACCUBALANCE® Plus. ....	100
Figura 4.9 – Recursos utilizados para medição da intensidade dos fluxos de ar no interior dos quartos: (a) e (b) termo-anemômetros; (c) bastão de incenso. ....	101
Figura 4.10 – Pontos de medição da velocidade do ar no interior do quarto de casal.....	101
Figura 4.11 – Pontos de referência (x) para a estimativa dos coeficientes de convecção localizada ( $h_f$ ) no interior do quarto de casal. ....	103
Figura 4.12 – Etapas do procedimento de calibração do modelo computacional.....	106
Figura 4.13 – Perspectivas do modelo computacional. Fonte: Pereira (2009).....	107
Figura 4.14 – Posicionamento dos exaustores e das aberturas de entrada de ar para ventilação mecânica noturna.....	110
Figura 4.15 – Representação da ventilação mecânica nos ambientes de acordo com o modelo de rede. ....	111
Figura 4.16 – Simulações realizadas para calibração do modelo da edificação sem ventilação mecânica. ....	113
Figura 4.18 – Simulações realizadas para calibração do modelo da edificação com ventilação mecânica noturna.....	116
Figura 4.19 – Vista do modelo computacional. ....	123
Figura 4.20 – Proteção solar da janela do quarto de casal, localizada na fachada Leste.....	123
Figura 4.21 – Máscara de sombreamento das janelas dos quartos.....	124
Figura 4.22 – Princípio da ventilação noturna: balanço de energia. ...	133
Figura 5.1 – Variação das temperaturas do ar externo e interno (23/12/2007 a 02/01/2008).....	140

Figura 5.2 – Seqüência de experimentos e temperaturas médias do ar, internas e externas: 23/12/2007 a 30/04/2008.....	142
Figura 5.3 – Dias selecionados para comparação dos experimentos sem ventilação mecânica noturna.....	145
Figura 5.4 – Amplitudes externas e amortecimentos obtidos no quarto de casal nos experimentos 1 e 2.....	146
Figura 5.5 – Comportamentos térmicos do ambiente: a) experimento 1 e b) experimento 2.....	147
Figura 5.6 – Amplitudes externas e amortecimentos obtidos no quarto de casal nos experimentos 1 e 3.....	148
Figura 5.7 – Comportamentos térmicos do ambiente: a) experimento 1 e b) experimento 3.....	149
Figura 5.8 – Dias selecionados para comparação dos experimentos com ventilação mecânica noturna.....	151
Figura 5.9 – Amplitudes externas e amortecimentos obtidos no quarto de casal nos experimentos 1 e 4.....	152
Figura 5.9 – Comportamentos térmicos do ambiente: a) experimento 1 e b) experimento 4.....	153
Figura 5.10 – Amplitudes externas e amortecimentos obtidos no quarto de casal, experimentos 1 e 6.....	155
Figura 5.11 – Comportamentos térmicos do ambiente: a) experimento 1 e b) experimento 6.....	156
Figura 5.12 – Dias selecionados para comparação dos experimentos com ventilação natural (manhã e tarde) e ventilação mecânica noturna.....	157
Figura 5.13 – Dias selecionados para comparação dos experimentos com ventilação natural (manhã) e ventilação mecânica noturna.....	158
Figura 5.14 – Amplitudes externas e amortecimentos obtidos no quarto de casal, nos experimentos 2 e 4.....	159
Figura 5.15 – Comportamentos térmicos do ambiente: a) experimento 2 e b) experimento 4.....	160
Figura 5.16 – Amplitudes externas e amortecimentos obtidos no quarto de casal, nos experimentos 3 e 6.....	161
Figura 5.17 – Comportamentos térmicos do ambiente: a) experimento 3 e b) experimento 6.....	162

Figura 5.18 – Dias selecionados para comparação do experimento sem ventilação natural: 04/02 e experimento com ventilação pela manhã: 15/02, ambos com ventilação mecânica noturna.....	164
Figura 5.19 – Dias selecionados para comparação dos experimentos com ventilação natural: 23/01 (manhã e tarde) e 26/03 (manhã), ambos com ventilação mecânica noturna.....	165
Figura 5.20 – Amplitudes externas e amortecimentos obtidos no quarto de casal nos experimentos 3 e 6.....	166
Figura 5.21 – Comportamentos térmicos do ambiente: a) experimento 5 e b) experimento 6.....	167
Figura 5.22 – Amplitudes externas e amortecimentos obtidos no quarto de casal nos experimentos 4 e 6.....	168
Figura 5.23 – Comportamentos térmicos do ambiente: a) experimento 4 e b) experimento 6.....	169
Figura 5.24 – Comportamentos térmicos do ambiente: a) experimento 4 e b) experimento 6.....	170
Figura 5.25 – Localização dos pontos de medição de fluxo de calor: paredes Sul e Leste.....	171
Figura 5.26 – Planta-baixa do quarto de casal e vista externa da Casa Eficiente (fachada Sul).....	173
Figura 5.27 – Planta-baixa do quarto de casal e vista externa da Casa Eficiente, destacando-se a fachada Leste do quarto de casal. ....	174
Figura 5.28 – Vista da fachada Norte, destacando-se a cobertura do quarto de casal.....	175
Figura 5.29 – Fluxos de calor na parede Sul.....	176
Figura 5.30 – Fluxos de calor na parede Leste .....	178
Figura 5.31 – Fluxos de calor no teto.....	179
Figura 5.32 – Temperaturas do ar medidas e simuladas (01/01 e 02/01).....	182
Figura 5.33 – Temperaturas do ar medidas e simuladas (08/01 a 10/01).....	183
Figura 5.34 – Temperaturas do ar medidas e simuladas com diferentes vazões de ar no período noturno (03/02 a 06/02).....	185
Figura 5.35 – Temperaturas do ar medidas e simuladas (03/02 a 06/02).....	185

Figura 5.36 – Temperaturas do ar medidas e simuladas (22 a 25/01). .....	187
Figura 5.37 – Taxas de renovação de ar do ambiente no período de 22/01 a 25/01.....	189
Figura 5.38 – Correlação entre os diferenciais de temperatura das superfícies em relação à temperatura do ar interno, simulados e medidos, sob o emprego da ventilação mecânica (intervalo 21h às 7h). .....	190
Figura 5.39 – Correlação entre os diferenciais de temperatura das superfícies em relação à temperatura do ar interno, simulados e medidos, sob o emprego da ventilação natural (intervalo 9h às 11h e 13h às 18h). .....	191
Figura 5.40 – Fluxos de calor na superfície interna da parede Sul (área = 20,8 m <sup>2</sup> ), medidos e simulados segundo combinações de algoritmos distintas (dia 25/01).....	194
Figura 5.41 – Somatórios diários dos fluxos de calor na parede Sul...	195
Figura 5.42 – Fluxos de calor na superfície interna da parede Leste (20 m <sup>2</sup> ), medidos e simulados para combinações de algoritmos distintas (dia 25/01).....	195
Figura 5.43 – Somatórios diários dos fluxos de calor na parede Leste. ....	196
Figura 5.44 – Balanço térmico na superfície interna do piso da sala (dia 25/01). ....	197
Figura 5.45 – Somatórios diários dos fluxos de calor no piso da sala.	197
Figura 5.46 – Desvios médios relativos às temperaturas superficiais internas (período: 22/01 a 25/01). ....	200
Figura 5.47 – Desvios médios relativos às temperaturas do ar interno (período: 22/01 a 25/01).....	201
Figura 5.48 – Somatórios de graus-hora de resfriamento, simulações com algoritmo CTF (período: 22/01 a 25/01).....	202
Figura 5.49 – Temperaturas do ar medidas e simuladas: dias 01 e 02 de janeiro. ....	203
Figura 5.50 – Temperaturas do ar medidas e simuladas: dias 08 a 10 de janeiro. ....	203
Figura 5.51 – Temperaturas do ar medidas e simuladas: dias 03 a 06 de fevereiro.....	204

Figura 5.52 – Temperaturas do ar medidas e simuladas: dias 22 a 25/01. ....	204
Figura 5.54 – Velocidades do ar no interior do ambiente (m/s).....	207
Figura 5.55 – Velocidades médias junto às paredes Sul e Leste. ....	207
Figura 5.56 – Corte transversal do quarto de casal e posicionamento dos sensores. ....	208
Figura 5.57 – Correlação entre os diferenciais de temperatura da parede Sul, medidos e simulados, sob o emprego da ventilação mecânica (intervalo 21h às 7h). ....	211
Figura 5.58 – Correlação entre os diferenciais de temperatura da parede Leste, medidos e simulados, sob o emprego da ventilação mecânica (intervalo 21h às 7h). ....	212
Figura 5.59 – Balanço térmico, modelo com inércia baixa.....	215
Figura 5.60 – Balanço térmico, modelo com inércia média.....	215
Figura 5.61 – Comportamento dos fluxos de calor no intervalo de 7h-13h, modelos ventilados à noite (10 renovações/h), (meses de dezembro a março).....	217
Figura 5.62 – Balanços térmicos do ambiente no intervalo de 7h-13h, modelos ventilados à noite (10 renovações/h), sob diferentes padrões de ventilação diurna, nos meses de dezembro a março. ....	218
Figura 5.63 – Comportamento dos fluxos de calor no intervalo de 7h-13h, modelos não ventilados à noite (meses de dezembro a março). ....	219
Figura 5.64 – Somatórios de graus-hora de resfriamento, $T_{base} = 26^{\circ}C$ (intervalo: 7h – 13h). ....	220
Figura 5.65 – Percentuais de horas de desconforto verificados no intervalo de 7h às 13h. ....	221
Figura 5.66 – Comportamento dos fluxos de calor no intervalo de 13h-18h, modelos ventilados à noite (10 renovações/h), (meses de dezembro a março).....	222
Figura 5.67 – Balanços térmicos do ambiente no intervalo de 13h-18h, modelos ventilados à noite (10 renovações/h), sob diferentes padrões de ventilação diurna, nos meses de dezembro a março. ....	223
Figura 5.68 – Somatórios de graus-hora de resfriamento, $T_{base} = 26^{\circ}C$ (intervalo: 13h – 18h). ....	224
Figura 5.69 – Percentuais de horas de desconforto verificados no intervalo de 13h às 18h. ....	225

Figura 5.70 – Comportamento dos fluxos de calor no intervalo de 18h-21h, modelos ventilados à noite (10 renovações/h), (meses de dezembro a março).....	226
Figura 5.71 – Balanços térmicos do ambiente no intervalo de 18h-21h, modelos ventilados à noite (10 renovações/h), sob diferentes padrões de ventilação diurna, nos meses de dezembro a março.....	227
Figura 5.72 – Somatórios de graus-hora de resfriamento, $T_{base} = 26^{\circ}C$ (intervalo: 18h – 21h).....	228
Figura 5.73 – Percentuais de horas de desconforto verificados no intervalo de 18h às 21h.....	229
Figura 5.74 – Comportamento dos fluxos de calor no intervalo de 21h-7h, modelos não ventilados à noite, (meses de dezembro a março). ....	230
Figura 5.75 – Balanços térmicos do ambiente no intervalo de 21h-7h, modelos não ventilados à noite, sob diferentes padrões de ventilação diurna, nos meses de dezembro a março.....	231
Figura 5.76 – Comportamento dos fluxos de calor no intervalo de 21h-7h, modelos ventilados à noite (10 renovações/h), (meses de dezembro a março). ....	232
Figura 5.77 – Balanços térmicos do ambiente no intervalo de 21h-7h, modelos ventilados à noite (10 renovações/h), sob diferentes padrões de ventilação diurna, nos meses de dezembro a março.....	232
Figura 5.78 – Somatórios de graus-hora de resfriamento, $T_{base} = 26^{\circ}C$ (intervalo: 21h – 7h).....	233
Figura 5.79 – Percentuais de horas de desconforto verificados no intervalo de 18h às 21h.....	234
Figura 5.80 – Percentuais de horas de desconforto obtidos nas simulações: limite de aceitabilidade igual a 90% (temperatura operativa de conforto igual a $27,7^{\circ}C$ ). ....	236
Figura 5.81 – Percentuais de horas de desconforto obtidos nas simulações: limite de aceitabilidade igual a 80% (temperatura operativa de conforto igual a $28,7^{\circ}C$ ). ....	237
Figura 5.82 – Somatórios de graus-hora de resfriamento obtidos nas simulações. ....	239



## LISTA DE TABELAS

---

Tabela 3.1 – Classificação da inércia do ambiente em função da massa específica ( $M_e$ ) e do Fator de Resposta (FR).....	58
Tabela 3.2 – Equações para a determinação do coeficiente de convecção, segundo o algoritmo <i>TARP</i> (EnergyPlus, 2010).....	86
Tabela 3.3 – Valores dos coeficientes de convecção, segundo o algoritmo SimN (EnergyPlus, 2010).....	86
Tabela 3.4 – Valores dos coeficientes de convecção, segundo o algoritmo CeID (EnergyPlus, 2010).....	87
Tabela 4.1 – Propriedades térmicas dos componentes construtivos.....	92
Tabela 4.2 – Propriedades térmicas utilizadas no cálculo do Fator de Resposta: Quarto de casal - Casa Eficiente .....	95
Tabela 4.3 – Caracterização das variáveis arquitetônicas e alternativas avaliadas nas simulações computacionais.....	126
Tabela 4.4 – Propriedades térmicas utilizadas no cálculo do Fator de Resposta: Modelo com inércia baixa.....	128
Tabela 4.5 – Propriedades térmicas das vedações externas: modelo com inércia baixa .....	129
Tabela 4.6 – Propriedades térmicas utilizadas no cálculo do Fator de Resposta: Modelo com inércia média.....	130
Tabela 4.7 – Propriedades térmicas das vedações externas: modelo com inércia média .....	131
Tabela 4.8 – Intervalos considerados nas análises do balanço térmico.....	135
Tabela 4.9 – Limites superiores da temperatura operativa de conforto para os meses de dezembro a março. ....	136
Tabela 5.1 – Caracterização os experimentos realizados e períodos de análise correspondentes. ....	143
Tabela 5.2 – Análise de sensibilidade, dias 01 e 02 de janeiro. ....	182
Tabela 5.3 – Análise de sensibilidade, dias 08 a 10 de janeiro. ....	183
Tabela 5.4 – Análise de sensibilidade, dias 03 a 06 de fevereiro (intervalo 21h às 7h, com ventilação mecânica). ....	186
Tabela 5.5 – Análise de sensibilidade, dias 22 a 25 de janeiro. ....	188

Tabela 5.6 – Resultados das simulações: Modelos Originais x Modelo base final.....	205
Tabela 5.7 – Comparação entre os coeficientes de convecção calculados para a parede Sul. ....	209
Tabela 5.8 – Comparação entre os coeficientes de convecção calculados para a parede Leste.....	209

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>29</b>
1.1 OBJETIVO GERAL .....	32
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	32
1.3 ESTRUTURA DA TESE.....	33
<b>2 CARACTERIZAÇÃO DO OBJETO DE ESTUDO: O CLIMA LOCAL E A CASA EFICIENTE .....</b>	<b>37</b>
2.1 CARACTERIZAÇÃO CLIMÁTICA E APLICABILIDADE DAS ESTRATÉGIAS DE CONDICIONAMENTO PASSIVO EM FLORIANÓPOLIS - SC .....	37
2.2 A CASA EFICIENTE.....	46
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>55</b>
3.1 A VENTILAÇÃO NOTURNA E SEU POTENCIAL COMO ESTRATÉGIA DE RESFRIAMENTO .....	55
3.1.1 Estudos desenvolvidos no Brasil .....	59
3.1.2 Experiências internacionais .....	66
3.1.2.1 Edificações comerciais .....	69
3.1.2.2 Edificações residenciais .....	73
3.2 O USO DA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL COMO FERRAMENTA DE AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO DE EDIFICAÇÕES .....	76
3.2.1 Modelagem computacional da ventilação mecânica noturna .....	80
3.2.2 Análise do balanço energético de edificações: o uso do programa EnergyPlus.....	83
3.3 SÍNTESE DO CAPÍTULO .....	88

<b>4 MÉTODO .....</b>	<b>91</b>
4.1 TESTE DA ESTRATÉGIA: APLICAÇÃO DA VENTILAÇÃO MECÂNICA NOTURNA NA CASA EFICIENTE/ FLORIANÓPOLIS – SC.....	92
4.2 SIMULAÇÕES DO MODELO COMPUTACIONAL BÁSICO E PROCEDIMENTOS DE CALIBRAÇÃO .....	105
4.2.1 Descrição do modelo computacional original .....	106
4.2.2 Procedimentos de calibração do Modelo Base Inicial.....	112
4.2.3 Calibração do Modelo Base Final: teste dos algoritmos de condução e convecção .....	118
4.3 CARACTERIZAÇÃO DOS MODELOS COMPUTACIONAIS DESTINADOS À ANÁLISE PELO MÉTODO DO BALANÇO TÉRMICO .....	122
4.3.1 Inércia térmica do ambiente .....	126
4.3.2 Ventilação no período diurno .....	131
4.3.3 Ventilação mecânica noturna .....	132
4.4 ANÁLISE DO BALANÇO TÉRMICO E ESTIMATIVA DA CARGA TÉRMICA .....	133
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>139</b>
5.1 TESTE DA ESTRATÉGIA: RESULTADOS DO MONITORAMENTO <i>IN LOCO</i> NA CASA EFICIENTE .....	139
5.1.1 Impacto da ventilação natural diurna: ambiente sem ventilação mecânica noturna .....	144
5.1.2 Impacto da ventilação mecânica noturna: ambientes com ventilação natural diurna .....	150
5.1.3 Análise dos fluxos de calor através dos componentes construtivos .....	171
5.2 CALIBRAÇÃO DO MODELO BASE INICIAL.....	181
5.2.1 Considerações sobre o Modelo Base Inicial.....	188
5.3 CALIBRAÇÃO DO MODELO BASE FINAL.....	192
5.3.1 Análise do balanço térmico das superfícies internas .....	193
5.3.2 Temperaturas superficiais e do ar interno e somatório de graus-hora de resfriamento .....	199

5.3.3 Comparação entre o modelo base inicial e o modelo base final.....	202
5.3.4 Estimativa dos coeficientes de convecção forçada.....	206
5.4 AVALIAÇÃO DA EFICÁCIA DA VENTILAÇÃO DA NOTURNA COMO ESTRATÉGIA DE CONDICIONAMENTO APLICÁVEL A AMBIENTES RESIDENCIAIS NO VERÃO.....	213
5.4.1 Impacto das estratégias de ventilação no desempenho térmico do ambiente .....	214
5.4.1.1 Balanço térmico no intervalo de 7h às 13h .....	216
5.4.1.2 Balanço térmico no intervalo de 13h às 18h .....	222
5.4.1.3 Balanço térmico no intervalo de 18h às 21h .....	226
5.4.1.4 Balanço térmico no intervalo de 21h às 7h .....	229
5.4.2 Síntese das análises: usar inércia baixa ou inércia média?.....	238
<b>6 CONCLUSÕES .....</b>	<b>243</b>
6.1 LIMITAÇÕES DO TRABALHO .....	247
6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHO FUTUROS .....	248
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>251</b>
<b>APÊNDICES.....</b>	<b>265</b>
APÊNDICE I - FLUXOS DE CALOR E TEMPERATURAS SUPERFICIAIS .....	267
APÊNDICE II - BALANÇOS TÉRMICOS DAS SUPERFÍCIES INTERNAS .....	271
APÊNDICE III - ESTIMATIVA DOS COEFICIENTES DE CONVECÇÃO FORÇADA DURANTE O EMPREGO DA VENTILAÇÃO MECÂNICA NOTURNA.....	277
APÊNDICE IV - BALANÇOS TÉRMICOS DOS MODELOS COM INÉRCIA BAIXA E INÉRCIA MÉDIA .....	279



As variáveis climáticas destacam-se pela influência permanente que exercem sobre as edificações, provocando uma resposta física que afetará diretamente o ambiente interno através da transmissão de calor, qualidade da iluminação, ruídos, entre outros fatores.

No tocante ao ambiente térmico, esta resposta física está diretamente relacionada às propriedades termofísicas dos materiais construtivos e às estratégias de condicionamento térmico utilizadas. O comportamento térmico da edificação é determinado pelos ganhos e perdas de calor sofridos pela envoltória (paredes, cobertura, piso e aberturas), assim como pelas trocas de calor proporcionadas pela ventilação e pela insolação, juntamente com a carga térmica gerada pela ocupação de pessoas e pelo uso de equipamentos. De acordo com a interação entre esses fatores, as condições de temperatura, umidade e movimento do ar nos ambientes internos são alteradas. Tais variáveis, por sua vez, influenciam o conforto térmico dos usuários.

De acordo com as particularidades climáticas de cada local, são recomendadas estratégias de condicionamento específicas, conforme apresentado na literatura (WATSON; LABS, 1983; GIVONI, 1994; GIVONI, 1997). É com base em tais recomendações que se fundamentam as normas técnicas destinadas a promover a otimização do desempenho térmico das edificações, a partir da correta especificação de materiais e componentes construtivos ou do aproveitamento da ventilação natural e do sombreamento para redução da temperatura, e da radiação para aquecimento solar no inverno, entre outros (ABNT, 2008; ABNT, 2005). Portanto, a adequação da arquitetura ao clima é fundamental para se projetar edificações que, durante a sua fase de ocupação e uso, apresentem um comportamento térmico favorável ao conforto dos indivíduos.

O emprego de estratégias de condicionamento passivo destaca-se também pela possibilidade de redução do consumo de energia no âmbito da construção civil. De acordo com o Ministério de Minas e Energia, 46% do consumo de energia total do país se dá nos edifícios, metade desta parcela no setor residencial (BRASIL, 2010). Mas, além da economia de energia, é necessário identificar qual a eficácia dessas estratégias para o atendimento do conforto térmico dos usuários.

Em edificações que não possuem climatização artificial, como é o caso da maioria das residências, o controle da ventilação e da radiação solar é essencial para garantir o conforto térmico, principalmente em localidades de clima quente e úmido. Nesses casos, a ventilação cruzada e o uso da massa térmica para resfriamento, assim como o uso da ventilação no período noturno, são estratégias recomendáveis. A ventilação cruzada favorece o conforto dos usuários, devido às trocas térmicas por convecção com o ar e a evaporação do suor. Já a ventilação noturna pode ser combinada com a inércia térmica para resfriamento, promovendo a remoção do calor acumulado nos elementos opacos que constituem a envoltória (paredes e cobertura), potencializando os principais efeitos decorrentes da inércia térmica da construção: o atraso e o amortecimento térmico.

Entretanto, o emprego da ventilação natural no período noturno pode ser preterido devido à indisponibilidade de ventos com frequência e velocidades adequadas, interferência de ruídos, entrada de insetos e questões de segurança e privacidade. Uma alternativa é a adoção de uma estratégia híbrida: a ventilação mecânica, combinada com a inércia térmica para resfriamento.

Para a difusão das estratégias de adequação climática, é necessário identificar qual o potencial das mesmas sob os mais diversos contextos climáticos, seja por meio de medições *in loco* ou através de simulação computacional. Mesmo a principal referência normativa existente, que apresenta o zoneamento bioclimático brasileiro, a NBR 15220-3 (ABNT, 2005b), suscita discussões a respeito dos critérios de aplicabilidade das estratégias de condicionamento passivo, diante da diversidade do clima nas diferentes regiões do país. Nesse contexto, a pesquisa possui importância fundamental, pois possibilita avaliar diversos cenários capazes de representar diferentes comportamentos do usuário, ou seja, como o mesmo utiliza os recursos disponíveis para promover o condicionamento térmico passivo. Um exemplo da interferência do usuário, a operação das aberturas, merece destaque quando o objetivo é aproveitar a ventilação para promover o conforto térmico.

No caso da ventilação noturna, as pesquisas destinadas a avaliar a viabilidade dessa estratégia envolvem a verificação do balanço térmico da edificação, a fim de identificar a influência dos ganhos de calor durante o período diurno no potencial de resfriamento que a referida estratégia apresenta. Em edificações que empregam componentes construtivos com maior inércia térmica, atenção especial deve ser dada aos fenômenos de condução do calor pelos componentes opacos e às

trocas de calor por convecção, favorecidas pela ventilação. No verão, devem-se proteger os ambientes dos ganhos de calor durante o dia, a fim de evitar o acúmulo de calor na envoltória. Este acúmulo de calor dificulta o resfriamento no período noturno. Portanto, quando as aberturas são operadas indiscriminadamente, a eficácia da ventilação noturna pode ser prejudicada.

O potencial das estratégias de adequação climática é analisado em função do desempenho térmico da edificação, sob condições diferenciadas de uso e ocupação. Os somatórios de graus-hora de resfriamento ou aquecimento são critérios de avaliação do desempenho térmico e refletem o resultado do balanço térmico do ambiente. São calculados em função de limites de temperatura, que por sua vez são definidos de acordo com as exigências de conforto térmico dos ocupantes. Este parâmetro pode ser utilizado na comparação do desempenho de diferentes configurações construtivas, conforme avaliado nos estudos de Pfafferott et al. (2003), Ghiaus e Allard (2006) e Yang e Li (2008).

O somatório de graus-hora de resfriamento é apresentado como um índice de desempenho energético no recém-lançado Regulamento Técnico para a Qualidade de Edificações Residenciais (RTQ-R), predito por meio de equações de regressão múltipla, específicas para cada zona bioclimática brasileira (VERSAGE, 2011). Enfocando a ventilação noturna, os estudos desenvolvidos por Shaviv et al. (2001), Carrilho da Graça et al. (2002) e Macias et al. (2006) demonstram que a amplitude de variação da temperatura externa, as características construtivas da envoltória e a quantidade de renovações de ar interno afetam o somatório de graus-hora de resfriamento e definem se a estratégia é eficaz ou não. No Brasil, o estudo de Goulart (2004) em residências que empregavam a ventilação diurna e noturna identificou correlações entre os somatórios de graus-hora de resfriamento obtidos em simulações computacionais e parâmetros como a área de abertura, inércia da construção e número de horas de ventilação diurna, propondo recomendações para o melhor aproveitamento da inércia térmica para resfriamento.

Nos estudos mencionados, que focam o período do verão, os somatórios de graus-hora de resfriamento são indicativos do desempenho das edificações estudadas em cada período analisado, mas não expressam as mudanças do comportamento térmico dos ambientes no decorrer das horas do dia.

É importante considerar a duração dos períodos de aquecimento e resfriamento da edificação e sua relação com os componentes

responsáveis pelo balanço térmico, destacando-se a participação da envoltória e da ventilação. Em edificações que utilizam a inércia térmica para resfriamento associada à ventilação noturna, é fundamental correlacionar o parâmetro de desempenho com os efeitos do atraso e do amortecimento térmico da temperatura interna. Considerando-se o emprego dessas estratégias em residências, o pico da temperatura interna sofre os efeitos de atraso e amortecimento térmico em relação à temperatura externa. Mas, caso a ventilação não seja eficaz para promover o resfriamento das superfícies internas no período noturno, ou o ambiente não esteja devidamente protegido dos ganhos solares no período diurno, a temperatura interna se mantém elevada nos períodos de maior ocupação, prejudicando o conforto dos usuários.

Considerando-se a ventilação mecânica noturna como um recurso alternativo para promover o condicionamento térmico de ambientes residenciais em Florianópolis durante o verão, é necessário identificar diretrizes bioclimáticas de projeto que favoreçam o desempenho desta estratégia durante a vida útil da edificação, de acordo com os padrões de ocupação dos ambientes internos. Visando contribuir para o melhor aproveitamento da ventilação mecânica noturna e o atendimento das necessidades de conforto térmico em residências, o objetivo geral do presente trabalho é definido a seguir.

## 1.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar o potencial de aplicação da ventilação mecânica noturna como estratégia de condicionamento térmico no verão, quando associada a configurações construtivas com baixa e média inércia e diferentes padrões de ventilação natural no período diurno.

Para o cumprimento do objetivo proposto, definem-se os seguintes objetivos específicos:

## 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Avaliar o desempenho da ventilação mecânica noturna como estratégia de resfriamento quando aplicada a um ambiente real, em uma residência experimental localizada em Florianópolis-SC;

2. Identificar a influência dos algoritmos de condução e convecção do programa computacional EnergyPlus v. 6.0 nos resultados das simulações computacionais do desempenho térmico de um ambiente residencial;
3. Avaliar a influência da ventilação mecânica noturna e de diferentes padrões de ventilação diurna sobre o desempenho térmico de configurações construtivas com baixa e média inércia;
4. Propor recomendações para o emprego de estratégias híbridas de ventilação em ambientes caracterizados por baixa e média inércia em função dos seus padrões de ocupação, visando à otimização do desempenho térmico.

De acordo com os objetivos acima propostos, a principal contribuição deste trabalho consiste em aprofundar o estudo relativo ao potencial da ventilação mecânica noturna e estratégias híbridas de ventilação no contexto climático de Florianópolis-SC. O significado aqui atribuído ao termo *potencial* corresponde à capacidade de efetivar melhoria no desempenho térmico do ambiente. Neste trabalho, optou-se por particularizar as análises, a partir do estudo de duas configurações construtivas, com inércias distintas, ao invés de se obter resultados passíveis de generalização. O ineditismo do trabalho consiste em caracterizar a dinâmica do comportamento térmico de um ambiente residencial, em diferentes períodos do dia, quantificando o seu desempenho em cada intervalo, a fim de demonstrar a correspondência entre os padrões de ocupação, níveis de inércia e estratégias híbridas de ventilação.

### 1.3 ESTRUTURA DA TESE

- *Caracterização do objeto de estudo*

No item 2.1 é apresentada uma caracterização climática de Florianópolis, SC, identificando-se a aplicabilidade da ventilação noturna e justificando-se a opção por uma estratégia híbrida de condicionamento: a ventilação mecânica noturna associada à inércia térmica para resfriamento. No item 2.2 é apresentada a residência

experimental utilizada como objeto de estudo deste trabalho, a Casa Eficiente.

- *Revisão bibliográfica*

O Capítulo 3 contém a revisão documental pertinente ao tema abordado no presente trabalho.

No item 3.1 são abordados aspectos específicos relativos ao emprego da inércia térmica para resfriamento e da ventilação noturna. São relatadas experiências já realizadas no Brasil e no exterior, demonstrando o potencial dessas estratégias como soluções possíveis para promover o conforto térmico no interior de residências no verão.

A fim de investigar quantitativamente o potencial da ventilação mecânica noturna, discute-se no item 3.2 a aplicabilidade da simulação computacional como ferramenta de avaliação do desempenho termo-energético dos edifícios. Destacam-se as suas vantagens e a importância de garantir a confiabilidade dos resultados produzidos a partir da calibração dos modelos computacionais, ajustados através de comparação com dados de monitoramento realizados *in loco*.

O item 3.3 apresenta uma síntese da revisão bibliográfica, na qual são feitas considerações a respeito da análise do desempenho térmico de edificações que empregam a ventilação mecânica noturna como estratégia de resfriamento no verão.

- *Método*

O Capítulo 4 descreve os procedimentos adotados para avaliar a eficácia da ventilação mecânica noturna.

Inicialmente, a estratégia foi aplicada na Casa Eficiente em Florianópolis – SC, realizando-se simultaneamente o monitoramento *in loco* de seu comportamento térmico (item 4.1). Na sequência, são apresentados os procedimentos de calibração do modelo computacional (item 4.2) e as combinações de variáveis arquitetônicas consideradas nas simulações computacionais (item 4.3). Por fim, são apresentados os procedimentos metodológicos utilizados para analisar os resultados das simulações e os parâmetros utilizados para avaliar a influência da configuração construtiva e dos padrões de ventilação do ambiente no desempenho da ventilação mecânica noturna (item 4.4).

- *Resultados e discussão*

Os resultados são apresentados no Capítulo 5. No item 5.1, são apresentados os resultados obtidos no monitoramento *in loco* realizado na Casa Eficiente. Os itens 5.2 e 5.3 abordam os resultados das etapas de calibração do modelo computacional, necessária para a definição dos parâmetros de simulação empregados nos modelos destinados à análise do balanço térmico, cujos resultados são apresentados no item 5.4. A partir desta análise, são definidas diretrizes para a otimização do desempenho térmico de ambientes residenciais que venham a empregar a ventilação mecânica noturna.

- *Conclusões*

O Capítulo 6 apresenta as conclusões relativas à aplicação da ventilação mecânica noturna como alternativa para o condicionamento térmico de residências em Florianópolis – SC. Também são definidas as limitações do trabalho e são propostas sugestões para trabalhos futuros.



## **2 CARACTERIZAÇÃO DO OBJETO DE ESTUDO: O CLIMA LOCAL E A CASA EFICIENTE**

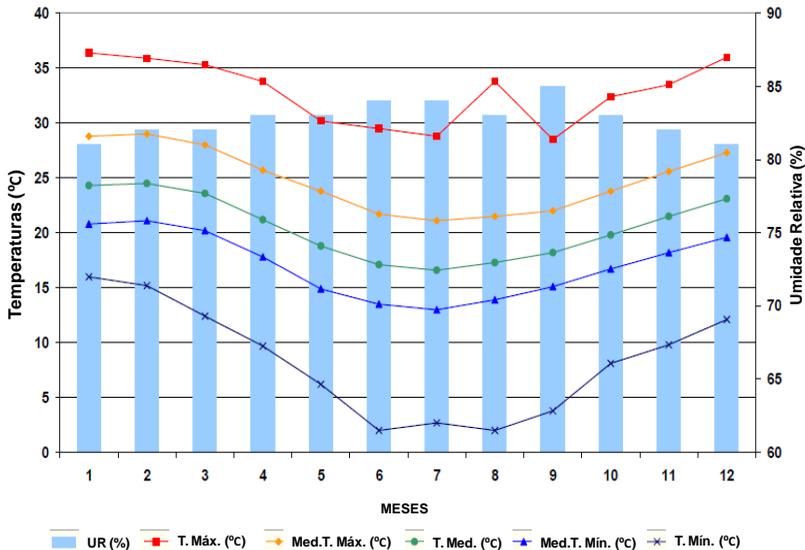
---

O presente trabalho é baseado em um estudo de caso desenvolvido em uma residência unifamiliar experimental, denominada Casa Eficiente, localizada na cidade de Florianópolis.

### **2.1 CARACTERIZAÇÃO CLIMÁTICA E APLICABILIDADE DAS ESTRATÉGIAS DE CONDICIONAMENTO PASSIVO EM FLORIANÓPOLIS - SC**

A cidade de Florianópolis localiza-se na ilha de Santa Catarina, entre os paralelos de 27°10' e 27°50' de latitude Sul e entre os meridianos de 48°25' e 48°35' de longitude Oeste. O clima é caracterizado por Nimer (1979) como Tropical Temperado subsequente, super úmido, apresentando verão quente e inverno ameno, sub-seco.

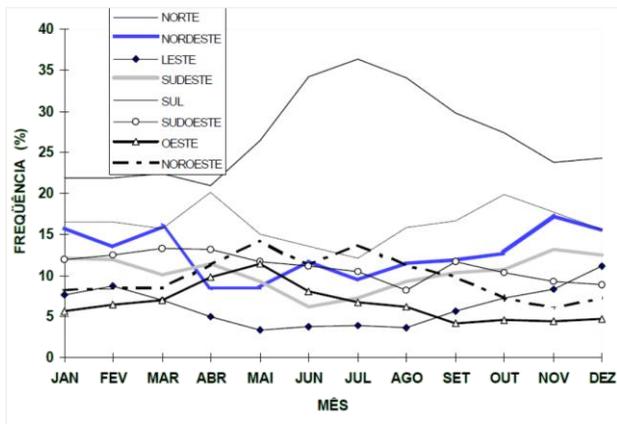
A temperatura média anual é 20,5°C, sendo que no verão, o clima é caracterizado por temperaturas elevadas: as temperaturas mais frequentes situam-se na faixa entre 18°C e 30,4°C nos meses de dezembro a março, segundo a análise estatística apresentada por Goulart (1998). O mês de fevereiro é considerado o mais quente do ano, cuja temperatura média corresponde a 24,5°C. Entretanto, a temperatura máxima pode ultrapassar os 36°C no mês de janeiro. Julho é o mês mais frio do ano, cuja temperatura média é igual a 7,8 °C. O mês de maio apresenta a maior amplitude média diurna, correspondente a 8,9 °C. A umidade relativa média apresenta pouca variação ao longo dos meses do ano, sendo que a média anual é igual a 83%. A Figura 2.1 ilustra os valores das temperaturas médias e umidades relativas médias mensais, de acordo com o arquivo TRY da cidade.



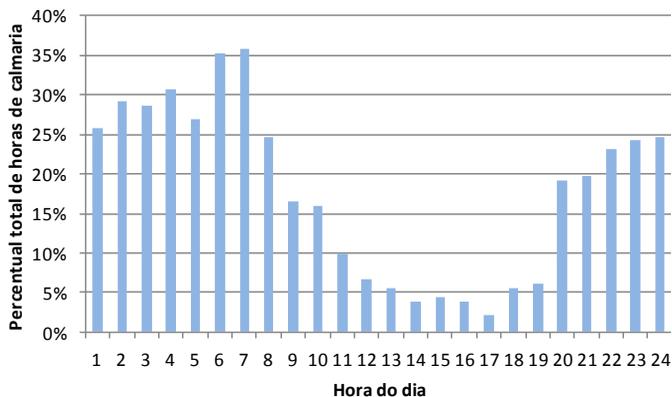
**Figura 2.1 – Temperaturas e umidades relativas do ar em Florianópolis.**

Fonte: Adaptado de Goulart (2004).

Com relação ao regime de ventos, verifica-se a predominância do vento Norte ao longo do ano, principalmente nos meses de junho a agosto (Figura 2.2-a). A velocidade média anual corresponde a 3,5 m/s. Nos meses mais quentes, outubro a março, destaca-se também a incidência dos ventos Sul e Nordeste. Considerando-se esses meses, a Figura 2.2-b indica a frequência de ocorrência de calmaria de vento para cada hora do dia. Observa-se uma maior frequência de calmarias exatamente durante a noite e a madrugada (20h - 6h), enquanto que no período da tarde há uma maior disponibilidade de vento (12h - 18h).



a) Frequência mensal de direção do vento

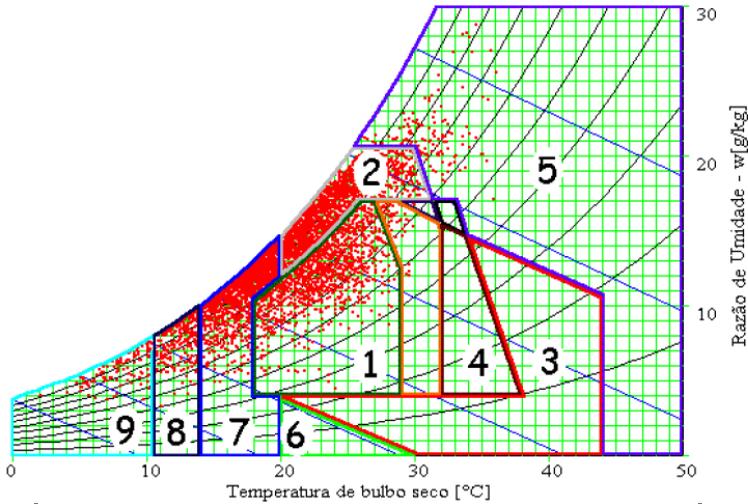


b) Frequência horária de ocorrência de calmarias (outubro a março)

### Figura 2.2 – Regime de ventos em Florianópolis.

Fonte: a) Goulart (1998); b) BATISTA et al. (2010).

A Figura 2.3 ilustra a carta bioclimática de Givoni (1992), onde foram inseridos os dados de temperatura e umidade do arquivo TRY de Florianópolis. No período quente, além das estratégias indicadas na carta, com destaque para a ventilação natural, é fundamental o emprego do sombreamento para promover a redução do ganho de calor. Já no inverno, a massa térmica para aquecimento e o aquecimento solar passivo são as principais estratégias indicadas (35,4% das horas).

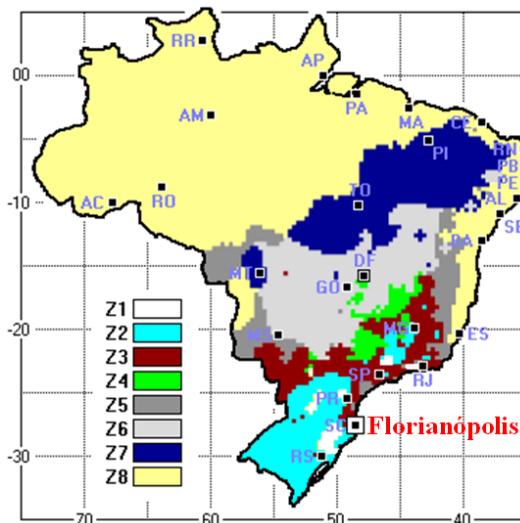


CALOR	1) Conforto	20,8
	2) Ventilação	36,4
	3) Resfriamento evaporativo	0,9
	4) Massa térmica para resfriamento	0,9
	5) Ar-condicionado	1,7
FRIO	7) Massa térmica para aquecimento/ aquecimento solar	35,4
	8) Aquecimento solar passivo	3,8
	1) Conforto	20,8
	2) Ventilação	36,4

**Figura 2.3 – Carta bioclimática de Givoni (1992) e percentuais de horas correspondentes a cada estratégia de condicionamento térmico para Florianópolis.**

Segundo a NBR 15220-3 (ABNT, 2005b), Florianópolis enquadra-se na zona bioclimática 3 (Figura 2.4). Esta norma apresenta recomendações e diretrizes construtivas para adequação de habitações unifamiliares de interesse social ao clima local, relativas ao tamanho das aberturas para ventilação, tipos de vedações externas e estratégias de condicionamento térmico passivo. No caso de Florianópolis, são apresentadas as seguintes recomendações:

- Área de aberturas para ventilação: médias, entre 15% e 25% da área de piso;
- Sombreamento das aberturas: permitir sol durante o inverno;
- Paredes externas: leves refletoras (transmitância térmica:  $U \leq 3,60 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ ; atraso térmico:  $\phi \leq 4,3 \text{ h}$  e Fator Solar  $\leq 4\%$ );
- Cobertura: leve isolada (transmitância térmica:  $U \leq 2,00 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ ; atraso térmico:  $\phi \leq 3,3 \text{ h}$  e Fator Solar  $\leq 6,5\%$ );
- Estratégias de condicionamento passivo: ventilação cruzada no verão; aquecimento solar e vedações internas pesadas (inércia térmica) no inverno.



**Figura 2.4 – Zoneamento bioclimático brasileiro.**

Fonte: Adaptado de Roriz (2004).

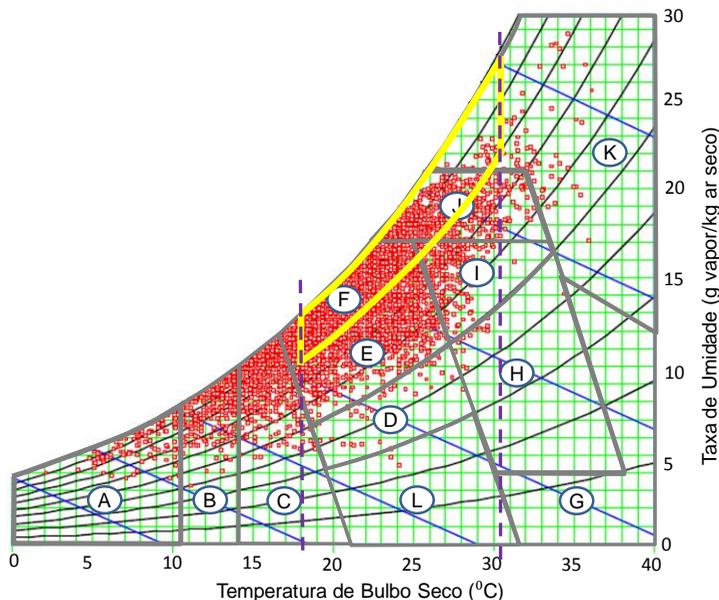
De acordo com tais recomendações, a envoltória da edificação deve estar preparada para lidar com as variações nas condições do clima externo. Para a cobertura, componente que ocupa a maior área da envoltória de edificações térreas, responsável pela maior parcela de ganhos de calor por condução, recomenda-se o uso de coberturas leves isoladas, com o objetivo de reduzir os ganhos de calor. Quanto à adoção de paredes leves, ao contrário do uso de vedações externas pesadas, a

intenção é evitar o acúmulo de calor nesses componentes. Como o clima úmido local apresenta pequenas amplitudes térmicas ao longo do dia, isto dificulta o resfriamento da envoltória no período noturno, restringindo o uso da inércia térmica apenas às paredes internas. Desse modo, no verão o resfriamento deve ocorrer pela maximização da ventilação natural. Já no inverno, a incidência da radiação solar sobre as superfícies internas deve ser favorecida, a fim de que estas paredes possam ter a função de acumular calor durante o dia. Devido ao fenômeno do atraso térmico, a elevação da temperatura dessa massa construtiva proporcionará o aquecimento dos ambientes durante a noite, por meio da transferência do calor para o ar interno, através da convecção.

Seguindo-se este raciocínio, o emprego da massa térmica para resfriamento (uso de vedações externas pesadas) seria recomendável apenas para ambientes de uso diurno, os quais poderiam se beneficiar dos efeitos de atraso e amortecimento térmico em relação à temperatura externa. Já no caso de ambientes de uso noturno, como a amplitude da temperatura externa é pequena em climas úmidos, isto dificulta o resfriamento da envoltória, podendo causar desconforto térmico nesses horários. Portanto, trata-se de uma estratégia de interessante aplicação em escolas, por exemplo, cujos períodos de ocupação correspondem ao período diurno.

Entretanto, existem outras variáveis que interferem no desempenho desta estratégia bioclimática, conforme será discutido no Capítulo 3. Caso seja combinado ao sombreamento e ao uso da ventilação noturna, o emprego da massa térmica para resfriamento pode ser potencializado, inclusive em regiões caracterizadas pelo clima quente e úmido, a exemplo de Florianópolis. Portanto, a combinação de ambas as estratégias não pode ser descartada nessas regiões, sem uma investigação detalhada acerca das possibilidades de sua incorporação no projeto de habitações.

Outro aspecto passível de discussão diz respeito à aplicabilidade da ventilação natural. A Figura 2.5 ilustra a carta bioclimática da NBR 15220-3, com a inserção dos dados do TRY de Florianópolis. As temperaturas mais frequentes nos meses de verão (dezembro a março) situam-se na faixa entre 18°C e 30,4°C, com 90% de confiabilidade, segundo a análise estatística apresentada por Goulart (1998), associados a umidades relativas superiores a 80%. Desse modo, tais dados se enquadram nas zonas F, J e K (área destacada em amarelo na Figura 2.5), sendo recomendáveis, portanto, a ventilação e a renovação do ar para desumidificação e em algumas situações, a refrigeração artificial.



A	Aquecimento artificial
B + C	Aquecimento solar
C	Massa térmica
D	Conforto térmico (baixa umidade)
E	Conforto térmico
F	Desumidificação (renovação do ar)
G + H	Resfriamento evaporativo
H + I	Massa térmica para resfriamento
I + J	Ventilação

**Figura 2.5 – Carta bioclimática da NBR 15220-3 e dados climáticos do arquivo TRY de Florianópolis.**

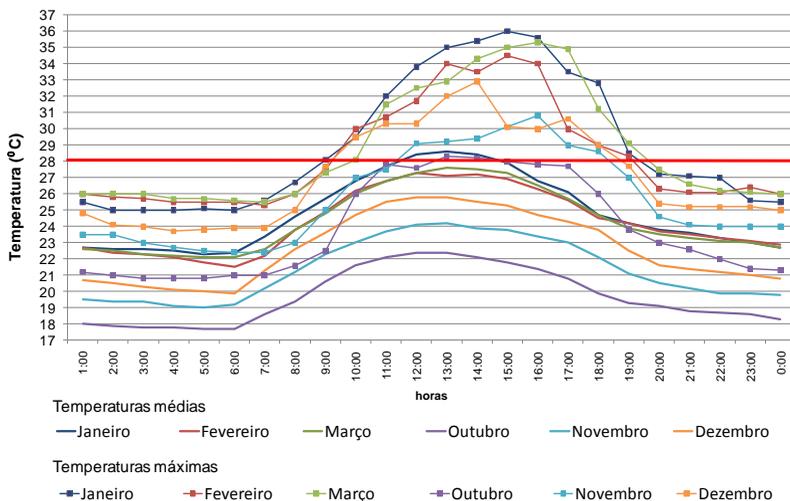
Toledo (2006) discute a aplicabilidade da ventilação, afirmando que é necessário um maior detalhamento dessa estratégia, pois é considerada recomendável tanto para temperaturas mais amenas (entre 20°C e 26°C), sob umidades elevadas (acima de 80%, zona F da carta bioclimática), quanto para temperaturas mais elevadas (29°C a 33°C), sob umidades variadas (zonas I e J), conforme indicado na Figura 2.5. Observa-se também que a zona F representa uma zona intermediária entre a ventilação e a massa térmica, sugerindo a possibilidade de

combinação de tais estratégias, embora o uso da massa térmica para resfriamento seja indicado para as zonas H e I, caracterizada por temperaturas mais altas e umidades variadas. Quanto à necessidade de desumidificação do ar, está diretamente relacionada à manutenção da qualidade do ar e a conservação dos materiais construtivos (TOLEDO, 2006) e não necessariamente com a sensação de conforto no interior das edificações.

Xavier (2000), em estudo realizado em edifícios escolares não condicionados em Florianópolis-SC, verificou que, para temperaturas do ar próximas de 20°C, as pessoas manifestavam sensação de conforto, mesmo com altos teores de umidade relativa do ar, podendo a mesma atingir 100%. Já Barbosa (1997) apresenta resultados de pesquisa de campo em residências localizadas em Londrina – PR, onde também foi observada uma maior tolerância às umidades elevadas associadas a temperaturas do ar mais amenas. Desse modo, a zona de conforto poderia ser estendida até o limite de 90% de umidade relativa, o que englobaria também a zona F da carta bioclimática da ABNT. Destaca-se ainda que tanto Florianópolis quanto Londrina enquadram-se na zona bioclimática 3.

Convém salientar que tais resultados não permitem concluir que o emprego da ventilação natural seja dispensável diante de teores de umidade elevados. A desejabilidade do movimento do ar para promover o resfriamento da pele, incrementando a sensação de conforto dos indivíduos no interior dos ambientes, é uma questão profundamente discutida no meio científico (DE DEAR; BRAGER, 2002; TOFTUM, 2004; BITENCOURT; CÂNDIDO, 2006; TYLER; ZHANG; ARENS, 2009; CÂNDIDO, 2010). Entretanto, no caso de Florianópolis, suscitam discussão sobre os mecanismos de controle da ventilação que podem ser empregados durante os horários mais quentes do dia, no verão.

Com o emprego da ventilação natural, as trocas de ar com o ambiente externo fazem com que a temperatura interna tenha uma forte ligação com a temperatura externa, mas em geral, sendo acrescida pelos ganhos térmicos solares e os ganhos térmicos internos. Por esse motivo, a ventilação pode causar desconforto caso a temperatura do ar externo esteja elevada. De acordo com Givoni (1994), a ventilação é recomendável quando a temperatura externa é menor ou igual a 28°C. Observando-se a variação das temperaturas médias horárias e máximas horárias nos meses mais quentes do ano em Florianópolis, outubro a março (Figura 2.6), verifica-se que o emprego da ventilação diurna pode ser desaconselhável no intervalo entre as 10h e as 18h.



**Figura 2.6 – Temperaturas médias e máximas horárias nos meses mais quentes do ano em Florianópolis. Fonte: Arquivo TRY de Florianópolis (LabEEE, 2010).**

Outro aspecto que deve ser considerado para o aproveitamento da ventilação natural é a disponibilidade de vento. De acordo com a Figura 2.2-b, há disponibilidade de vento durante o dia em Florianópolis. Entretanto, durante a noite e a madrugada, a frequência de ocorrência de calmarias é superior a 25% nos horários de 0h até 7h. Em se tratando da ventilação natural, há que se considerar ainda que a existência de barreiras no entorno urbano pode prejudicar o aproveitamento desse recurso. Interferências como o ruído e a poluição também dificultam o emprego desta estratégia. Portanto, caso haja restrições para se manter a ampla ventilação através das aberturas, o emprego da ventilação mecânica poderia representar uma alternativa de resfriamento, principalmente no período noturno, assegurando as renovações de ar no interior dos ambientes.

Com relação à massa térmica para aquecimento e ao aquecimento solar, principais estratégias recomendadas para o inverno em Florianópolis, o seu emprego depende do uso de componentes construtivos com elevada inércia térmica, assim como depende da exposição das janelas aos ganhos solares. Deve-se atentar para que tais soluções, benéficas no inverno, não prejudiquem as condições de conforto no verão. Por esse motivo, justifica-se o aprofundamento da

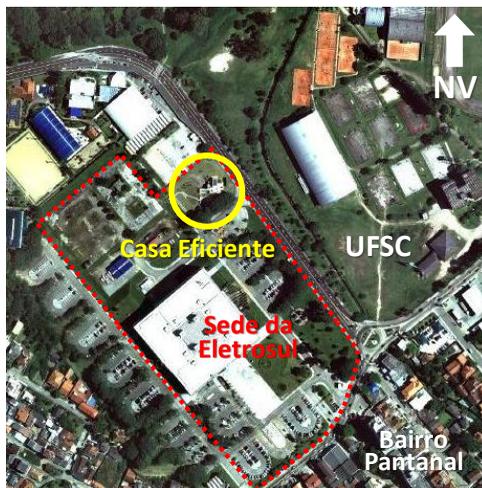
investigação acerca do uso da massa térmica no clima quente e úmido, a partir do seguinte questionamento: o emprego da massa térmica é desfavorável em regiões de clima quente e úmido?

Szokolay (2000) defende que não é a inércia dos componentes construtivos que define a qualidade do desempenho das edificações em climas quentes e úmidos, mas a interação entre diversas variáveis arquitetônicas e climáticas. Segundo o autor, que reuniu dados de diversos estudos realizados em localidades de clima quente e úmido, dependendo das condições de sombreamento e dos períodos de ventilação aplicados, o uso da inércia térmica pode ser uma boa alternativa para promover o resfriamento no verão. Segundo o autor, em alguns casos, edificações com maior inércia apresentaram desempenho térmico superior às tradicionais edificações construídas com vedações leves, citando estudos realizados em cidades como Queensland, na Austrália e Maracaibo, na Venezuela.

No presente trabalho, será focado o estudo da ventilação mecânica noturna como forma de potencializar os efeitos da massa térmica para resfriamento, sob condições diferenciadas de ventilação no período diurno, no contexto do clima subtropical do Sul do Brasil, destacando-se a cidade de Florianópolis – SC.

## 2.2 A CASA EFICIENTE

A Casa Eficiente, objeto de estudo deste trabalho, é 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) (ELETROSUL, 2011). Está localizada na cidade de Florianópolis-SC, no bairro Pantanal (Figura 2.7). A Figura 2.8 ilustra a vista externa da Casa Eficiente, destacando-se a fachada Norte.



**Figura 2.7 – Localização da residência monitorada.**



**Figura 2.8 – Vista externa da Casa Eficiente (fachada Norte).**

A Casa Eficiente foi projetada para funcionar como uma residência modelo e também como um laboratório de pesquisas. Como residência modelo, o objetivo é demonstrar como as soluções de projeto podem favorecer o uso eficiente da energia elétrica e da água nas edificações residenciais, reduzindo desperdícios e impactos sobre o meio ambiente (MACIEL, 2005). Para funcionar como laboratório de pesquisas, a Casa Eficiente foi equipada com um amplo sistema de

monitoramento termo-energético, desenvolvido pelo Laboratório de Meios Porosos e Propriedades Termofísicas da Universidade Federal de Santa Catarina (LMPT/UFSC), além de uma estação meteorológica própria. Desse modo, a Casa Eficiente apresenta-se como um instrumento útil à investigação do desempenho de diversas estratégias destinadas à promoção da eficiência energética e da adequação climática, dentre elas, a ventilação mecânica noturna, empregada nos quartos.

Com relação ao projeto arquitetônico da Casa Eficiente, de autoria das arquitetas Alexandra Albuquerque Maciel e Suely Ferraz de Andrade, as estratégias bioclimáticas foram definidas após um estudo prévio dos condicionantes climáticos característicos da cidade de Florianópolis (MACIEL et al., 2006), contemplando desde a escolha dos componentes construtivos até as estratégias de proteção solar e ventilação, natural e mecânica.

Com relação às características construtivas, ambos os quartos possuem janelas voltadas para a orientação Leste, com vidros duplos e persianas incorporadas às esquadrias para controle da insolação. Com relação às coberturas, o quarto de casal possui cobertura em telha cerâmica com isolamento de lã de rocha e manta refletiva de alumínio. Já o quarto de solteiro possui teto jardim, apresentando maior inércia térmica do que a cobertura do quarto de casal. A Figura 2.9 ilustra as fachadas externas desses ambientes. Na Figura 2.10 são ilustrados os tipos de coberturas empregados.

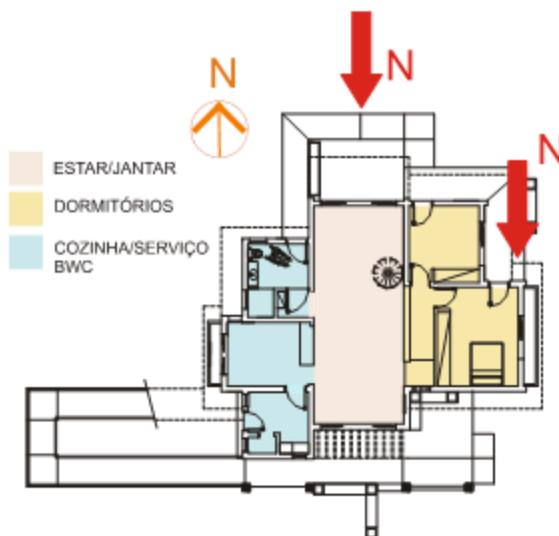


**Figura 2.9 – Fachadas dos quartos de solteiro e de casal (orientação das janelas: Leste).**



**Figura 2.10 – Telhas cerâmicas (quarto de casal) e teto-jardim (quarto de solteiro).**

Nos períodos quentes, pode-se utilizar a ventilação cruzada através das aberturas dispostas em fachadas opostas nos diversos ambientes (Figura 2.11 e Figura 2.12).



**Figura 2.11 – Planta baixa da edificação, indicando-se a incidência dos ventos predominantes.**



**Figura 2.12 – Vista interna da Casa Eficiente (sala de estar).**

No caso dos dormitórios, é possível também empregar a ventilação mecânica durante a noite, com o uso de equipamentos denominados insufladores de ar (Figuras 2.13 a 2.16). Estes equipamentos captam o ar proveniente do ambiente externo no período noturno, introduzindo-o nos ambientes internos a fim de resfriar a envoltória da edificação (paredes e cobertura). No quarto de casal, junto à saída do insuflamento, foi adaptado um defletor (Figura 2.15- c), a fim de direcionar o fluxo de ar para a área ocupada pelas camas.



**Figura 2.13 – Insuflador de ar posicionado no quarto de casal.**



**Figura 2.14 – Insuflador de ar posicionado no quarto de solteiro.**

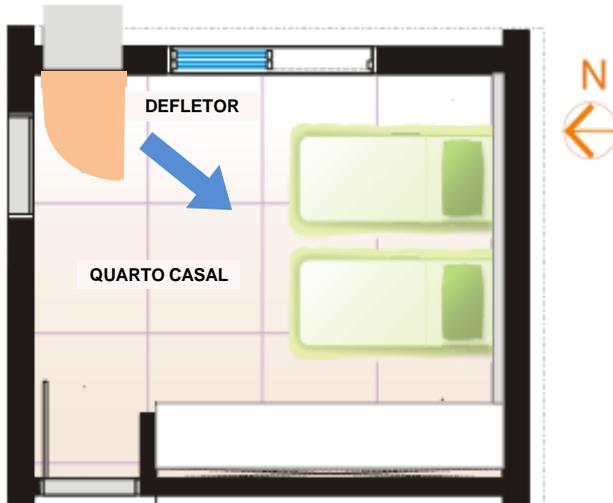


a) Vista interna



b) Vista externa

INSUFLADOR



c) Planta baixa

Figura 2.15 – Insuflador de ar posicionado no quarto de casal



a) Vista interna



b) Vista externa



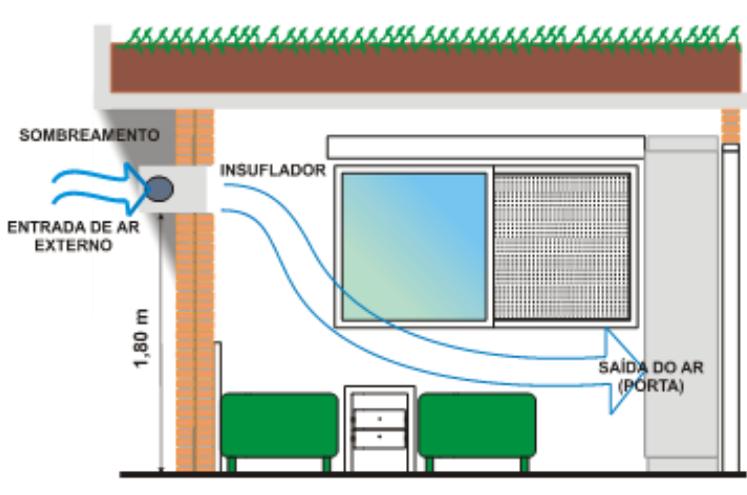
c) Planta baixa

**Figura 2.16 – Insuflador de ar posicionado no quarto de solteiro.**

A adoção da ventilação mecânica justifica-se devido à ocorrência de calmarias de vento durante o período noturno em Florianópolis (ANDRADE, 1996), o que dificulta o aproveitamento da ventilação

natural exatamente nos horários em que a ocupação das residências é maior. Convém destacar também que os insufladores mecânicos apresentam baixo consumo de energia, correspondente a 200 Wh, representando uma alternativa com baixo custo de operação ao longo da vida útil da edificação.

O funcionamento destes aparelhos é ilustrado na Figura 2.17 e consiste na tomada do ar externo, efetuada através de entradas de ar existentes no equipamento, dotadas de filtros. O ar é aspirado com o auxílio de uma turbina interna e, na seqüência, penetra no ambiente interno através de aletas existentes na face frontal do equipamento. As janelas devem ser mantidas fechadas, mas para que a renovação do ar seja realizada, devem ser conservadas aberturas para saída do ar ambiente, através das portas internas, por exemplo. Outras recomendações importantes quanto à instalação do equipamento: optar pelas fachadas Norte e Sul ou mantê-lo devidamente sombreado<sup>1</sup> e posicioná-lo a uma altura de no mínimo 1,5 m em relação ao piso.



**Figura 2.17 – Esquema de funcionamento dos insufladores de ar (quarto de solteiro).**

Os insufladores instalados na Casa Eficiente possuem controle da vazão do ar que é introduzido no ambiente interno, realizado por meio da alteração da velocidade de rotação da turbina. Ao variar a vazão, por

<sup>1</sup> Recomendações do fabricante para o caso de empregar a ventilação mecânica durante o dia.

consequente alteram-se também as trocas de ar. De acordo com as especificações do equipamento, as vazões proporcionadas pelo mesmo são as seguintes:

- Vazão mínima:  $0,11 \text{ m}^3/\text{s}$
- Vazão média:  $0,14 \text{ m}^3/\text{s}$
- Vazão máxima:  $0,18 \text{ m}^3/\text{s}$

Nos experimentos que subsidiaram o desenvolvimento deste trabalho, o equipamento foi utilizado com vazão máxima e o ambiente escolhido para análise foi o quarto de casal. Este ambiente possui volume interno igual a  $75,2 \text{ m}^3$ , de modo que o insuflamento com vazão máxima corresponde a uma taxa de renovação de ar igual a  $8,6 \text{ m}^3/\text{hora}$ .

O período completo de monitoramento abrangeu os meses de dezembro de 2007 a abril de 2008. Foram realizadas diversas séries de experimentos, compreendendo períodos distintos de análise. Desse modo foi possível verificar o efeito da ventilação mecânica noturna no comportamento térmico da edificação, considerando diferentes condições de ventilação durante o período diurno.

### 3.1 A VENTILAÇÃO NOTURNA E SEU POTENCIAL COMO ESTRATÉGIA DE RESFRIAMENTO

A ventilação noturna é uma técnica de atenuação do calor e pode ser empregada para potencializar o efeito da inércia térmica para resfriamento. Edificações cujos componentes construtivos possuem elevada capacidade térmica apresentam um amortecimento dos picos de temperatura internos em relação aos valores correspondentes no ambiente externo (redução da temperatura máxima). Além disso, também apresentam uma defasagem em relação aos horários em que os valores extremos são registrados no interior dos ambientes (atraso térmico).

Quando a temperatura média diária é mais alta do que o limite de conforto, a ventilação noturna pode auxiliar a dissipação do calor, incrementando as trocas térmicas por convecção entre a massa construtiva e o ar no interior do ambiente (SZOKOLAY, 2008). Além disso, com a redução da temperatura externa no período noturno, o emprego da ventilação natural intensifica o resfriamento da envoltória. Segundo Kolokotroni e Santamouris (2007), a ventilação noturna também pode ser efetivada com o uso de sistemas mecânicos, caso haja alguma restrição ao emprego da ventilação natural nesses horários. O uso de superfícies internas com revestimentos de condutividade alta e a maximização da área de superfícies expostas também promovem a otimização da inércia térmica como técnica de resfriamento (IRISH CONCRETE FEDERATION, 2006).

Diversos estudos têm sido desenvolvidos para identificar quais os principais fatores que interferem na eficácia da ventilação noturna, tanto em edifícios condicionados (BLONDEAU et al., 1997; BECKER; PACIUKI, 2002; PFAFFEROTT et al., 2005) como não condicionados (SHAVIV et al., 2001; CARRILHO DA GRAÇA et al., 2002; MACIAS et al., 2006). Embora esses edifícios sejam diferenciados pela natureza de uso, em ambos os casos verifica-se um consenso: a amplitude de variação da temperatura externa, as características construtivas da envoltória e a quantidade de renovações de ar interno, proporcionadas pela admissão da ventilação natural ou pelo funcionamento de sistemas mecânicos, definem se o emprego da ventilação noturna é eficaz ou não.

Enquanto o primeiro fator está relacionado diretamente ao clima, os demais resultam da solução arquitetônica proposta: componentes construtivos, orientação favorável à incidência dos ventos no período noturno ou características dos equipamentos utilizados (insufladores e/ou exaustores) e o sistema de aberturas empregado.

Com relação ao fator climático, Givoni (1997) apresenta os limites de aplicabilidade dessa estratégia. Segundo o autor, a temperatura externa máxima no verão deve oscilar entre 32°C e 36°C, enquanto as temperaturas durante a noite não devem ultrapassar os 20°C, o que corresponde a uma amplitude diurna da ordem de 15°C. Tais limites são importantes para não comprometer o efeito de amortecimento térmico durante o dia, sendo que a capacidade térmica dos componentes construtivos determina qual será a redução da temperatura em relação à temperatura externa máxima. Durante a noite, a redução da temperatura dependerá da temperatura do ar externo em contato com as superfícies da edificação, o qual é responsável pelo resfriamento por convecção.

De acordo com Szokolay (2007), no interior de edifícios com inércia térmica alta, a temperatura interna mantém-se praticamente constante, com valor próximo à média externa diária. Para classificar a inércia térmica de um edifício ou de um ambiente, é necessário determinar uma série de parâmetros relacionados às propriedades térmicas dos componentes construtivos que constituem a envoltória. O referido autor utiliza dois conceitos: i) a massa específica do edifício ( $M_e$ ), que relaciona a massa total do edifício à sua área de piso (Equação 3.1), e ii) o fator de resposta (FR), que depende das taxas de fluxo térmico devido à admitância ( $q_a$ ), à ventilação ( $q_v$ ) e à condução ( $q_c$ ), conforme a Equação 3.2:

$$M_e = \frac{\text{Massa total}}{\text{Área de piso}} \quad \text{Equação 3.1}$$

$$FR = \frac{q_a + q_v}{q_c + q_v} \quad \text{Equação 3.2}$$

onde:

$M_e$  = Massa específica do edifício ou do ambiente ( $\text{kg/m}^2$ );

$FR$  = Fator de resposta da edificação ou do ambiente (adimensional);

$q_a$  = Taxa do fluxo térmico devido à admitância (W/K);

$q_v$  = Taxa do fluxo térmico devido à ventilação (W/K);

$q_c$  = Taxa do fluxo térmico devido à condução (W/K).

Sendo que:

$$q_a = \sum_{i=1}^n (A \times Y)_i \quad \text{Equação 3.3}$$

onde:

A = Área da superfície “i” (m<sup>2</sup>);  
Y = Admitância da superfície “i” (W/m<sup>2</sup>.K).

$$q_v = 0,33 \times N \times V \quad \text{Equação 3.4}$$

onde:

N = Taxa de renovação de ar do edifício ou do ambiente (número de renovações por hora);  
V = Volume do edifício ou do ambiente (m<sup>3</sup>).

$$q_c = \sum_{i=1}^n (A \times U)_i \quad \text{Equação 3.5}$$

onde:

A = Área da superfície “i” (m<sup>2</sup>);  
U = Transmitância térmica da superfície “i” (W/m<sup>2</sup>.K).

Conforme indicado nas equações 3.1 a 3.5, o cálculo do fator de resposta depende, entre outros parâmetros, das propriedades térmicas dos componentes da envoltória, destacando-se a admitância e a transmitância térmica. A admitância é uma propriedade que define a habilidade do material ou construção para trocar calor com o ambiente interno, quando submetido a uma variação cíclica simples de temperatura. Considerando-se um ciclo de 24h, o cálculo da admitância de um componente sólido homogêneo<sup>2</sup> é determinado pela Equação 3.6.<sup>3</sup> (SZOKOLAY, 2008):

---

<sup>2</sup> O cálculo da admitância de componentes constituídos por mais de uma camada envolve maior complexidade, sendo adotado o procedimento formulado por Milbank e Harrington-Lynn (1974), descrito por Roriz (1996, p. 24-28) e também por Pinto (2002, p. 73-75). A norma ISO 13786 - Thermal performance of building components: Dynamic thermal characteristics: Calculation methods é estruturada com base no procedimento da admitância (ISO, 2007). Softwares como o Archipak e o ADMIT utilizam o mesmo procedimento para o cálculo da admitância (SZOKOLAY, 2008), assim como a planilha eletrônica UNI EN ISO 13786, desenvolvida por Casalena (2011).

<sup>3</sup> Na Equação 3.6, o termo  $\sqrt{\lambda \rho c}$  é denominado também efusividade térmica, simbolizado pela letra “b”. A efusividade térmica indica a capacidade do material para absorver e liberar calor, caracterizando a facilidade com que o calor é absorvido na superfície do material. É medida em W.s<sup>0,5</sup>/m<sup>2</sup>.K. (HASSID, S; GEROS, V, 2006)

$$Y = 0,5117 x \sqrt{\lambda x \rho x c} \quad \text{Equação 3.6}$$

onde:

- Y = Admitância da superfície (W/m<sup>2</sup>.K);  
 λ = Condutividade térmica (W/m.K);  
 ρ = Densidade do material (kg/m<sup>3</sup>);  
 c = calor específico (Wh/kg.K).

Uma vez calculados o fator de resposta e a massa específica, a inércia térmica do edifício ou ambiente é classificada de acordo com a Tabela 3.1. (SZOKOLAY, 2008):

**Tabela 3.1 – Classificação da inércia do ambiente em função da massa específica (M<sub>e</sub>) e do Fator de Resposta (FR)**

<b>Classificação da inércia</b>	<b>Massa específica - M<sub>e</sub></b>	<b>Fator de resposta - FR</b>
<b>Baixa</b>	< 150 kg/m <sup>2</sup>	< 3
<b>Média</b>	150 a 400 kg/m <sup>2</sup>	3 a 5
<b>Alta</b>	> 400 kg/m <sup>2</sup>	> 5

Szokolay (2007) afirma que o efeito da inércia é uma das mais importantes estratégias de condicionamento passivo, de modo que pode ser manipulada de acordo com as exigências climáticas locais, inclusive com o auxílio da ventilação noturna. Nesse sentido, as recomendações de Givoni (1997) citadas anteriormente são importantes para se identificar o potencial de uso da inércia térmica para resfriamento. Porém, indicam diretrizes gerais, que podem não representar adequadamente todas as possibilidades de incorporação da referida estratégia em projetos de arquitetura, especialmente quando combinada à ventilação noturna.

Sabendo-se que as variáveis climáticas e as variáveis arquitetônicas interferem diretamente no comportamento térmico de edificações que empregam a ventilação noturna, as pesquisas relacionadas ao tema buscam avaliar como e em que medida estas interferências ocorrem. Verifica-se que um maior número de estudos é direcionado aos edifícios comerciais, enquanto no caso do setor residencial predominam estudos de caso que fornecem dados teóricos e experimentais, correspondentes a contextos particulares e diferenciados (SANTAMOURIS et al., 2010).

### 3.1.1 Estudos desenvolvidos no Brasil

No Brasil, verifica-se que ainda são poucos os estudos relacionados ao aproveitamento da ventilação noturna e da inércia térmica para resfriamento.

As referências obtidas consistem em: i) uso de dados de medições *in loco* para avaliar o impacto do uso da inércia térmica sob condições específicas, associada ou não à ventilação noturna; ii) análises de dados meteorológicos a fim de obter indicações a respeito do potencial de aplicação dessas estratégias e iii) análise paramétrica desenvolvida a partir de simulações computacionais, calibradas a partir de dados medidos *in loco*, visando à otimização do uso da inércia térmica para resfriamento.

O estudo de Andrade (1996) enfocou o desempenho da inércia térmica como estratégia de resfriamento em residências localizadas em Florianópolis, SC. Entretanto, não foi investigado o impacto da ventilação noturna. As configurações construtivas analisadas caracterizavam-se pelo emprego de paredes externas duplas, de tijolos maciços aparentes (casa n° 01 casa n° 02) e paredes de tijolos furados (14 cm de espessura), rebocados em ambas as faces (casa n° 03). A autora efetuou medições de temperatura e velocidade do ar nos ambientes internos das casas n° 02 e n° 03, nos pavimentos térreos, em intervalos horários (08h às 20h). Estes dados foram utilizados para estimar o PMV e o PPD no interior dos ambientes, de acordo com a ISO 7730, em dois dias distintos. Nos dois dias considerados, quando os ambientes foram mantidos sem ventilação durante o período de medição, o PMV calculado para a casa n° 02, caracterizada por maior inércia, variou entre 1,2 e 1,6 (16/01) e entre 0,6 e 1,1 (18/02). Já na casa n° 03, caracterizada por menor inércia, os valores de PMV variaram entre 1,2 e 2,0 (16/01) e entre 0,7 e 1,4 (18/02). Com base apenas nestes resultados e considerando-se que a casa n° 02 apresentou temperaturas máximas inferiores às temperaturas máximas registradas na casa n° 03 (diferença de 3°C, em média), a autora conclui que a inércia térmica para resfriamento é uma estratégia eficiente, salientando que a associação da ventilação com o resfriamento da massa construtiva apresenta-se ainda como uma recomendação indefinida. Tal estudo apresenta evidências do impacto da inércia térmica no desempenho de ambientes residenciais no verão, porém demonstra a necessidade de um maior aprofundamento.

Papst (1999) deu continuidade à investigação sobre o uso da inércia térmica em Florianópolis, aprofundando a avaliação do potencial

desta estratégia durante o verão quente e úmido característico da cidade, e também sob condições de inverno. Para tal, efetuou medições horárias de temperatura em quatro residências entre os meses de abril a dezembro de 1998. As residências diferiam em sua forma, orientação, uso e em seus fechamentos laterais e cobertura, tanto em transmitância térmica quanto em capacidade térmica. Foram utilizados como critérios de análise a amplitude térmica, o amortecimento térmico, o atraso térmico, o grau médio e o total de horas de resfriamento ou aquecimento, em função de diferentes temperaturas base de conforto. Os resultados demonstraram que a edificação com maior capacidade térmica em seu fechamento lateral e uso de barreira radiante na cobertura apresentou melhor desempenho durante todo o período analisado. Por outro lado, a edificação que também possuía inércia térmica em seu fechamento lateral, mas sem isolamento na cobertura, apresentou o pior desempenho térmico nos meses de maior radiação, quando comparada à edificação com menos inércia térmica em sua envoltória, mas com barreira radiante na cobertura. Desse modo, a autora salienta que a inércia térmica pode apresentar um bom desempenho durante o verão, destacando as seguintes recomendações:

- O uso da inércia deve ser combinado com o isolamento térmico, sempre posicionado no exterior da edificação;
- Deve-se assegurar o sombreamento adequado no verão, mas deve-se permitir a incidência solar no inverno para promover o aquecimento passivo;
- A ventilação deve ser controlada nos períodos quentes, de modo que os ambientes sejam ventilados apenas quando a temperatura externa for inferior à interna;
- O emprego da inércia em ambientes de ocupação noturna deve ser acompanhado de uma ampla ventilação para possibilitar o resfriamento da envoltória.

O estudo de Papst (1999) destaca-se por reunir um conjunto de recomendações projetuais totalmente fundamentadas em dados de monitoramento coletados *in loco*, representativos do real comportamento térmico de residências em plena fase de ocupação e uso, caracterizadas por configurações construtivas distintas. Observa-se também que o emprego eficaz da inércia térmica, tanto para resfriamento quanto para aquecimento, deve levar em consideração o padrão de ocupação do ambiente (uso diurno ou noturno). Outro aspecto

importante é o papel da ventilação: prejudicial quando aplicada indiscriminadamente no verão, ou complemento fundamental para garantir o resfriamento efetivo no período noturno. Nesse sentido, pode-se afirmar que o papel da ventilação também está vinculado aos padrões de ocupação dos ambientes residenciais, visto que os usuários operam as aberturas em função da sua percepção do conforto. Portanto, o emprego eficaz da inércia térmica não depende apenas das soluções de projeto, mas também de como e quando os diferentes ambientes da edificação são ocupados.

Também em Florianópolis, Goulart (2004) aprofundou o estudo acerca do emprego da inércia térmica como estratégia de resfriamento para residências em sua tese de doutorado. Para tal, utilizou dados de monitoramento *in loco* realizados em quatro residências, caracterizadas pelos seguintes sistemas construtivos: 1) paredes de blocos de concreto maciço e cobertura cerâmica com laje; 2) paredes simples de tijolo maciço e cobertura cerâmica com forro de madeira; 3) alvenaria de pedra e cobertura de amianto com laje de concreto e 4) paredes duplas de madeira com cobertura cerâmica e forro de madeira. Foram desenvolvidas simulações computacionais de um modelo representativo da residência 1, caracterizada pela maior inércia térmica, com o programa TAS v. 8.4. Com base nos resultados das simulações, a autora desenvolveu uma série de estudos paramétricos e análises de correlação. Foram consideradas relevantes as seguintes variáveis: taxas de renovação de ar aplicadas aos ambientes internos, durante o dia e à noite; dimensões e condições de sombreamento das aberturas; valores de inércia térmica das paredes e das coberturas, representados pelos valores de admitância e efusividade de cada componente construtivo. Observou-se que a correlação entre a temperatura interna e a temperatura externa média é maior quando são empregados componentes construtivos com maior inércia. Além disso, pôde-se identificar o efeito da interação destes parâmetros em função dos somatórios de graus-hora de resfriamento obtidos (temperaturas base iguais a 27°C e 29°C). Dentre as principais conclusões obtidas, são apontadas as seguintes:

- O uso conjunto da ventilação noturna, do sombreamento das aberturas e de barreiras radiantes na cobertura em ambientes constituídos por paredes com inércia elevada resulta em um desempenho térmico superior a configurações construtivas que empregam paredes leves;

- A influência da ventilação nos períodos quentes é minimizada quando as aberturas são adequadamente sombreadas. Porém, torna-se prejudicial caso o período de aplicação ultrapasse cinco horas por dia.

As análises desenvolvidas por Goulart (2004) ampliam o escopo da investigação desenvolvida pelos trabalhos anteriores, inclusive a respeito da ventilação noturna. Segundo a autora, a ventilação noturna é a estratégia bioclimática prioritária para edificações caracterizadas por elevada inércia térmica, submetidas clima de Florianópolis. Com o emprego da ventilação natural à noite, o somatório de graus-hora de resfriamento do ambiente (temperatura base igual a 29°C) foi reduzido em até 23,5% em relação ao caso base simulado sem ventilação noturna. Já com o emprego da ventilação mecânica, com taxa de renovação igual a 30 renovações por hora, obteve-se uma redução de até 32,6% no somatório de graus-hora de resfriamento do ambiente.

Dornelles (2004) investigou os efeitos da inércia térmica sobre as temperaturas internas de sete edificações residenciais localizadas na cidade de São Carlos, SP, cujo clima é classificado como semi-úmido, com inverno frio e seco e verão quente e úmido. As edificações foram monitoradas nos meses de setembro, outubro e novembro de 2002 e março de 2003 e apresentavam diferentes níveis de inércia térmica, classificadas em função do Fator de Resposta (FR) de cada caso monitorado. As edificações classificadas com inércia baixa apresentaram os maiores somatórios de graus-hora de resfriamento no dia típico de verão, variando entre 69,2 Kh e 96,7 Kh<sup>4</sup>. Nas configurações com inércia alta e média, os somatórios variaram entre 0,4 Kh e 41,4 Kh. No período de verão, os resultados indicaram que a ventilação seletiva à noite permite trocas de ar, o que reduz as temperaturas internas para valores próximos aos intervalos de conforto considerados: 23°C a 29°C no período diurno e 17°C a 23°C no período noturno. Entretanto, a autora salienta que a eficácia da inércia térmica como estratégia de resfriamento está diretamente relacionada ao sombreamento das fachadas e aberturas, a fim de reduzir os ganhos de calor solar, conclusões semelhantes àquelas obtidas por Goulart (2004) para Florianópolis.

---

<sup>4</sup> O cálculo dos somatórios de graus-hora de resfriamento foi efetuado em função de limites diferenciados para o dia e para a noite, os quais foram respectivamente iguais a 29°C e 23°C. Tais limites foram estabelecidos após estudo desenvolvido com as Planilhas de Mahoney (DORNELES, 2004, p. 103-104).

Batista (2006) utilizou dados de temperatura registrados no interior de residências unifamiliares localizadas em Santana do Ipanema, no semi-árido alagoano, para avaliar o potencial da ventilação noturna associada à massa térmica para resfriamento, apenas com base nos limites de aplicação propostos por Givoni (1994): temperatura máxima externa inferior a 36°C durante o dia e inferior a 20°C durante a noite. Foram analisadas as temperaturas de duas residências, ambas constituídas por paredes de tijolos maciços ( $U = 2,25 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$  e  $\phi = 6,8\text{h}$ ). A edificação R1, térrea, representativa da tipologia de casa em fita, típica da cidade, possuía cobertura de telha cerâmica sem forro ( $U = 4,55 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$  e  $\phi = 0,3\text{h}$ ). Na edificação R2, que possuía dois pavimentos, foi monitorado um ambiente térreo, com fachadas orientadas a Oeste e Sul. Considerando-se o período de monitoramento compreendido entre 29/01 e 03/03/2005 (35 dias), verificou-se que as temperaturas máximas externas mantiveram-se inferiores a 36°C em apenas cinco dias, enquanto que a temperatura externa mínima obtida durante todo o período foi igual a 24° C. De acordo com os resultados desse monitoramento, o uso da massa térmica para resfriamento não representaria uma estratégia eficaz para o clima local<sup>5</sup>, visto que as temperaturas externas apresentaram valores elevados, o que dificultaria o resfriamento da envoltória. Por outro lado, identificou-se um significativo potencial de aplicação da ventilação noturna no intervalo das 0h às 6h, visto que a temperatura externa manteve-se simultaneamente inferior a 28°C e à temperatura interna da edificação R1 durante 80% deste intervalo, enquanto que na edificação R2 tais condições foram verificadas em 100% deste intervalo.

Pereira (2009) empregou simulações computacionais para investigar a influência do envelope construtivo sobre o desempenho térmico de residências ocupadas e naturalmente ventiladas em Florianópolis, utilizando um modelo calibrado a partir de dados obtidos no monitoramento da Casa Eficiente, a mesma residência experimental que é objeto de estudo desta tese. O programa computacional utilizado foi o EnergyPlus v. 2.2.0. Nas simulações, a autora utilizou modelos com geometria semelhante à Casa Eficiente, variando-se as propriedades

---

<sup>5</sup> Diante da indisponibilidade de séries históricas de dados climáticos para a cidade de Santana do Ipanema, a temperatura média externa do mês de fevereiro de 2005 registrada durante o monitoramento *in loco* foi considerada representativa do período após comparação com dados das normais climatológicas de outras cidades próximas localizadas na zona bioclimática 7 (Paulo Afonso e Arcoverde, na Bahia e Cabrobó e Floresta, em Pernambuco). Com 83% de confiabilidade, não se pode afirmar que a média obtida a partir dos dados do monitoramento não seja representativa da série histórica (BATISTA, 2006, p. 76).

térmicas da envoltória e adotando-se um padrão de ventilação natural para os quartos no qual as janelas eram mantidas abertas entre as 6h e 21h no verão e entre as 12h e 15h no inverno. Também foram realizadas simulações nas quais os ambientes foram mantidos fechados e desocupados, sem ventilação natural. Com o auxílio do programa computacional Analysis Bio, foi determinado o percentual de horas de desconforto para cada um dos treze modelos simulados, considerando-se a zona de conforto proposta por Givoni (1992). Nas simulações com ventilação natural, os menores percentuais de desconforto foram obtidos para o modelo constituído por paredes duplas de tijolo maciço, com isolamento intermediário de lã de rocha, e cobertura cerâmica com forro de madeira. Este foi o modelo caracterizado pela maior capacidade térmica equivalente<sup>6</sup>, cujas paredes apresentavam o maior atraso térmico (9,1 h) e os percentuais de desconforto obtidos foram iguais a 57,4% (anual) e 55% (no verão). Observou-se também que há uma correlação entre o percentual de horas de desconforto e a capacidade térmica equivalente do ambiente, sendo que o emprego de configurações construtivas com maior capacidade térmica e atraso térmico apresentaram tendência a menores percentuais de desconforto durante o verão. Foram obtidos coeficientes de determinação ( $R^2$ ) iguais a 0,81, para o ambiente desocupado e sem ventilação, e 0,75, para o ambiente ventilado e ocupado.

Sorgato (2009) aprofundou o estudo sobre a influência da envoltória no desempenho térmico de residências em Florianópolis. Em sua dissertação de mestrado, utilizou o programa EnergyPlus v. 3.1.0 para desenvolver simulações de quatro configurações construtivas, submetidas à ventilação natural, caracterizadas por inércias distintas, variando as áreas de superfícies expostas ao exterior e o tamanho dos ambientes. Foram calculados os somatórios de graus-hora de resfriamento em relação a uma temperatura base igual a 26°C, os quais foram correlacionados com as propriedades térmicas das envoltórias simuladas. Os resultados indicaram que as residências que possuíam vedações caracterizadas por atrasos térmicos superiores aos valores recomendados pela NBR 15220-3 (ABNT, 2005b) apresentaram menores somatórios de graus-hora de resfriamento, quando a ventilação seletiva foi aplicada (ambiente ventilado apenas quando a temperatura

---

<sup>6</sup> Capacidade térmica do ambiente, obtida a partir da ponderação das capacidades térmicas de cada componente construtivo de acordo com as respectivas áreas superficiais (paredes externas e internas, janelas, cobertura e piso).

do ar fosse maior ou igual a temperatura de *set-point*, ou maior ou igual a temperatura externa).

Os resultados de Pereira (2009) demonstram a possibilidade de se obter melhor desempenho térmico com o uso de vedações pesadas em Florianópolis, no verão e também no inverno, em comparação com tipologias construtivas dotadas de inércia mais baixa. Entretanto, como a própria autora salienta, este desempenho pode ser aperfeiçoado com a ventilação seletiva. Sorgato (2009), por sua vez, desenvolveu suas análises considerando a aplicação da ventilação seletiva e obteve melhores resultados com o emprego de paredes e coberturas mais pesadas (maiores atrasos térmicos). Entretanto, ambos os trabalhos não abordaram diretamente o efeito da ventilação noturna, avaliando o impacto exclusivo desta estratégia no desempenho térmico dos ambientes.

Passos (2009) desenvolveu uma análise do potencial de emprego de estratégias bioclimáticas no setor residencial para três cidades distintas em Alagoas: Maceió, Palmeira dos Índios e Pão de Açúcar. Com base na análise estatística de séries de dados históricos de temperatura, umidade, velocidade e direção dos ventos, traçou o perfil climático dessas cidades e determinou o ano climático de referência (Test Reference Year) de cada uma. Utilizando uma base de dados consistente e considerando os limites de aplicabilidade da inércia térmica para resfriamento e ventilação noturna definidos por Givoni (1992), a autora obteve resultados divergentes daqueles obtidos por Batista (2006) em Santana do Ipanema. Verificou-se que ambas as estratégias apresentam um significativo potencial de aplicação nas cidades de Palmeira dos Índios (agreste) e Pão de Açúcar (sertão), em virtude das amplitudes diurnas nessas cidades superarem os 13°C no verão. Nessas cidades, o emprego da ventilação noturna é recomendável a partir das 21h e durante toda a madrugada, porém requer cautela, pois em determinados períodos do ano, pode proporcionar desconforto por frio. Portanto, a admissão da ventilação noturna deve ser realizada de preferência por meio de dispositivos controláveis, que possam ser devidamente desativados durante a estação fria.

Os estudos ora descritos apresentam resultados importantes, entretanto demonstram que ainda existem lacunas quanto à avaliação do potencial da ventilação noturna e inércia térmica. O emprego de vedações pesadas afeta a resposta da envoltória às variações climáticas externas, resultando no incremento dos atrasos e amortecimentos térmicos em relação às edificações constituídas por vedações leves. Particularmente com relação ao atraso térmico, é importante que as

temperaturas internas mais elevadas não excedam o limite de conforto térmico, nem ocorram durante os períodos de maior ocupação do ambiente, o que se tornaria uma desvantagem. Portanto, um dos aspectos que carece de investigação diz respeito ao efeito combinado da inércia e ventilação no desempenho térmico de residências, em diferentes períodos diurnos. Desse modo, torna-se possível relacionar a aplicabilidade dessas estratégias em edificações com os diferentes padrões de ocupação que os ambientes podem apresentar, visando o atendimento das exigências de conforto térmico dos seus usuários.

### 3.1.2 Experiências internacionais

No cenário internacional, as principais temáticas abordadas dizem respeito ao desenvolvimento de métodos de análise dos dados obtidos em campo, a formulação de modelos preditivos e a indicação de parâmetros de desempenho.

Dados de monitoramento *in loco* das variáveis ambientais, registrados durante experimentos de campo realizados em protótipos ou edificações reais, com o intuito de testar a aplicação da ventilação noturna associada ao uso da massa térmica para resfriamento, representam uma importante fonte de informação a respeito da eficácia da estratégia. Além disso, estes dados podem ser utilizados para posterior calibração de simulações computacionais, conforme será discutido mais adiante. Outra possibilidade é utilizar o monitoramento como forma de identificar alternativas de melhoria do desempenho térmico da edificação, analisando-se a viabilidade de determinadas modificações no projeto ou em suas condições operacionais.

Outra vertente de pesquisa dedica-se à formulação de modelos preditivos. Estes podem ser baseados em dados de monitoramento *in loco*, em estimativas da variação das condições de temperatura externa e interna, ou ainda podem ser derivados dos resultados de simulações computacionais do desempenho termo-energético do edifício. Mecanismos de predição podem ser úteis para relacionar o uso de uma estratégia de condicionamento passivo com as condições climáticas particulares de um determinado local.

Givoni (1998) apresentou um estudo desenvolvido com base no monitoramento de dois edifícios na Califórnia<sup>7</sup>, caracterizados por

---

<sup>7</sup> O autor não esclarece qual o tipo de uso dos edifícios analisados, apenas afirma que ambos possuem planta baixa idêntica (23 m<sup>2</sup> de área total), dois ambientes internos e uma área total de abertura igual a 4,6 m<sup>2</sup>, subdividida igualmente entre as quatro fachadas (GIVONI, 1998, p.25).

diferentes níveis de massa térmica, classificadas como baixa, e alta. Os edifícios foram monitorados durante o verão, avaliando-se o impacto da ventilação mecânica noturna sob duas situações: considerando-se as janelas fechadas e sombreadas durante o dia, ou abertas à ventilação natural dia e noite, sem sombreamento. Observou-se que o uso da ventilação noturna no edifício com maior massa térmica resultou em amortecimentos da temperatura máxima externa superiores a 10°C. Já no edifício com inércia baixa, o maior amortecimento obtido foi correspondente a 5°C. Entretanto, em alguns casos, a combinação desses recursos não surtiu efeito positivo na temperatura diurna. A ausência de sombreamento nos edifícios que possuíam maior massa construtiva resultou em temperaturas diurnas desconfortáveis, devido aos ganhos solares. A partir desse estudo Givoni formulou um modelo matemático para estimar a temperatura máxima interna em função da temperatura média externa, visto que estas variáveis apresentaram uma boa correlação durante as medições. Este modelo é representado pela Equação 3.7:

$$T_{max} = GT_{med} + DelT + k (T_{med} - GT_{med}) \quad \text{Equação 3.7}$$

onde:

$T_{max}$  = Temperatura máxima interna diária;

$GT_{med}$  = Grande média, ou temperatura média externa correspondente a todo o período da série;

$DelT$  = Elevação média da temperatura máxima interna em relação à temperatura média externa;

$T_{med}$  = Temperatura média externa em um dia particular;

$k$  = Razão entre as taxas de alteração diária da temperatura máxima interna e a taxa de alteração da temperatura média externa, dependendo do nível de massa térmica.

Utilizando protótipos em escala reduzida, Cheng et al. (2005) desenvolveram uma série de experimentos para avaliar o efeito da cor do envelope construtivo e do uso da massa térmica sobre as temperaturas internas no clima quente e úmido de Hong Kong. Para tal, efetuaram duas séries de medições de temperatura e incidência da radiação solar em três protótipos, dois deles pintados nas cores branca e preta, cujas absorptâncias foram respectivamente iguais a 0,25 e 0,80. O terceiro protótipo, também pintado na cor branca e subdividido em quatro câmaras internas, foi utilizado para avaliar o efeito da massa

térmica sob quatro orientações distintas (Norte, Sul, Leste e Oeste). Na segunda série de medições, a constituição das paredes dos protótipos foi modificada, aumentando sua inércia térmica. Os resultados indicaram que a temperatura máxima obtida nos protótipos pintados na cor preta superou em até 10°C as temperaturas obtidas nos protótipos pintados de branco. Nos protótipos com maior inércia, a adição da massa térmica também reduziu a temperatura interna máxima, porém aumentou a temperatura interna mínima e também reduziu a sensibilidade à cor da superfície. Além disso, nesses casos, verificou-se uma melhor correlação entre a temperatura interna e a temperatura média externa do que nos protótipos caracterizados por menor inércia. Com relação à orientação solar, observou-se que a maior massa térmica suprimiu as distinções entre as quatro orientações quanto à variação da temperatura interna, exceto na câmara orientada a Oeste, que obteve temperaturas mais elevadas em relação às demais orientações no final da tarde.

Considerando-se o microclima urbano, Geros et al. (2005) verificaram o impacto do entorno edificado no desempenho de técnicas de ventilação noturna aplicadas a edifícios não condicionados, localizados em *canyons* urbanos<sup>8</sup> na cidade de Atenas. Utilizando os dados microclimáticos registrados *in loco* em dez *canyons* urbanos distintos, os autores desenvolveram simulações computacionais de ambientes naturalmente ventilados à noite com o auxílio do programa TRNSYS<sup>9</sup>. Observou-se que a perda do calor acumulado na massa construtiva no período noturno foi obstruída pelas superfícies dos edifícios do entorno. As modificações na incidência do vento devido à rugosidade do solo e a redução em sua velocidade também dificultaram a redução das temperaturas durante a noite, que se mantiveram, em média, 4°C acima das temperaturas registradas em áreas fora dos *canyons* urbanos estudados.

A seguir, serão apresentados estudos referentes a edificações comerciais, nos quais a ventilação noturna é uma estratégia recorrente para promover a diminuição da carga térmica em edifícios condicionados artificialmente. No item 3.1.2.2, serão apresentados estudos desenvolvidos em edificações residenciais, foco deste trabalho, as quais estão situadas em localidades com clima quente e úmido.

---

<sup>8</sup> Os *canyons* urbanos são áreas densamente edificadas nas grandes cidades, caracterizadas pela existência de edifícios altos e próximos entre si, acarretando em alterações microclimáticas devido à mudança no percurso dos ventos e à geração de calor antropogênico.

<sup>9</sup> Os ambientes simulados empregavam condicionamento artificial durante o dia (intervalo das 9h às 18h) e a temperatura de *set-point* do equipamento era igual a 27°C (GEROS et al., 2005, p. 251).

### 3.1.2.1 Edificações comerciais

Geros et al. (1999) desenvolveram uma avaliação experimental da ventilação noturna em três edifícios comerciais em Atenas, durante o verão. Dois desses edifícios eram condicionados artificialmente e o outro não. A ventilação noturna foi aplicada entre 22h e 6h em todos, obtendo-se dados que depois serviram como referência para a calibração de modelos computacionais simulados com o auxílio do programa TRNSYS. Uma vez calibrados, estes modelos foram utilizados para identificar o número de horas de sobreaquecimento no verão, que corresponde ao total de horas nas quais as temperaturas internas excediam a temperatura base pré-estabelecida. Este número de horas foi estimado considerando-se três temperaturas base: 25°C, 26°C e 29°C. No caso do edifício não condicionado, os resultados obtidos com o emprego da ventilação noturna indicaram reduções no número de horas de sobreaquecimento da ordem de 39% (para taxas iguais a 10 renovações/h) até 96% (para taxas iguais a 30 renovações/h). Nos edifícios condicionados, considerando-se as mesmas taxas de renovação do ar, o número de horas de sobreaquecimento foi reduzido de 48% a 94% em relação à condição inicial (sem ventilação noturna). Ao utilizar os resultados do monitoramento para calibrar as simulações, observou-se a necessidade de reduzir os valores das taxas de renovação de ar inseridas como dado de entrada. Ao inserir os dados medidos *in loco*, os resultados não foram correspondentes com as temperaturas do ar medidas. Os autores concluíram que em dadas situações não há um bom rendimento das trocas convectivas entre as superfícies e o ar. Ou seja, existe uma parcela ativa da taxa de renovação de ar, que realmente contribui para a redução da temperatura da massa construtiva, a qual foi bastante inferior aos valores medidos. Com base nessas observações, foi definido o conceito de fluxo de ar útil da ventilação noturna (Q), que representa o quociente entre o número de renovações de ar por hora simulado e medido. O valor médio de Q em 96% dos casos foi igual a 0,3, indicando um rendimento de 30% das trocas convectivas entre as superfícies e o ar.

Ghiaus e Allard (2006) propõem um método para estimar o potencial de resfriamento associado à ventilação, quer esta seja empregada por meios naturais ou sistemas mecânicos. O objetivo também é determinar o número de graus-hora de resfriamento, porém ao invés de se definir uma temperatura base fixa, o limite para a temperatura interna é a temperatura *free-running* ( $T_{fr}$ ), ou seja, a própria temperatura do ambiente interno, que é influenciada pela temperatura

externa e pelos ganhos e perdas de calor aos quais a edificação está submetida. A partir da diferença entre a  $T_{fr}$  e a temperatura média externa do período de análise considerado ( $T_o$ ), obtém-se o parâmetro denominado *diferença de temperatura em free-running* ( $T_{diff}$ )<sup>10</sup>, matematicamente expresso por (Equação 3.8):

$$T_{diff} = T_{fr} - T_o \quad \text{Equação 3.8}$$

onde:

$T_{diff}$  = Diferença de temperatura em free-running (K);

$T_{fr}$  = Temperatura free-running (K);

$T_o$  = Temperatura externa (K).

Para o estudo em questão, os valores de  $T_{diff}$ , obtidos a partir de simulação computacional, foram compilados em uma base de dados europeia, que reúne valores desse parâmetro para diferentes tipos de edifícios, localizados em diferentes pontos da Europa. Selecionando-se o valor de  $T_{diff}$  mais adequado à tipologia do edifício em análise e definindo-se a localização da edificação, o número de graus-hora de resfriamento é calculado considerando-se também as seguintes variáveis:

- 1) Valor da temperatura média externa para o período considerado ( $T_o$ );
- 2) Probabilidade de ocorrência de  $T_o$ ;
- 3) Limite superior da temperatura de conforto, definida de acordo com o princípio adaptativo (aplicação da ASHRAE Standard 55).

Os valores de  $T_o$  e sua correspondente probabilidade são definidos a partir de dados meteorológicos, calculando-se a distribuição probabilística da temperatura para diferentes horas do dia (0, 6, 12 e 18h). Os graus-hora de resfriamento são contabilizados sempre que o valor de  $T_{fr}$  for maior do que o limite superior da zona de conforto, juntamente com o valor da temperatura externa considerada para o período. Ou seja, se ambas as temperaturas interna e externa estiverem

---

<sup>10</sup> Segundo os autores, para a aplicação do método é necessário calcular a diferença entre a temperatura interna e a temperatura externa para cada hora considerada, em todos os dias do ano, calculando-se os valores médios diários correspondentes a cada mês.

acima do limite de conforto considerado, a ventilação não poderá promover resfriamento. Nesses casos, torna-se necessário o emprego do resfriamento artificial. A Equação 3.9 é utilizada para o cálculo do número de graus-hora de resfriamento em ambientes que empregam a ventilação natural:

$$DH_{mc}(T_o) = N \cdot T_{bin} \cdot P_{df}(T_o) \cdot (T_{diff} + T_o - T_{cu}) \cdot \delta_{fc} \quad \text{Equação 3.9}$$

onde:

$DH_{mc}(T_o)$  = Graus-hora de resfriamento em função da temperatura externa ( $T_o$ ) [Kh];

$T_{bin}$  = Temperatura bin [K]<sup>11</sup>;

$P_{df}(T_o)$  = Probabilidade de ocorrência da temperatura externa ( $T_o$ ) (adimensional);

$T_{diff}$  = Diferença entre a temperatura interna (*free-running*) e a temperatura externa [K];

$T_{cu}$  = Limite superior da zona de conforto [K];

$\delta_{mc}$  = Critério de aplicação da ventilação natural:

$$\left\{ \begin{array}{l} \delta_{fc} = 1 \quad \text{se } T_{fr} > T_{cu} \text{ e } T_o < T_{cu} \\ \delta_{fc} = 0 \quad \text{caso a condição acima não seja obedecida} \end{array} \right\}$$

Após o cálculo dos graus-hora de resfriamento para cada horário considerado, o potencial de economia de energia pode ser estimado a partir da comparação das integrais das distribuições de graus-hora de resfriamento. Uma vez que o limite superior da zona de conforto também varia nos diferentes horários e nos diferentes meses, o somatório de graus-hora é calculado de modo tal que favorece o máximo aproveitamento do potencial de resfriamento da ventilação natural.

Finn et al. (2007) realizaram o monitoramento de uma biblioteca localizada no litoral da Irlanda, onde a ventilação mecânica era empregada dia e noite. Os dados do monitoramento *in loco* foram utilizados como referência para a calibração de um modelo de simulação computacional do edifício. O processo de calibração foi necessário para ajustar os valores simulados e medidos, de modo que o modelo computacional fôsse uma representação confiável do desempenho térmico da edificação. No referido estudo, foi desenvolvida uma análise de sensibilidade da edificação com o auxílio do programa ESP-r,

---

<sup>11</sup> Os dados de temperatura bin ( $T_{bin}$ ) consistem de números de horas em que a temperatura externa se encontra dentro de um intervalo específico (bin).

verificando-se o efeito do aumento da massa térmica, do número de renovações de ar e da redução das cargas térmicas internas. O impacto de tais medidas se refletiu na redução das temperaturas máximas internas, decorrente principalmente do aumento da massa térmica: 2°C a 3°C. O estudo demonstrou também que para taxas de renovação entre 10 e 20 renovações/h, a ventilação noturna contribui para o resfriamento da temperatura de modo mais efetivo. Acima de 20 renovações/h não foram identificados benefícios significativos.

Artmann et al. (2007) desenvolveram um método para avaliar o potencial de aplicação da ventilação noturna em edifícios de escritórios com base em dados microclimáticos, para diversas regiões da Europa, denominando-o “Potencial de resfriamento climático” (Climatic Cooling Potential – CCP). Assumiu-se um modelo genérico do comportamento da temperatura no interior de uma edificação hipotética, caracterizado como uma oscilação harmônica. O critério de aplicação da estratégia se baseia na diferença entre a temperatura externa (dado climático) e a temperatura interna: sempre que esta diferença é maior ou igual a 3K ( $\Delta T_{crit}$  = diferença crítica), valor considerado suficiente para que a ventilação noturna promova o resfriamento através da convecção, admite-se a aplicação da estratégia. Portanto, o CCP representa o somatório de graus-horas de resfriamento que podem ser removidos pelas trocas convectivas entre o ar externo e o ar interno durante o período considerado. Matematicamente, sua formulação é indicada pela Equação 3.10:

$$CCP = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \sum_{h=h_i}^{h_f} m_{n,h} (T_{b,n,h} - T_{e,n,h}) \quad \text{Equação 3.10}$$

onde:

CCP = Climatic Cooling Potential (graus-hora de resfriamento removidos pela ventilação noturna, °Ch);

N = Número de noites (adimensional);

$h_i$  = Horário inicial da ventilação noturna (h);

$h_f$  = Horário final da ventilação noturna (h);

$T_b$  = Temperatura interna (°C);

$T_e$  = Temperatura externa (°C);

m = Critério de aplicação da ventilação noturna:

$$\left\{ \begin{array}{ll} m = 1h & \text{se } T_b - T_e \geq \Delta T_{crit} \\ m = 0 & \text{se } T_b - T_e < \Delta T_{crit} \end{array} \right\} (h).$$

Os impactos das transformações do clima sobre o potencial da ventilação noturna também são alvo de estudos. Artmann et al. (2008) aplicaram o método de estimativa do CCP em um estudo posterior, porém levantando outra discussão: o impacto do aquecimento global sobre o potencial de aplicação da ventilação noturna. Com base em projeções de aumento na temperatura em diversas localidades na Europa (estimadas entre 1,3°C e 5,5°C), desenvolveram diversos cenários climáticos, considerando-se as expectativas de adaptabilidade das condições de temperatura globais às altas concentrações de CO<sub>2</sub> na atmosfera. Embora admitam a existência de incerteza acerca dessas projeções, o estudo identificou a possibilidade de decréscimo no potencial de resfriamento por ventilação noturna, principalmente em latitudes baixas, durante o verão, em função da elevação da temperatura do ar nesses locais.

### 3.1.2.2 Edificações residenciais

Experimentos de campo realizados em edificações residenciais demonstram aspectos importantes com relação ao emprego da ventilação noturna, especialmente em climas quentes e úmidos.

Na China, Carrilho da Graça et al. (2002) utilizaram simulações computacionais para avaliar o desempenho de sistemas de ventilação em edifícios de apartamentos em duas cidades: Xangai, caracterizada pelo verão quente e úmido, com maior umidade e menor amplitude de temperatura em relação a Pequim, que apresenta inverno frio e menos úmido que Xangai. A partir de simulações com CFD, os autores obtiveram as velocidades do ar no interior e no entorno da edificação, assim como as taxas de renovação de ar dos ambientes internos. Ao comparar os percentuais de horas de desconforto e os valores máximos da temperatura interna, obtidos em função de diferentes padrões de ventilação (diurna ou noturna), concluíram que a ventilação noturna propiciou o alcance do melhor desempenho térmico, porém com distinções entre as duas cidades. Sob os mesmos padrões de ventilação diurna, o total de horas de desconforto foi reduzido pela metade em Pequim, quando a ventilação noturna foi empregada. Já em Xangai a diferença foi pequena e a redução na temperatura interna média foi de apenas 0,9 K. Além disso, identificou-se risco de condensação nas superfícies internas, devido à umidade relativa alta à noite e o ponto de orvalho menor durante o dia.

Liping e Hien (2007) desenvolveram um estudo em residências no clima quente e úmido de Cingapura, simulando configurações

construtivas com vedações leves e pesadas com o *software* TAS. Nas simulações, consideraram diferentes padrões de ventilação: 1) apenas renovação do ar para fins de salubridade (taxa de uma renovação por hora, 24h por dia); 2) ventilação natural 24h por dia; 3) ventilação diurna entre 7h e 18h e 4) ventilação noturna entre 18h e 7h. O critério de análise utilizado foi o PMV. Os resultados demonstraram que as construções não isoladas com massa térmica apresentaram-se como soluções ideais para edificações naturalmente ventiladas, superando o desempenho alcançado pela configuração com menor inércia, quando esta foi associada ao padrão de ventilação 24h por dia (padrão 2). Por outro lado, em relação à ventilação diurna (padrão 3), o padrão de ventilação 4 apresentou melhores resultados quando a temperatura máxima à noite manteve uma diferença de  $-7^{\circ}\text{C}$  a  $-8^{\circ}\text{C}$  em relação a temperatura diurna.

Kubota et al. (2009) desenvolveram um estudo em residências típicas do clima quente e úmido na Malásia e verificaram uma redução de  $2,5^{\circ}\text{C}$  na temperatura máxima e de  $2^{\circ}\text{C}$  na temperatura média durante a noite quando a ventilação noturna foi empregada. Utilizaram também como critérios de análise a temperatura operativa e a temperatura efetiva de conforto (SET\*), que possibilita contabilizar o efeito das perdas de calor por evaporação, as quais estão relacionadas aos ocupantes dos ambientes internos. Segundo os autores, caso a ventilação noturna possa ser garantida através da exaustão mecânica do ar (manutenção de uma taxa contínua de renovação do ar), as condições de conforto nos ambientes internos podem se tornar mais satisfatórias também durante o período diurno, conforme indicado pelos registros da temperatura operativa, mesmo quando comparadas a temperaturas de edificações constituídas por vedações leves e naturalmente ventiladas durante o dia. Entretanto, observaram a ocorrência de desconforto no período da tarde, o que foi relacionado à necessidade de um maior isolamento térmico na cobertura e ao sombreamento adequado das aberturas. Já a análise realizada com base na temperatura SET\* indicou a necessidade de desumidificação do ar quando as janelas foram mantidas fechadas no período diurno e a ventilação noturna foi empregada, pois com isso a umidade relativa do ar atingiu níveis elevados, em decorrência da presença de pessoas nos ambientes durante o dia. Portanto, a ventilação natural durante o período diurno se configurou como a melhor opção no caso de ambientes ocupados nesses horários.

Ambos os estudos de Kubota et al. (2009) e Carrilho da Graça et al. (2002) demonstram a importância de uma análise ampla da

contribuição da ventilação noturna, considerando-se o efeito do seu emprego na temperatura e também na umidade relativa do ar, nos diferentes períodos do dia. Já o estudo de Liping e Hien (2007) demonstra que o desempenho de configurações construtivas com inércia térmica alta pode ser equivalente ao desempenho de configurações com inércia leve e sujeitas à ventilação cruzada em climas quentes e úmidos.

Em outro estudo, Santamouris et al. (2010) reuniram dados de 214 habitações unifamiliares gregas que faziam uso do condicionamento artificial, com áreas variando entre  $55 \text{ m}^2$  e  $480 \text{ m}^2$ , e avaliaram qual seria a contribuição da ventilação noturna para a redução da carga térmica. O método de pesquisa aplicado foi subdividido em etapas. Inicialmente, os dados relativos ao consumo de energia dessas edificações foram obtidos, sendo que em dez delas a ventilação noturna foi aplicada, monitorando-se as taxas de renovação de ar, o consumo de energia e a qualidade do ar nos ambientes internos. Durante o monitoramento, as temperaturas médias externas no período noturno variaram entre  $24^\circ\text{C}$  e  $24,8^\circ\text{C}$ . Na sequência, foram desenvolvidas simulações computacionais do desempenho termo-energético com o programa TRNSYS, que foram validadas a partir de comparações com os dados do monitoramento. Após a validação, todas as 214 edificações foram simuladas, considerando-se os mesmos padrões de ocupação. A carga térmica de resfriamento foi estimada para uma temperatura base igual a  $26^\circ\text{C}$ , com e sem o emprego da ventilação noturna. A comparação entre esses dois resultados demonstrou que a ventilação noturna promoveu uma redução superior a  $40 \text{ kWh/m}^2/\text{ano}$  na carga térmica de alguns edifícios, de acordo com o número de trocas de ar por hora, tendo sido obtida uma redução média correspondente a  $12 \text{ kWh/m}^2/\text{ano}$ . Proporcionalmente, a contribuição da ventilação noturna correspondeu a uma redução de 10% a 40% na carga térmica inicial dos edifícios analisados. Outro indicador considerado na análise foi a relação entre a redução da carga térmica e a taxa de renovação de ar, ou seja, quantos kWh poderiam ser diminuídos da carga térmica original para cada  $\text{m}^2$  de área interna, para cada troca de ar realizada em uma hora, durante um ano. Observou-se que para taxas de renovação de ar maiores, a redução da carga térmica correspondente a cada troca de ar proporcionada pela ventilação noturna decrescia, tendo sido obtidos os seguintes resultados: 3,3; 2,5; 1,8; 1,2 e  $0,7 \text{ kWh/m}^2/\text{ano}$ , para taxas de renovação correspondentes a 2; 5; 10; 20 e 30 renovações por hora, respectivamente. Por outro lado, observou-se que para maiores taxas de

renovação do ar, menores eram as incertezas associadas à magnitude da contribuição da ventilação noturna para a redução da carga térmica.

A análise do desempenho da edificação a partir do balanço térmico dos ambientes internos possibilita uma avaliação comparativa entre diferentes soluções projetuais, no que diz respeito às combinações de componentes construtivos e estratégias de condicionamento. No caso dos estudos de Santamouris et al. (2010) e Ghiaus e Allard (2006), anteriormente relatados, foi dado enfoque à ventilação e à massa térmica para resfriamento, tendo sido avaliados os seguintes aspectos: i) a influência do clima; ii) a influência da forma e constituição da envoltória; iii) a questão do conforto. Tais questões são relativizadas e identificadas separadamente. As duas primeiras se apresentam a partir da quantificação das perdas e ganhos de calor, verificados em um determinado arranjo (tipologia do edifício), sob condições climáticas específicas. Estes ganhos e perdas podem ser quantificados com o auxílio de simulações computacionais, representando dados bastante úteis para comparar os resultados do emprego de soluções projetuais diferenciadas e avaliar o desempenho térmico das mesmas. A seguir, serão abordados os principais aspectos que devem ser considerados para a modelagem da ventilação mecânica noturna, a partir de simulação computacional.

### 3.2 O USO DA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL COMO FERRAMENTA DE AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO DE EDIFICAÇÕES

As simulações computacionais são desenvolvidas para analisar o desempenho térmico e energético de edificações e seus sistemas. Segundo Westphal (2007), as ferramentas de simulação computacional possibilitam desde a manipulação de bases de dados de propriedades térmicas de componentes construtivos até a simulação integrada do comportamento energético de edificações, incluindo todos os seus sistemas elétricos e considerando sua interação com o meio ambiente.

O uso da simulação computacional para avaliar o comportamento térmico de uma situação existente ou hipotética requer uma representação o mais fiel possível do comportamento do edifício em análise, seja o mesmo já construído ou ainda na fase de concepção.

Esta modelagem compreende o uso de modelos virtuais capazes de “prever” ou estimar o comportamento do modelo “sistema-edifício”. Este, por sua vez, é descrito através da linguagem utilizada pela

ferramenta computacional, a partir de uma série de parâmetros: geometria, localização, propriedades termo-físicas do envelope, especificações técnicas dos equipamentos elétricos, sistemas de iluminação e condicionamento artificial. Além disso, os padrões de ocupação e uso dos ambientes e seus sistemas também devem ser caracterizados.

Existem centenas de opções de modelagem computacional, as quais apresentam diferentes níveis de complexidade de acordo com a quantidade de informações que o programa requer para produzir os resultados das simulações<sup>12</sup>. As ferramentas mais avançadas de análise do desempenho termo-energético de edificações reúnem um conjunto diversificado de módulos de simulação. Estes módulos atuam simultaneamente no processamento dos dados de entrada e são responsáveis por cálculos específicos, possibilitando quantificar, entre outros resultados, as cargas térmicas de aquecimento e resfriamento de um edifício e o consumo de energia necessário para manter seus diversos sistemas em funcionamento, diante de determinadas condições ambientais e operacionais às quais o edifício encontra-se exposto. Os programas DOE-2, TRNSYS e EnergyPlus são exemplos dessas ferramentas computacionais.

Em se tratando do comportamento termo-energético de um ambiente, um programa computacional deste tipo possui módulos de simulação específicos para o cálculo de: radiação e ganhos solares no exterior da edificação; condução do calor e da umidade através dos componentes construtivos; transmissão da radiação solar através dos componentes transparentes; trocas térmicas por radiação entre as superfícies; transferência de calor entre a edificação e o solo; convecção entre o ar e as superfícies e entre o ar e as fontes de calor internas (ocupantes e equipamentos instalados); trocas de ar através da ventilação e da infiltração e iluminação natural. Segundo Bertagnolio et al. (2010), para a verificação das cargas térmicas de resfriamento, destacam-se como aspectos cruciais a área de aberturas existentes nas fachadas e sua orientação; os ganhos internos; as taxas de ventilação; a localização geográfica da edificação e a inércia térmica dos componentes construtivos.

---

<sup>12</sup> O Departamento de Energia dos Estados Unidos (US-DOE) disponibiliza uma lista com mais de 400 ferramentas de simulação computacional destinadas a avaliação do consumo energético em edificações e cálculo de carga térmica, no seguinte endereço: <[http://apps1.eere.energy.gov/buildings/tools\\_directory/subjects\\_sub.cfm](http://apps1.eere.energy.gov/buildings/tools_directory/subjects_sub.cfm)> (Acesso em 31/01/2012).

Outro aspecto importante é que uma mesma ferramenta de simulação pode apresentar diferentes possibilidades de solução em cada um dos módulos de cálculo citados, cabendo ao usuário do programa distinguir qual delas é a mais apropriada para a representação da problemática em análise. Esta flexibilidade, entretanto, pode dar origem a incertezas quanto à escolha da melhor maneira de representar cada um dos fenômenos físicos envolvidos no balanço termo-energético de um ambiente.

Nesse caso, o usuário pode desenvolver um processo interativo para definir qual a combinação de soluções que irá escolher, dentre aquelas que a ferramenta computacional oferece. Este processo denomina-se calibração. Como o objetivo da calibração é reduzir as incertezas acerca dos resultados das simulações, o processo se aplica a qualquer aspecto da modelagem, seja na definição da melhor representação de um fenômeno ou na especificação dos dados de entrada, cujos valores apresentem uma faixa de variação. Um exemplo disso é a especificação dos coeficientes de descarga para as aberturas, necessários para o cálculo da ventilação natural (SORGATO, 2009; PEREIRA, 2009).

Segundo Westphal (2007), o processo de calibração do modelo envolve os ajustes necessários nos dados de entrada para que o programa de simulação represente adequadamente o desempenho térmico e energético da edificação, sendo que o nível de precisão necessário depende da análise para a qual a simulação é designada. Para cada ajuste, é verificada a influência nos dados de saída do programa, em função dos dados de entrada. Este tipo de análise é denominado análise de sensibilidade. A definição sobre qual a melhor combinação de dados de entrada é diferenciada para edificações já construídas e para edificações ainda em projeto. No primeiro caso, o usuário do programa pode obter dados de monitoramento de uma variável de interesse da edificação real (por exemplo, o consumo de energia) e compará-los aos resultados das simulações. Durante esse processo, o usuário ajusta os dados de entrada no modelo, sobre os quais ele possui maior incerteza. Verificando-se qual o resultado que se apresenta melhor ajustado aos dados monitorados, identifica-se a combinação de dados de entrada correspondente. Já no caso de edificações em projeto, como não existem dados monitorados, geralmente são utilizados indicadores de desempenho de edificações semelhantes. Os critérios utilizados na análise de sensibilidade para avaliar a acurácia da calibração se baseiam na análise estatística dos resultados. Bertagnolio et al. (2010) identificaram entre diversos estudos o uso dos seguintes parâmetros

estatísticos: desvio médio, erro médio quadrático e coeficiente de variação do erro médio quadrático.

A simulação computacional apresenta como vantagem a possibilidade de avaliar o efeito que as alterações realizadas no projeto irão provocar no resultado final, antes mesmo que a edificação seja construída. Desse modo, torna-se possível, por exemplo, avaliar o retorno financeiro de um investimento na melhoria do sistema de iluminação artificial, em função da economia gerada no consumo de energia elétrica (PEDRINI, 1997). Entretanto, a transferência desse tipo de tecnologia ao mercado da construção civil encontra como barreira a complexidade das ferramentas de simulação computacional e o tempo demandado para a caracterização adequada do modelo virtual do edifício em análise. Desse modo, o uso de tais ferramentas fica restrito, na maioria dos casos, ao meio científico e acadêmico (WESTPHAL, 2007).

Por outro lado, verifica-se que a simulação computacional também pode ser utilizada para gerar uma base de dados destinada à formulação de modelos preditivos ou analíticos, visando o desenvolvimento de estimativas simplificadas para o desempenho térmico e energético de edificações. O objetivo desses modelos é possibilitar a comparação entre diferentes estratégias de projeto, considerando o impacto que podem causar, por exemplo, na temperatura interna, na carga térmica e no consumo de energia.

A construção do modelo preditivo é feita a partir dos resultados das simulações, identificando-se correlações entre os diversos parâmetros de simulação e verificando-se o efeito da interação entre os mesmos no resultado final. As correlações são identificadas a partir da aplicação de técnicas estatísticas, as quais também podem ser utilizadas para testar a confiabilidade do modelo. A utilidade de um modelo preditivo se verifica ainda na fase de projeto da edificação e a sua incorporação na prática projetual será facilitada desde que as variáveis necessárias à aplicação do modelo sejam de fácil identificação ou obtenção.

O Regulamento Técnico para a Qualidade de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (RTQ-C) é um exemplo da aplicação da simulação computacional para a formulação de um modelo analítico, destinado ao cálculo de um indicador de eficiência energética (BRASIL, 2010a). No RTQ-C estão descritas as equações para a obtenção do indicador de consumo da envoltória. Estas equações foram derivadas de uma análise de regressão multivariada, tendo como objetivo obter um indicador de consumo de energia em função de um conjunto de

variáveis arquitetônicas (área de aberturas na fachada, fator solar dos vidros e ângulos de sombreamento das aberturas). O método empregado para a formulação das equações foi desenvolvido por Carlo (2007) em sua tese de doutorado. Já o Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (BRASIL, 2010b) apresenta equações para determinação dos indicadores Graus-hora de Resfriamento, Consumo Relativo para Aquecimento e Consumo Relativo para Refrigeração, as quais também foram derivadas de resultados de simulação computacional e levam em consideração diversos parâmetros relacionados às características da envoltória (VERSAGE, 2011).

Considerando-se as potencialidades da simulação computacional para a análise do desempenho térmico de edificações, são discutidos a seguir aspectos relevantes para a modelagem da ventilação mecânica noturna.

### 3.2.1 Modelagem computacional da ventilação mecânica noturna

Segundo Pffferrot et al. (2003), a modelagem dos efeitos da ventilação noturna corresponde a modelagem dos seguintes elementos: taxas de renovação de ar, transferência de calor e armazenamento de calor.

O cálculo das taxas de renovação de ar é bastante complexo, mas existem diversas ferramentas capazes de desenvolvê-lo. Uma das abordagens possíveis é o modelo de rede nodal (*airflow network*), onde o edifício é representado por uma malha de pontos (ou nós) posicionados nas zonas e no ambiente externo. A interação entre as diversas zonas é representada por percursos efetuados pelo fluxo de ar entre esses nós. Tais percursos ocorrem através das aberturas: janelas, portas e frestas. Para os nós externos, a pressão do vento é conhecida. Já para os nós internos, o cálculo da pressão do ar é efetuado a partir da aplicação de equações do balanço de massa em cada nó, considerando-se a condição expressa pela Equação 3.11 (SANTAMOURIS, 1998):

$$\sum_{k=1}^j \rho_i Q_{ik} = 0 \quad \text{Equação 3.11}$$

onde:

$Q_{ik}$  = Fluxo volumétrico de ar da zona  $i$  em direção à zona  $k$  ( $m^3/s$ );

$\rho$  = Densidade do ar que segue o fluxo ( $kg/s$ );

$j$  = total de aberturas.

Os dados de entrada necessários para o cálculo do número de renovações de ar a partir desse modelo são o coeficiente de descarga ( $C_d$ ) e os coeficientes de pressão do ar nas aberturas situadas a barlavento e a sotavento ( $C_p$ ). O coeficiente de descarga é função da temperatura e da velocidade do ar e é diferenciado de acordo com a geometria da abertura (SANTAMOURIS, 1998). Já o coeficiente de pressão está relacionado à direção do vento, à geometria da edificação e à topografia do entorno (UNDERWOOD; YIK, 2004). No modelo de rede, a temperatura no interior da zona é caracterizada de maneira uniforme (ar perfeitamente misturado), de modo que o efeito da estratificação do ar não é considerado.

Segundo Santamouris (1998), os modelos zonais e os modelos CFD possibilitam analisar padrões de temperatura interna e da velocidade do ar, utilizando equações de conservação de massa e energia junto com equações de quantidade de movimento para caracterizar os principais fluxos de ar. Entretanto, devido a sua complexidade, demandam longo tempo de simulação e não são usados comumente para o cálculo da carga térmica e de coeficientes de convecção (PEETERS et al., 2011).

A fim de modelar adequadamente o resfriamento da estrutura proporcionado pelo uso da ventilação mecânica noturna, as propriedades térmicas dos componentes construtivos e os coeficientes de transferência de calor por convecção são dados de entrada fundamentais. Na realidade, o valor deste coeficiente varia de acordo com o fluxo de ar e a diferença entre a temperatura do mesmo e das superfícies em contato, determinando o resultado das trocas convectivas entre as superfícies internas e o ar. Entretanto, na prática estes coeficientes são obtidos a partir de cálculos simplificados, ou calculados automaticamente por programas de simulação computacional.

Isto significa que a modelagem dos coeficientes de convecção se apresenta incipiente ao representar o regime dos fluxos de ar no interior dos ambientes, sujeito a grande variabilidade, principalmente nas situações onde ocorre a convecção forçada, sempre presente quando a ventilação natural é empregada. Geralmente, as ferramentas de simulação termo-energética utilizam algoritmos para o cálculo da convecção natural, onde o coeficiente de convecção é obtido em função da diferença entre a temperatura das superfícies internas e a temperatura do ar no interior da zona térmica. Além disso, no caso dos modelos de rede, apenas uma temperatura, uniforme para todo o ar contido no ambiente, é utilizada como referência no cálculo dos coeficientes de

convecção. Visto que em ambientes reais a temperatura interna não é perfeitamente uniforme, o cálculo da convecção fica sujeito a desvios.

Mesmo os modelos que consideram a convecção forçada ou que buscam correlacionar os regimes natural e forçado, denominados modelos mistos, são formulados a partir de estudos em laboratório, sob condições controladas e sem a interferência de elementos característicos da rotina de uso dos edifícios, como a existência da mobília, conforme relatam Peeters et al. (2011). Visando explorar a magnitude de tais interferências, os autores desenvolveram uma análise paramétrica a partir de medições em câmara climática. Simulando uma situação de refrigeração artificial com insuflamento de ar pelo teto, aplicaram correlações da literatura para o cálculo da convecção natural, forçada e mista. Ao utilizar diferentes temperaturas de referência (temperatura média do ar da zona, temperatura próxima à superfície da parede e temperatura de exaustão do ar), observaram uma variação de até 25% nos fluxos de calor. Do mesmo modo, as dimensões do ambiente também afetaram a variabilidade dos resultados, salientando que a seleção desses parâmetros de torna muito limitada para os modelos de rede nodal.

Goethals et al. (2011) desenvolveram estudo semelhante, utilizando um modelo genérico de escritório com condicionamento artificial, enfocando especificamente a modelagem da ventilação mecânica noturna, aplicada no intervalo de 22h a 6h. Foi analisada também uma situação sem a aplicação dessa estratégia. Com base em simulações computacionais desenvolvidas com o programa TRNSYS, os autores testaram a sensibilidade de diferentes algoritmos de convecção às alterações do modelo base: variação na carga térmica interna, taxas de infiltração de ar, insolação (decorrente de diferentes estratégias de sombreamento das aberturas), período de aplicação da ventilação noturna e vazão de ar empregada. Concluíram que a escolha do algoritmo de convecção afeta o percentual de horas de desconforto do ambiente (situações onde  $PMV > 0,5$ ), apresentando impacto semelhante ao impacto causado pelos demais parâmetros testados. Nas simulações com ventilação noturna, a alteração do coeficiente de convecção resultou em variações de até 27% na carga térmica de resfriamento, enquanto nas simulações que não empregaram esta estratégia as diferenças nos resultados foram de até 3%.

Segundo Beausoleil-Morrison (2000), ao contrário da convecção, a modelagem dos mecanismos de transferência de calor por condução e radiação é considerada suficientemente precisa no contexto dos programas de simulação atuais. O cálculo da condução é fundamental

para quantificar a capacidade de armazenamento de calor de uma configuração construtiva.

A capacidade de armazenamento de calor de um ambiente está diretamente relacionada com a capacidade útil de armazenamento de todas as superfícies presentes no seu interior. Tal capacidade depende da espessura e propriedades térmicas dos materiais que compõem a envoltória, da oscilação da temperatura do ar e da transferência de calor entre a superfície do componente e o ar. A capacidade de armazenamento de calor é responsável pelo amortecimento da temperatura interna em relação à temperatura externa, sendo que cada componente construtivo apresentará propriedades térmicas específicas de acordo com a combinação de materiais constituintes que apresenta.

Tais propriedades constituem-se como dados de entrada fundamentais para a simulação de desempenho térmico de edificações com o auxílio de ferramentas computacionais. A ventilação mecânica noturna deve ser considerada de forma conjunta com a otimização da inércia térmica, sendo fundamental maximizar a interação da massa construída com o ar interno através dos fenômenos de transferência de calor. Daí a importância de se buscar um equilíbrio entre a precisão e a robustez dos cálculos de carga térmica, visto que a sua aplicação prática requer frequentemente uma correlação com um número muito limitado de variáveis de entrada, conforme destacam Peeters et al. (2011).

A seguir, será caracterizada a ferramenta computacional utilizada nas simulações: o programa EnergyPlus, apresentando-se as opções de modelagem que o mesmo oferece para o cálculo da condução, da convecção e da ventilação natural.

### **3.2.2 Análise do balanço energético de edificações: o uso do programa EnergyPlus**

O EnergyPlus é um programa destinado à análise energética e simulação térmica de edificações, desenvolvidas a partir de um modelo do edifício e baseadas nos princípios fundamentais do balanço térmico (EUA, 2011). O programa formula os balanços de energia e umidade para o ar de cada zona térmica, solucionando-os a partir de equações diferenciais, obtendo-se como um dos resultados a temperatura no interior dos ambientes. Diversos outros dados de saída são fornecidos pelo programa, relacionados ao consumo de energia, ao comportamento térmico da edificação, entre outros.

Para a solução do balanço térmico, o programa dispõe de diferentes opções de cálculo, correspondentes aos fenômenos da

condução, convecção e radiação. No caso da ventilação, o programa oferece o modelo de rede nodal, denominado *airflow network*.

Com relação ao cálculo da condução, o programa pode utilizar cinco algoritmos diferentes: *Conduction Transfer Function* (CTF); *Detailed Conduction Finite Difference* (CondFD); *Conduction Finite Difference Simplified* (CondFDS); *Combined Heat and Moisture Transfer* (HAMT) e *Effective Moisture Penetration Depth* (EMPD).

A função de transferência por condução (*Conduction Transfer Function* – CTF) utiliza equações matriciais para determinar as variáveis de interesse (distribuição das temperaturas no interior do componente ou fluxos de calor nas faces interna e externa) em função dos dados de entrada (temperaturas internas e externas) e de coeficientes constantes para as temperaturas e os fluxos de calor (SEEM, 1987). Este método também é conhecido como *space state method* e estabelece que o fluxo de calor em ambas as faces de um elemento construtivo qualquer está diretamente relacionado à temperatura superficial no mesmo instante e aos valores prévios desta, sendo relacionado também com os valores prévios do fluxo de calor na superfície interna. Não é necessário calcular as temperaturas para diversas secções no interior do componente, ao contrário do modelo de diferenças finitas. O modelo não leva em consideração o armazenamento de umidade ou a difusão nos elementos construtivos.

O modelo detalhado de diferenças finitas (*Detailed Conduction Finite Difference* – CondFD) realiza a discretização do componente de acordo com o método implícito, considerando-se os critérios de estabilidade de Fourier. Para cada camada do componente construtivo são atribuídos pelo menos dois nós, a fim de representar os valores de temperatura nas interfaces de cada camada.

O modelo simplificado de diferenças finitas (*Conduction Finite Difference Simplified* – CondFDS) distingue-se do anterior pelo fato de que não subdivide o componente em diversas camadas. De modo análogo a um sistema elétrico, o componente é compreendido como uma resistência e possui apenas dois nós (interno e externo). Com isso, o tempo de simulação é reduzido em relação ao algoritmo detalhado (CondFD).

O modelo combinado de transferência de calor e umidade (*Combined Heat and Moisture Transfer* – HAMT) simula o movimento e o armazenamento do calor e da umidade nos componentes construtivos simultaneamente. O componente é compreendido como uma superfície composta por um conjunto de materiais constituintes, que podem estar combinados de diversas formas. O algoritmo subdivide

cada material em até dez células, calculando para cada uma delas o armazenamento e transferência de calor. Também é contabilizado o calor gerado devido à vaporização, bem como o efeito de outras fontes de calor sobre a determinação da temperatura de cada célula no tempo seguinte.

O modelo de profundidade de penetração efetiva da umidade (Effective Moisture Penetration Depth – EMPD) simula os efeitos de adsorção<sup>13</sup> e desorção<sup>14</sup> de umidade nas superfícies internas. Isto é muito importante para evitar erros nas estimativas dos conteúdos de umidade no interior dos ambientes e das cargas de resfriamento dos sistemas de condicionamento artificial.

Com relação ao cálculo da convecção nos ambientes internos, o programa pode utilizar cinco algoritmos diferentes: *Adaptive*, *TARP*, *Simple Natural (SimN)*, *Ceiling Diffuser (CeID)* e *Trombe Wall*.

O algoritmo *Adaptive* caracteriza-se pela seleção do coeficiente de convecção dentre 45 opções diferentes, considerando-se 8 categorias: simples flutuação; aquecimento pelo piso ou pelo teto; resfriamento; painéis verticais para aquecimento; aquecedor (zona convectiva); difusor de ar central; ventiladores. Para cada categoria, é considerada também a orientação da superfície e a direção do fluxo de calor verificada durante as simulações. O algoritmo seleciona dentre as equações disponíveis o coeficiente de convecção mais adequado para representar as trocas convectivas em uma determinada superfície, em um dado momento. Utilizando-se este algoritmo nas simulações, o coeficiente de convecção é automaticamente modificado.

O algoritmo *TARP* correlaciona o coeficiente de convecção ( $h$ ) com a orientação da superfície (ângulo  $\Sigma$ ) e com o gradiente de temperatura entre esta e o ar da zona ( $\Delta T$ ). Há formulações específicas, aplicáveis às superfícies verticais ou horizontais (Tabela 3.2). Já o algoritmo natural simples (*Simple Natural – SimN*) utiliza valores fixos para a determinação dos coeficientes de convecção, de acordo com a orientação da superfície, conforme indicado na Tabela 3.3.

---

<sup>13</sup> Adsorção significa a adesão de moléculas de um fluido a uma superfície sólida.

<sup>14</sup> Desorção é o processo de retirada de uma substância sorvida, representando o processo inverso da adsorção ou absorção.

**Tabela 3.2 – Equações para a determinação do coeficiente de convecção, segundo o algoritmo TARP (EnergyPlus, 2010).**

Equação*	Aplicação
$h = 1,31 \Delta T ^{\frac{1}{3}}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Superfícies verticais</li> </ul>
$h = \frac{9,482  \Delta T ^{\frac{1}{3}}}{7,283 -  \cos\Sigma }$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Superfície inclinada (ângulo <math>\Sigma</math>), face superior e gradiente de temperatura entre o ar e a superfície inferior à zero;</li> <li>• Superfície inclinada (ângulo <math>\Sigma</math>), face inferior e gradiente de temperatura entre o ar e a superfície maior que zero;</li> </ul>
$h = \frac{1,810  \Delta T ^{\frac{1}{3}}}{1,382 +  \cos\Sigma }$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Superfície inclinada (ângulo <math>\Sigma</math>), face superior e gradiente de temperatura entre o ar e a superfície maior que zero;</li> <li>• Superfície inclinada (ângulo <math>\Sigma</math>), face inferior e gradiente de temperatura entre o ar e a superfície inferior à zero.</li> </ul>

\*Unidades de medida:  $W/m^2.K$  (h) e K ( $\Delta T$ ).

**Tabela 3.3 – Valores dos coeficientes de convecção, segundo o algoritmo SimN (EnergyPlus, 2010).**

Valor de h ( $W/m^2.K$ )	Aplicação
3,076	Superfícies verticais
0,948	Superfície horizontal ( <i>reduced convection</i> )
4,040	Superfície horizontal ( <i>enhanced convection</i> )
2,281	Superfície inclinada ( <i>reduced convection</i> )
3,870	Superfície inclinada ( <i>enhanced convection</i> )

O algoritmo teto difusor (Ceiling Diffuser – CeiD) pode ser aplicado a qualquer superfície (teto, parede ou piso), desde que o ambiente simulado possua um sistema de condicionamento artificial instalado. O coeficiente de convecção é calculado para cada uma dessas superfícies de acordo com formulações específicas, onde a variável dependente é o número de renovações de ar do ambiente (ACH) (Tabela 3.4).

**Tabela 3.4 – Valores dos coeficientes de convecção, segundo o algoritmo CeID (EnergyPlus, 2010)**

Equação*	Aplicação
$h = 3,873 + 0,082 \cdot ACH^{0,98}$	Pisos
$h = 2,234 + 4,099 \cdot ACH^{0,503}$	Tetos
$h = 1,208 + 1,012 \cdot ACH^{0,604}$	Paredes

\*Unidade de medida:  $W/m^2 \cdot K$  (h).

Por fim, o algoritmo parede trombe (Trombe Wall) é específico para este tipo de componente construtivo, sendo usado para determinar o coeficiente de convecção na cavidade selada e não ventilada (zona existente entre a parede de acumulação e o vidro).

Diante do exposto, observa-se que o programa EnergyPlus oferece diversas possibilidades de combinação entre os algoritmos de condução e convecção para a simulação termo-energética de edificações. Entretanto, nem todas são aplicáveis para a modelagem da ventilação mecânica noturna, caso esta estratégia não seja efetivada por meio de algum equipamento de refrigeração instalado no ambiente (modo misto ou ventilação híbrida)<sup>15</sup>. O algoritmo Ceiling Diffuser e todas as opções relacionadas ao algoritmo *Adaptive* que incluem a taxa de renovação de ar do ambiente são aplicáveis apenas quando há algum sistema de climatização artificial instalado no ambiente.

No presente trabalho, a modalidade de ventilação mecânica que será investigada é efetivada diretamente pelo insuflamento de ar externo através de uma abertura na fachada, de modo análogo à condição verificada na edificação real. Neste caso, os algoritmos de convecção compatíveis com esta estratégia não efetuam o cálculo da convecção forçada, pois a modelagem não inclui nenhum tipo de sistema de condicionamento artificial. Portanto, têm-se como opções para a simulação desta estratégia os algoritmos *Simple Natural*, *TARP* e as combinações do algoritmo *Adaptive* que calculam a convecção natural (coeficiente h estimado em função do gradiente de temperatura). Considerando-se os aspectos levantados na revisão bibliográfica a respeito das limitações dos algoritmos de convecção, será discutido o

<sup>15</sup> O modo misto de ventilação compreende a combinação do uso da ventilação natural através de aberturas com sistemas de ar-condicionado central e/ou dutos para insuflamento do ar externo ou exaustão do ar interno, por vias mecânicas, para fins de resfriamento. A combinação da ventilação natural com sistemas mecânicos (insufladores e exaustores) também é denominada ventilação híbrida.

impacto da seleção dos mesmos nos resultados das simulações computacionais, bem como a magnitude dos desvios verificados em relação aos fluxos de calor registrados a partir de medições *in loco* na residência experimental simulada.

### 3.3 SÍNTESE DO CAPÍTULO

No presente capítulo foram abordados aspectos relevantes para fundamentar o método a ser aplicado na avaliação do potencial da ventilação mecânica noturna em residências naturalmente ventiladas em Florianópolis, o qual será apresentado no Capítulo 4.

Uma proposta de avaliação do potencial de qualquer estratégia bioclimática deve incorporar parâmetros de desempenho térmico que reflitam o atendimento às necessidades de conforto dos usuários das edificações. Nesse sentido, abordagem adaptativa compreende a questão do conforto térmico como uma resposta do ser humano às variações climáticas e à sua própria percepção do meio ambiente, que, além de envolver certo grau de subjetividade, possui um caráter dinâmico. Por outro lado, o estudo do desempenho térmico de edificações envolve também a objetividade de fenômenos físicos que são quantificáveis em função de condições de contorno conhecidas. O desafio que se coloca é: como abordar questões de natureza tão distinta de maneira integrada, por meio de um método de análise? Pode-se concluir que a resposta reside exatamente na representação do critério de conforto. Esta representação consiste no ponto de partida para a análise desenvolvida pela presente tese, conforme será discutido no item 4.4.

Os estudos desenvolvidos no exterior exemplificam abordagens integradas nas quais se busca identificar a influência do clima e das variáveis arquitetônicas, caracterizando o desempenho da edificação em função de critérios de conforto. Nesses estudos, o uso de dados de monitoramento *in loco* e o desenvolvimento de simulações computacionais constituem-se como recursos fundamentais, podendo ser utilizados de forma conjunta no processo de calibração de modelos computacionais. Desse modo, os dados obtidos *in loco* propiciam um balizamento das simulações, e, mesmo diante das limitações das ferramentas de simulação, conferem maior confiabilidade de seus resultados.

No contexto brasileiro, os limites de aplicabilidade da ventilação mecânica noturna não se encontram claramente definidos, assim como de outras estratégias de condicionamento passivo que fazem uso da

ventilação natural. O Zoneamento Bioclimático Brasileiro apresenta diretrizes gerais para as diferentes regiões do país, mas é necessário aprofundamento com relação aos mecanismos de controle da ventilação e o impacto dos mesmos em configurações construtivas caracterizadas por níveis distintos de inércia térmica, nos climas das regiões Sul e Sudeste. Em tais localidades, caracterizadas por uma maior amplitude térmica anual, o emprego de vedações pesadas poderia beneficiar o desempenho térmico de residências tanto no verão quanto no inverno. Resultados de pesquisas desenvolvidas no Brasil apontam resultados positivos, inclusive em Florianópolis, a exemplo do trabalho de Goulart (2004).

Entretanto, há ainda a necessidade de se investigar até que ponto o emprego de uma determinada configuração construtiva, caracterizada por inércia mais alta ou mais baixa, apresenta comportamento térmico compatível com os padrões de ocupação dos ambientes. Ou seja, identificar se a temperatura interna se mantém adequada às condições de conforto nos diferentes períodos do dia: manhã, tarde e noite. A esse respeito, também se justifica uma avaliação da contribuição da ventilação mecânica noturna para promover o resfriamento adequado da massa construída.



O método proposto para a realização do presente trabalho é baseado na análise de dados do monitoramento *in loco* da Casa Eficiente e em simulações computacionais desenvolvidas com o software EnergyPlus v. 6.0.

O monitoramento *in loco* foi realizado a fim de avaliar o desempenho da ventilação mecânica noturna como estratégia de resfriamento quando aplicada a um ambiente real. Para possibilitar a avaliação do potencial dessa estratégia durante os meses mais quentes em Florianópolis (dezembro a março), 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. O processo de calibração foi realizado em duas etapas. Inicialmente, foi obtido um Modelo Base Inicial para a simulação da ventilação mecânica noturna. Na sequência, este modelo foi submetido a uma nova análise de sensibilidade, na qual foram realizados testes com os algoritmos de condução e convecção, visando reduzir os desvios dos resultados simulados em relação às medições.

Tendo sido obtido o modelo calibrado, denominado Modelo Base Final, foram simuladas configurações diferenciadas de inércia construtiva (vedações leves e pesadas), padrões de ventilação natural no período diurno e taxas de renovação do ar durante o período noturno. Foram desenvolvidos estudos paramétricos em função do balanço térmico do ambiente analisado, o quarto de casal, quantificando-se os somatórios de graus-hora de resfriamento e os percentuais de horas de desconforto de acordo com os resultados das simulações, para diferentes períodos do dia. Desse modo, foi avaliada a influência de configurações construtivas leves e pesadas, associadas a padrões de ventilação diurna diferenciados, no desempenho da ventilação mecânica noturna.

Os resultados das simulações do balanço térmico foram utilizados como referência para definir diretrizes para a aplicação de estratégias híbridas de ventilação, quando combinadas a diferentes níveis de inércia das vedações, visando à otimização do desempenho térmico do ambiente e a promoção de melhores condições de conforto para os usuários. A seguir serão detalhados os procedimentos correspondentes a cada etapa metodológica acima descrita.

#### 4.1 TESTE DA ESTRATÉGIA: APLICAÇÃO DA VENTILAÇÃO MECÂNICA NOTURNA NA CASA EFICIENTE/ FLORIANÓPOLIS – SC

Conforme apresentado no Capítulo 2, o presente trabalho utiliza a Casa Eficiente, localizada em Florianópolis-SC como objeto de estudo. Nesta edificação, foi aplicada a ventilação mecânica noturna, verificando-se o efeito dessa estratégia no comportamento de um ambiente interno (quarto de casal), considerando diferentes condições de ventilação durante o período diurno. Quanto as suas características construtivas, a Tabela 4.1 apresenta as propriedades térmicas dos componentes construtivos<sup>16</sup>.

**Tabela 4.1 – Propriedades térmicas dos componentes construtivos.**

Fonte: Pereira (2009).

<b>Componente</b>	<b>Descrição</b>
<b>Paredes externas</b>	Paredes duplas, constituídas por duas camadas de tijolo maciço, com camada intermediária de lã de rocha. Espessura total: 22,5 cm. $U = 1,08 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ ; $Ct = 313,7 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$ ; $\phi = 8,3 \text{ h}$ , $\alpha = 0,36$ .
<b>Paredes internas</b>	Paredes simples de tijolo maciço. Espessura total: 15 cm. $U = 3,13 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ ; $Ct = 255 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$ ; $\phi = 3,8 \text{ h}$ .
<b>Cobertura quarto de casal</b>	Constituída por: telha cerâmica + câmara de ar + manta refletiva de alumínio + câmara de ar + manta de lã de rocha + forro de madeira. Espessura total: 15 cm. $U = 0,58 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ ; $Ct = 54,7 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$ ; $\phi = 4,9 \text{ h}$ , $\alpha = 0,48$ .
<b>Cobertura quarto de solteiro</b>	Teto jardim, constituído por camadas de terra e vegetação + manta de poliestireno extrudado + laje de concreto. Espessura total: 15 cm. $U = 0,82 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ ; $Ct = 295 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$ ; $\phi = 10,9 \text{ h}$ .

continua...

<sup>16</sup> De acordo com Pereira (2009), os valores da transmitância térmica, capacidade térmica e amortecimento térmico foram calculados segundo procedimentos descritos na NBR 15220-2 (ABNT, 2005). A absorvância térmica das superfícies externas foi obtida a partir de medição in loco: “(...) foram realizadas medições no local utilizando o equipamento medidor de refletância (espectrômetro) ‘Alta II’ (...). Com os valores medidos, e tendo como referência medições em um papel branco, a absorvância real pôde ser calculada utilizando-se planilhas eletrônicas (PEREIRA, 2009, p. 52).

**Tabela 4.1 – Propriedades térmicas dos componentes construtivos (continuação)**

<b>Componente</b>	<b>Descrição</b>
<b>Janelas e portas externas dos quartos</b>	Esquadrias em PVC branco, cuja área envidraçada é constituída por duas lâminas de vidro incolor, espessura = 3 mm + câmara de ar intermediária, espessura = 12 mm. Externamente, as esquadrias possuem persianas de PVC branco. $\alpha = 0,26$ (PVC).
<b>Portas internas</b>	Portas de madeira maciça, com espessura igual a 3 cm. $U = 2,17 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ ; $Ct = 24 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$ ; $\varphi = 0,7 \text{ h}$ .

$U$  = Transmitância térmica.  $Ct$  = Capacidade térmica.  $\varphi$  = Atraso térmico.  $\alpha$  = absorvância térmica.

Já o cálculo da transmitância térmica do piso foi efetuado de acordo com a equação 4.1, definida pela ISO 13370 (2007)<sup>17</sup>. Para a Casa Eficiente, o valor da transmitância térmica do piso calculado de acordo com a Equação 4.1 foi igual a  $0,39 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ .

$$U = \frac{2\lambda}{\pi B' + d_t} \ln\left(\frac{\pi B'}{d_t} + 1\right) \quad \text{Equação 4.1}$$

onde:

$U$  = Transmitância térmica do solo ( $\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ );

$\lambda$  = Condutividade térmica do solo ( $\text{W/m}\cdot\text{K}$ );

$B'$  = Dimensão característica do piso, obtida pela Equação 4.2 (m);

$d_t$  = Espessura equivalente do piso, obtida pela Equação 4.3 (m).

Sendo:

$$B' = \frac{A}{0,5 P} \quad \text{Equação 4.2}$$

onde:

$A$  = Área do piso ( $\text{m}^2$ );

$P$  = Perímetro do piso exposto ao exterior, equivalente ao perímetro das paredes externas (m).

<sup>17</sup> Thermal performance of buildings — Heat transfer via the ground — Calculation methods (ISO, 2007).

$$d_t = w + \lambda (R_{si} + R_f + R_{se}) \quad \text{Equação 4.3}$$

onde:

- w = espessura total das paredes externas (m);
- $\lambda$  = Condutividade térmica do solo (W/m.K);
- $R_{si}$  = Resistência superficial interna ( $m^2.K/W$ );
- $R_{se}$  = Resistência superficial externa ( $m^2.K/W$ );
- $R_f$  = Resistência total do piso, incluindo todas as camadas constituintes do componente ( $m^2.K/W$ ).

A inércia térmica do quarto de casal foi classificada com base no Fator de Resposta do ambiente (SZOKOLAY, 2007). Para a determinação do Fator de Resposta, são necessários dados relativos às transmitâncias térmicas de todas as superfícies que delimitam o ambiente, assim como a área ocupada por cada uma, sua massa específica, sua admitância e o volume total do ambiente (V). Também é necessário indicar uma taxa de renovação de ar admitida no ambiente (N). De acordo com Szokolay, pode-se adotar a taxa  $N = 1$  renovação/h para ambientes domésticos (com exceção da cozinha). O volume do ambiente em questão é  $V = 75,2 \text{ m}^3$ .

Para o cálculo da admitância das superfícies (Y), foi utilizada a planilha eletrônica desenvolvida por Casalena (2011), em conformidade com a metodologia proposta pela ISO 13786 (2007)<sup>18</sup>. Por fim, a massa específica de cada componente foi calculada com base no produto entre a área superficial ocupada pelo mesmo e as densidades de todos os materiais constituintes.

A Tabela 4.2 apresenta os parâmetros necessários para o cálculo do Fator de Resposta. Tendo sido obtido o valor  $FR = 4,1$ , a inércia do quarto de casal foi classificada com nível médio.

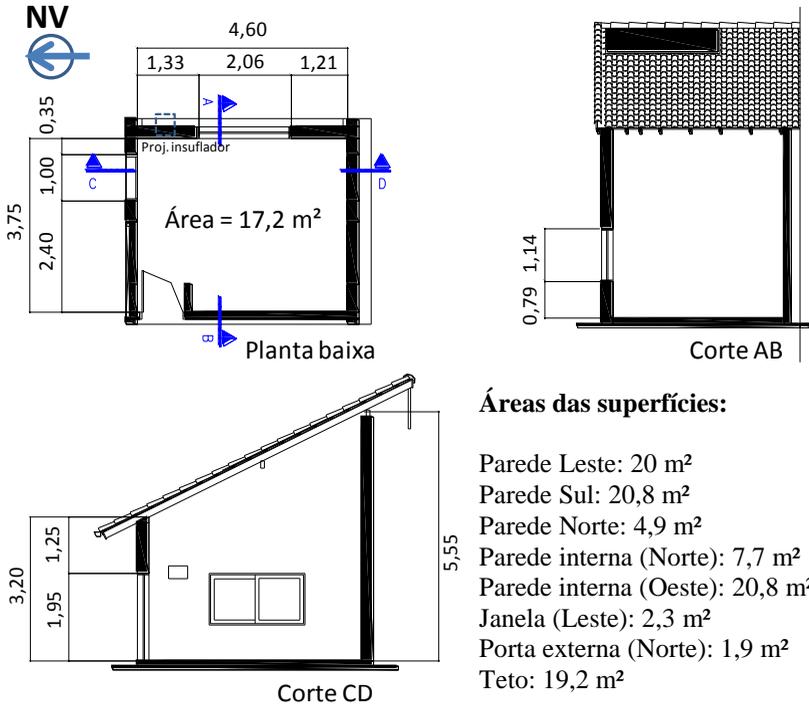
Na Figura 4.1 estão ilustradas a planta baixa e os cortes transversal e longitudinal do ambiente. A abertura indicada no corte CD (à esquerda da janela) corresponde ao insuflador.

---

<sup>18</sup> Thermal performance of building components: Dynamic thermal characteristics: Calculation methods (ISO, 2007).

Tabela 4.2 – Propriedades térmicas utilizadas no cálculo do Fator de Resposta: Quarto de casal - Casa Eficiente

Superfície	Composição	Área (m <sup>2</sup> )	U (W/m <sup>2</sup> K)	A x U	Y (W/m <sup>2</sup> K)	A x Y	
Fachada Leste	Paredes duplas de tijolos maciços aparentes, com isolamento intermediário de lã de rocha (espessura = 21,7 cm)	18,55	1,07	19,76	5,02	93,12	
Fachada Norte		4,23	1,07	4,50	5,02	21,23	
Parede interna (Norte)		6,60	0,97	6,42	5,02	33,13	
Fachada Sul	Telha cerâmica com câmara de ar, barreira radiante, lã de rocha e forro de madeira	20,81	1,07	22,16	5,02	104,47	
rede interna Oeste (corredor)		18,26	0,97	17,75	5,02	91,67	
Cobertura		19,24	0,59	11,43	1,45	27,90	
Plso	Leje Maciça 10 cm	17,14	0,39	6,68	6,00	102,84	
Janela (Leste)	Vidro duplo, com câmara de ar interna (espessura = 1,8 cm)	1,48	2,74	4,05	2,98	4,41	
Porta externa (Norte)		1,24	2,74	3,39	2,98	3,70	
(área envidraçada)							
Porta de Madeira (interna)	Madreira	1,78	2,17	3,87	2,28	4,06	
RESULTADOS							
$q_v = 0,33 \times N \times V$ : Taxa do fluxo térmico devido à ventilação (W/K)							<b>24,82</b>
$q_a = \Sigma(A \times Y)$ : Taxa do fluxo térmico devido à admissão (W/K)							<b>486,52</b>
$q_c = \Sigma(A \times U)$ : Taxa do fluxo térmico devido à condução (W/K)							<b>100,01</b>
Massa específica do ambiente (kg/m <sup>3</sup> )							<b>119,84</b>
FR: Fator de Resposta							<b>4,1</b>
CLASSIFICAÇÃO: INÉRCIA MÉDIA ( $3 \leq FR \leq 5$ )							



**Figura 4.1 – Planta baixa e cortes do ambiente estudado: quarto de casal.**

A instrumentação utilizada para o monitoramento *in loco* encontra-se descrita a seguir:

- *Estação meteorológica LMBEE/Casa Eficiente*: os dados de temperatura externa foram obtidos através da estação meteorológica localizada ao lado da Casa Eficiente (Figura 4.2), que também registra os seguintes dados: radiação global horizontal, velocidade e direção do vento, umidade relativa e precipitação pluviométrica. Convém salientar que os dados foram validados a partir da comparação com registros efetuados por outras estações meteorológicas próximas à Casa Eficiente (MANTELLI NETO et al., 2008);
- *Equipamentos armazenadores de dados (data loggers) do tipo HOBO, modelo U12 (Onset Computer Corporation)*: estes

instrumentos foram utilizados para medição das temperaturas do ar. Em cada quarto, foi instalado um HOBOS, posicionado a 1,8 m de altura em relação ao piso (Figura 4.3). Os HOBOS foram programados para adquirir as informações em intervalos de 5 minutos. Posteriormente, foram calculadas médias horárias dos valores registrados, possibilitando a comparação com os valores registrados pela estação meteorológica. A precisão do equipamento é de  $\pm 0,35^{\circ}\text{C}$  para a temperatura do ar (faixa de  $0^{\circ}\text{C}$  a  $50^{\circ}\text{C}$ ) e de  $\pm 2,5\%$  para a umidade relativa (faixa de 10% a 90%).



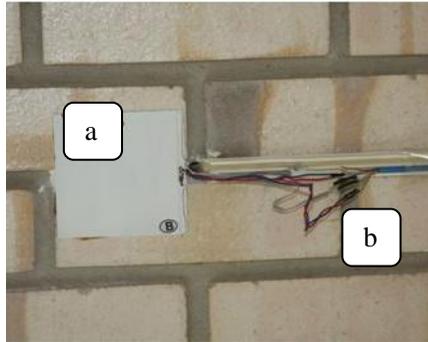
**Figura 4.2 – Estação meteorológica LMBEE/Casa Eficiente.**



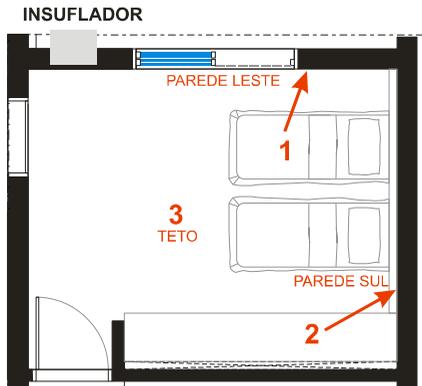
**Figura 4.3 – Sensor HOBOS posicionado no quarto de casal.**

- *Fluxímetros a gradiente tangencial* – desenvolvido por Güths et al (2005), este tipo de sensor faz parte do sistema de aquisição de dados existente na edificação. No quarto de casal, ambiente analisado no presente trabalho, há três fluxímetros, que são responsáveis pelo registro do fluxo de calor através das paredes e cobertura e também registram as temperaturas superficiais nestes pontos (Figura 4.4-a). Possuem espessura igual a 300 micrometros e medem 50 mm x 50 mm. A Figura 4.5 ilustra o posicionamento dos fluxímetros no interior do quarto de casal. A faixa de precisão do equipamento depende das condições de instalação, sendo estimada em  $\pm 5\%$ .

- *Termopares tipo T, AWG26* – utilizados para a medição das temperaturas superficiais, encontram-se colados em uma extensão de 50 mm sobre a superfície de medição para minimizar os efeitos de ponte de calor. Para medição da temperatura do ar os termopares ficaram a 50 mm da superfície. (Figura 4.4-b). Assim como os fluxímetros, a faixa de precisão do equipamento depende das condições de instalação, tendo sido estimada em  $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$ .



**Figura 4.4 – Fluxímetro (a) e termopares (b) posicionados na parede Leste do quarto de casal.**



**Figura 4.5 – Posicionamento dos fluxímetros no interior do quarto de casal.**

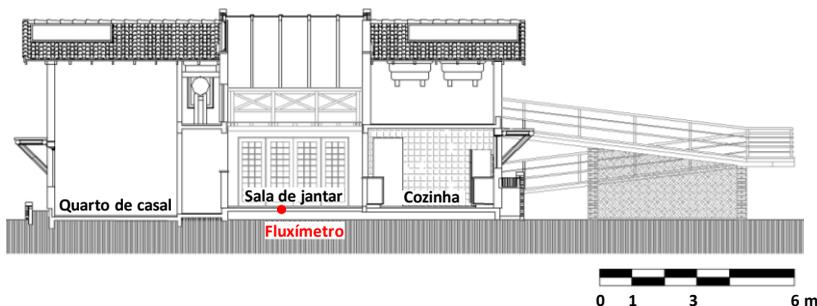
Os fluxímetros registram, de modo integrado, as trocas térmicas por convecção e radiação. Se a temperatura do ar interno for maior que a

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 4.6.



**Figura 4.6 – Esquema representativo dos fluxos de calor nas superfícies internas.**

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 da residência são térreos e não há fluxímetro instalado no piso do quarto de casal, foram utilizados nas análises dados do único fluxímetro instalado no piso, localizado na sala de jantar (Figura 4.7). Os registros dos sensores são armazenados em um sistema de aquisição controlado por um microcomputador, instalado no interior do ambiente monitorado.



**Figura 4.7 – Corte transversal da Casa Eficiente, indicando a localização do fluxímetro instalado no piso da sala de jantar.**

Também foram realizadas medições de vazão do ar dos insufladores, com o auxílio do equipamento ACCUBALANCE® Plus, modelo 8373 (Figura 4.8). Este instrumento realiza medições de vazão do ar e geralmente é utilizado em sistemas de condicionamento artificial, para medições em difusores e grelhas de exaustão (saídas de ar) (TSI INCORPORATED, 2002). Entretanto, também pode ser encaixado em aberturas de insuflamento, indicando através de um painel digital a temperatura (em °C) e a vazão do ar insuflado (em l/s, m<sup>3</sup>/h e m<sup>3</sup>/min). Foram realizadas medições instantâneas da vazão máxima e da vazão mínima do insuflador, para aferir os valores informados pelo fabricante. De acordo com o certificado de calibração do equipamento, a incerteza na leitura da vazão do ar, medida em l/s, corresponde a  $\pm 5\%$  do valor medido + 2,4 l/s. Após as medições de vazão dos insufladores, foram realizadas medições de velocidade do ar, com o auxílio de dois termo-anemômetros portáteis: (i) AIRFLOWTM modelo TA35, marca Skilltech<sup>19</sup> (Figura 4.9-a) e (ii) modelo AM4204HA, marca IMPAC (precisão:  $\pm 5\%$  da leitura) (Figura 4.9-b). Uma vez que estes instrumentos devem ser posicionados de acordo com a direção do fluxo de ar cuja velocidade se deseja medir, foram utilizados bastões de incenso para indicar o posicionamento adequado dos termo-anemômetros no instante das medições (Figura 4.9-c). Foram realizadas duas séries de medições instantâneas no ambiente, tendo sido definida uma malha de pontos de medição a 0,75 m de altura em relação ao piso, representando a área de permanência dos usuários (Figura 4.10).



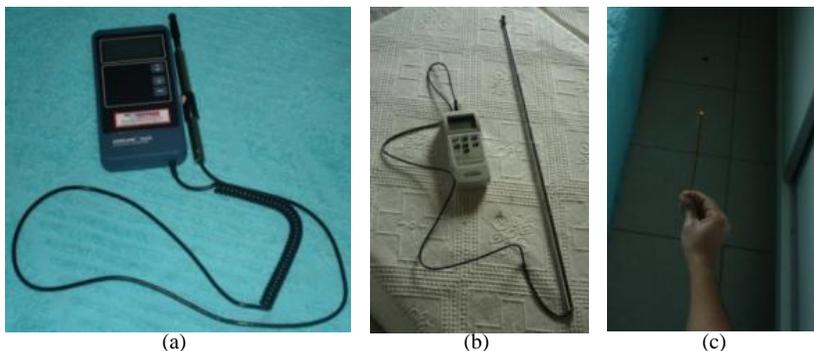
a) Medição



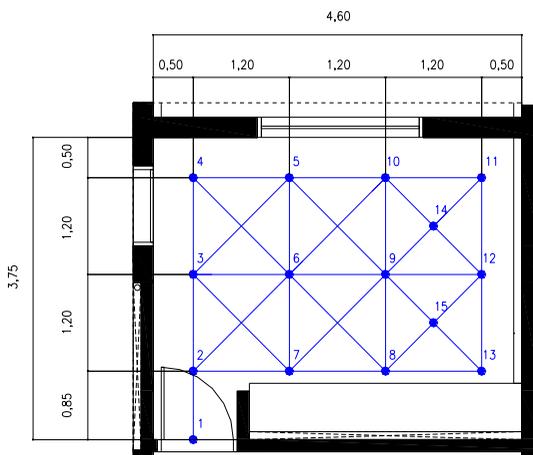
b) Vista do equipamento.

**Figura 4.8 – ACCUBALANCE® Plus.**

<sup>19</sup> De acordo com o registro da calibração do sensor, os erros médios por faixa de velocidade do ar (var) são os seguintes: -61% (var < 0,61 m/s); -31% (0,84 m/s ≤ var ≤ 1,18 m/s); -15% (1,56 m/s ≤ var ≤ 2,24 m/s) e -2% (2,92 m/s ≤ var ≤ 5,07 m/s) (dados obtidos junto ao Laboratório de Eficiência Energética em Edificações – LabEEE).



**Figura 4.9 – Recursos utilizados para medição da intensidade dos fluxos de ar no interior dos quartos: (a) e (b) termo-anemômetros; (c) bastão de incenso.**



**Figura 4.10 – Pontos de medição da velocidade do ar no interior do quarto de casal.**

As medições de vazão e de velocidade do ar foram realizadas com as portas internas abertas e as janelas do ambiente fechadas, representando as mesmas condições mantidas durante todo o período de monitoramento. Os resultados das medições de velocidade do ar nos diferentes pontos do ambiente interno, em conjunto com os registros das temperaturas superficiais das paredes Sul e Leste, foram utilizados para estimar os coeficientes de convecção durante os períodos de acionamento dos insufladores. Tratam-se de estimativas simplificadas, realizadas em função de um parâmetro adimensional: o número de

Reynolds ( $Re_L$ ), no caso da convecção forçada (INCROPERA; DEWITT, 2003). Adotou-se uma temperatura do ar igual a 300 K (27°C) no interior do ambiente, calculando-se o coeficiente de convecção das paredes ( $h_f$ ), consideradas com placas planas, utilizando-se o número de Reynolds para determinar o tipo de fluxo existente (laminar ou turbulento), conforme as equações 4.4 a 4.6:

$$h_f = \frac{4,86 \cdot Vel^{0,8}}{x^{0,2}} \quad \begin{array}{l} \text{Se } Re_L > 5 \cdot 10^5, \text{ fluxo} \\ \text{turbulento} \end{array} \quad \text{Equação 4.4}$$

$$h_f = 1,98 \cdot \left(\frac{Vel}{x}\right)^{0,5} \quad \begin{array}{l} \text{Se } Re_L < 5 \cdot 10^5, \text{ fluxo} \\ \text{laminar} \end{array} \quad \text{Equação 4.5}$$

$$Re_L = \frac{\rho \cdot Vel \cdot x}{\mu} \quad \text{Equação 4.6}$$

onde:

$h_f$  = Coeficiente de convecção forçada no ponto x da superfície ( $W/m^2 \cdot K$ );

Vel = Velocidade do ar próximo à superfície (m/s);

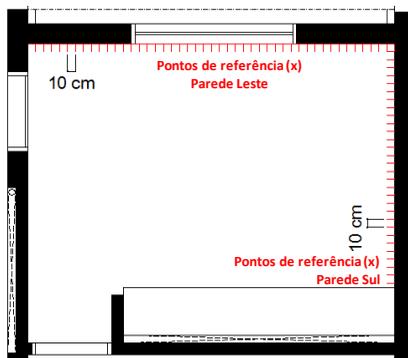
x = Ponto de referência para o cálculo do coeficiente de convecção local (m);

$Re_L$  = Número de Reynolds (adimensional);

$\rho$  = Densidade do ar ( $1,1614 \text{ kg/m}^3$ , a 300 K);

$\mu$  = Viscosidade do ar ( $1,846 \cdot 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{s/m}^2$ , a 300 K).

O coeficiente de convecção local ( $h_f$ ) foi calculado em diversos pontos de referência, distribuídos uniformemente ao longo de cada parede, em intervalos com 10 cm de extensão (Figura 4.11). O coeficiente de convecção médio de cada parede corresponde à média aritmética dos valores dos coeficientes de convecção local. Não foram efetuados registros da velocidade do ar no interior do quarto de casal durante os horários nos quais foi empregada a ventilação natural diurna. Desse modo, não foram realizadas estimativas para os coeficientes de convecção forçada nesses horários. Quanto aos horários sem ventilação, nos quais o ambiente permaneceu completamente fechado (período de 23/12/2007 a 02/01/2008), não há dados referentes às temperaturas superficiais, devido à ocorrência de uma falha nos registros do sistema de aquisição de dados da Casa Eficiente. Portanto, não foram realizadas comparações entre os coeficientes de convecção obtidos por simulação e estimativas de coeficientes de convecção natural, realizadas a partir dos dados do monitoramento *in loco*.



**Figura 4.11 – Pontos de referência (x) para a estimativa dos coeficientes de convecção localizada ( $h_f$ ) no interior do quarto de casal.**

Os coeficientes médios de convecção forçada, estimados para a parede Sul e parede Leste, foram comparados aos coeficientes calculados durante as simulações do desempenho térmico do ambiente, desenvolvidas durante a calibração do Modelo Base Final (ver item 5.3). Buscou-se identificar qual a correlação entre os valores estimados a partir das medições e os valores calculados durante as simulações. Os resultados dessas análises são apresentados no item 5.3.4 do presente trabalho.

Quanto aos horários de acionamento dos insufladores, foram definidos com base em dados do monitoramento da Casa Eficiente registrados entre os dias 23 e 31/12 de 2007, nos quais a mesma permaneceu completamente fechada, sem o emprego da ventilação mecânica noturna. Buscou-se observar em quais horários a temperatura externa manter-se-ia inferior à temperatura interna, de modo que o emprego da ventilação mecânica possibilitasse o resfriamento das superfícies internas.

O período total de monitoramento corresponde a 130 dias, de 23/12/2007 a 30/04/2008. Em cada mês, durante uma quinzena, a Casa Eficiente era mantida sob a responsabilidade da equipe do Laboratório de Monitoramento Bioclimático e Eficiência Energética – LMBEE para a realização de diversos experimentos. Buscou-se selecionar dias contidos no período de monitoramento que apresentassem temperaturas externas semelhantes, a fim de favorecer a comparação dos resultados. Desse conjunto de dados, foram selecionados sete períodos distintos para análise, configurando-se seis experimentos representativos de

padrões de ventilação diferenciados no período diurno, com e sem aplicação da ventilação mecânica noturna:

- a) Experimento 1 (Caso Base): 23/12/2007 a 02/01/2008 – esquadrias fechadas (24h);
- b) Experimento 2: 07 a 11/01/2008 – esquadrias abertas entre 9h e 12h e entre 14h e 17h;
- c) Experimento 3: 14/01 a 18/01/2008 – esquadrias abertas entre 9h e 11h;
- d) Experimento 4: 21 a 25/01/2008 – esquadrias abertas entre 9h e 11h e entre 13h e 18h, com ventilação mecânica noturna (21h às 7h);
- e) Experimento 5: 03 a 06/02/2008 – esquadrias fechadas (24h), com ventilação mecânica noturna (21h às 7h);
- f) Experimento 6: 11/02 a 15/02/2008 e 24/03 a 28/03/2008 – esquadrias abertas entre 8h e 11h, com ventilação mecânica noturna (21h às 7h).

Com exceção dos itens c) e f), foram selecionados, dentre os demais períodos acima, os dados utilizados para a calibração do modelo computacional da Casa Eficiente, conforme descrito nos itens 4.2.2 e 4.2.3 deste trabalho.

Durante a fase de monitoramento *in loco*, não foi avaliado o emprego da ventilação natural no período noturno, pois não foi concedida autorização para manter as janelas da Casa Eficiente abertas durante a noite e a madrugada<sup>20</sup>.

Buscou-se identificar o impacto dos diferentes padrões de ventilação diurna e noturna aplicados sobre o desempenho térmico do quarto de casal. Para tal, foram registrados os amortecimentos das temperaturas máximas e mínimas internas (°C) em relação à temperatura externa em todos os dias selecionados para análise. Os dias analisados foram agrupados em função da amplitude da temperatura externa, obtendo-se dados do comportamento térmico do ambiente sob diferentes condições de ventilação, porém sob condições ambientais externas semelhantes. Também foram observados os atrasos térmicos (h), correspondentes às diferenças entre os horários de ocorrência das

---

<sup>20</sup> A Casa Eficiente localiza-se no terreno do edifício sede da Eletrosul Centrais Elétricas S. A. (empresa subsidiária da Centrais Elétricas Brasileiras S.A. – Eletrobras), responsável pela manutenção e segurança da residência experimental.

temperaturas máximas e mínimas nos ambientes internos em relação ao exterior.

Além disso, foram avaliados os fluxos de calor através dos componentes construtivos, medidos *in loco* no ambiente monitorado. Desse modo, buscou-se identificar o efeito dos diferentes padrões de ventilação nos ganhos e perdas de calor proporcionados pelos componentes opacos. Para tal, foram utilizados os registros efetuados nas paredes Sul e Leste e no teto do quarto de casal.

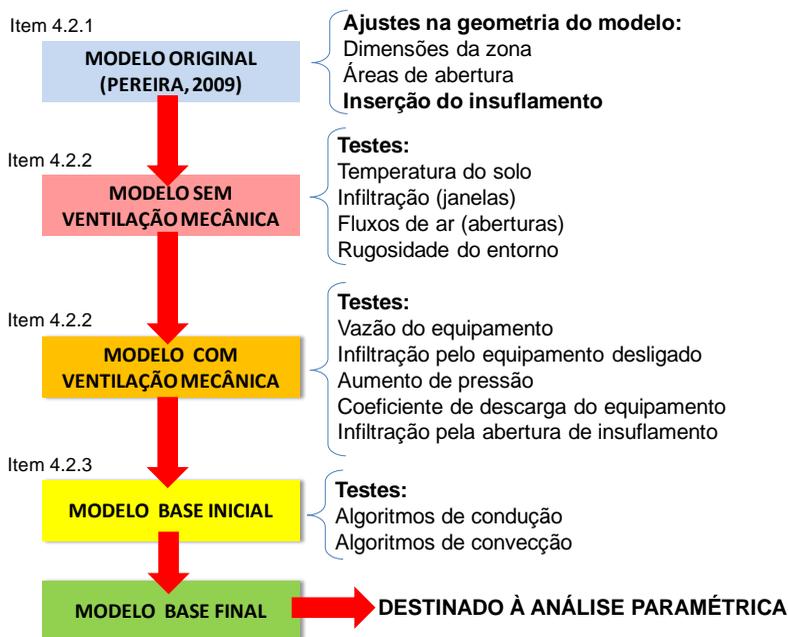
Os resultados da análise do desempenho térmico da Casa Eficiente nos períodos selecionados encontram-se descritos no Capítulo 5 (item 5.1). Os dados do monitoramento também subsidiaram o desenvolvimento da calibração do modelo computacional representativo da edificação, conforme apresentado a seguir.

#### 4.2 SIMULAÇÕES DO MODELO COMPUTACIONAL BÁSICO E PROCEDIMENTOS DE CALIBRAÇÃO

As simulações do desempenho térmico da edificação foram desenvolvidas com o *software* EnergyPlus v.6.0, cujas potencialidades foram abordadas no item 3.2.2. Foram consideradas as mesmas condições ambientais verificadas no período de monitoramento, de modo que o arquivo TRY de Florianópolis, ano 1963 (LABEEE, 2009) 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.

Foram realizados testes para dimensionar o período de *warmup days*, anterior a cada sequência de dias simulados. Este 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.

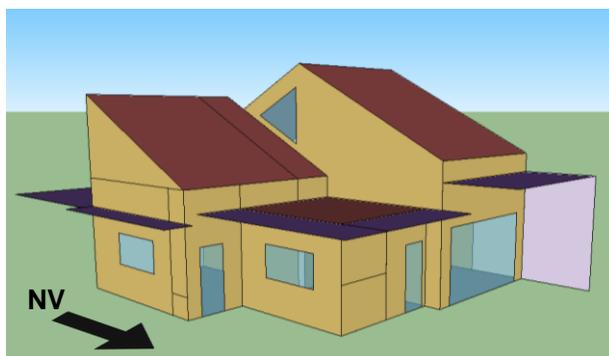
O procedimento completo de calibração desenvolveu-se em quatro etapas. A Figura 4.12 apresenta uma visão geral de todo o procedimento, indicando a sequência de ajustes realizados no modelo computacional e os testes realizados nas análises de sensibilidade. Nos itens 4.2.1 a 4.2.3 todo o processo é descrito detalhadamente.



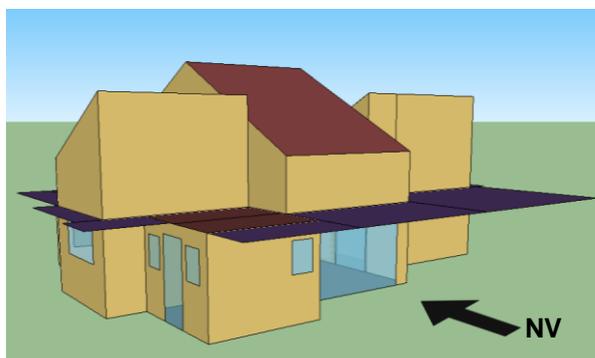
**Figura 4.12 – Etapas do procedimento de calibração do modelo computacional.**

#### **4.2.1 Descrição do modelo computacional original**

O modelo computacional original representa a edificação analisada durante a etapa de monitoramento (Figura 4.13). Este modelo foi construído e simulado anteriormente por Pereira (2009), tendo sido calibrado com base em dados de monitoramento *in loco* realizado nos meses de agosto, setembro e dezembro de 2007 e janeiro de 2008. A autora desenvolveu uma análise de sensibilidade do modelo em face de diversos parâmetros: temperatura do solo, volumetria, propriedades térmicas da envoltória, ganhos de calor pelos equipamentos, infiltração de ar, coeficientes de descarga das aberturas e expoente da velocidade do vento no exterior da edificação. Com base nos resultados dessa análise, foram realizados ajustes no modelo, de modo que o mesmo foi considerado adequado para representar o desempenho térmico da edificação.



a) Vista das fachadas Leste e Norte



b) Vista das fachadas Sul e Oeste

**Figura 4.13 – Perspectivas do modelo computacional. Fonte: Pereira (2009).**

Algumas das características originais do modelo foram mantidas no modelo básico utilizado no presente trabalho, tais como os tipos de materiais empregados (vide Tabela 4.1) e os ganhos de calor por geração interna (pessoas e equipamentos). Durante a calibração do modelo computacional original, Pereira (2009) testou variações de -10% a +20% em relação ao valor da resistência térmica de todos os materiais construtivos, cujos valores foram calculados com base na NBR 15220-2 (ABNT, 2005a). Portanto, os valores adequados das propriedades térmicas foram definidos com base nos resultados da análise de sensibilidade desenvolvida pela autora.

A carga advinda de equipamentos refere-se ao computador instalado no quarto de casal (potência média = 130 W), o qual

permanece em funcionamento 24h por dia, exceto em algumas situações onde foi desligado devido a problemas técnicos<sup>21</sup>. Considerou-se uma fração radiante de ganho de calor para este equipamento igual a 0,2. Em todas as simulações, a iluminação artificial não foi utilizada. Quanto à ocupação, durante o período analisado foi considerado como nível de atividade a limpeza doméstica (calor produzido por área de pele equivalente a  $1,80 \text{ m}^2 = 207 \text{ W}$ )<sup>22</sup>, correspondente a permanência de uma pessoa desempenhando esta tarefa entre as 9h e 9h30, de segunda a sexta-feira.

Entretanto, verificou-se que haviam divergências entre a geometria do modelo e as características da edificação construída, a Casa Eficiente. A área de cada zona térmica foi re-dimensionada exatamente de acordo com a área dos ambientes internos (excluindo-se a espessura das paredes), conforme o projeto *as built*, pois percebeu-se que as áreas internas do modelo original haviam sido superdimensionadas. Foi reduzida também a área de cada esquadria (janelas e portas externas), pois as mesmas haviam sido modeladas de acordo com a área real ( $3,57 \text{ m}^2$ ), porém completamente constituídas em vidro. Desse modo, a área das mesmas passou a corresponder apenas à área envidraçada das esquadrias reais: ( $2,72 \text{ m}^2$ ), sendo que o fator de abertura também foi corrigido a fim de manter a correta área de vão disponível para a ventilação, que corresponde a  $1,04 \text{ m}^2$ , equivalente a 6% da área de piso do ambiente ( $17,2 \text{ m}^2$ ).

Com relação à modelagem da ventilação mecânica, o programa EnergyPlus não oferece a opção de inserção de um equipamento semelhante aos insufladores instalados nos ambientes monitorados. O uso da ventilação noturna pode ser modelado no programa utilizando-se os parâmetros contidos no grupo de dados de entrada denominado System Availability Manager:Night Ventilation. Trata-se de uma estratégia destinada ao pré-condicionamento de edifícios que utilizam sistemas centrais de condicionamento artificial (sistema de expansão indireta). Portanto, é necessária a modelagem de um sistema completo, onde cada zona térmica possui sua própria unidade climatizadora. Nesses casos, o sistema pode ser programado para que os ventiladores sejam acionados durante a noite, quando as condições são favoráveis para realizar a tomada de ar externo. Assim, o ar no interior dos ambientes pode ser pré-resfriado, favorecendo a redução no consumo de

---

<sup>21</sup> O referido computador é responsável pelo controle do sistema de monitoramento termo-energético da Casa Eficiente, o qual se mantém ativo 24h por dia.

<sup>22</sup> Fonte: American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers - ASHRAE (2005).

energia com condicionamento durante o dia seguinte. Para reduzir o consumo, os parâmetros de desempenho dos ventiladores no período noturno são diferenciados em relação à sua operação normal. Trata-se de uma estratégia interessante para o caso de edifícios comerciais, onde a carga térmica durante o período de ocupação é bastante elevada, devido à grande quantidade de equipamentos e pessoas.

Entretanto, para o caso investigado no presente estudo, não representa uma opção adequada, pois além de requerer a modelagem de um sistema completo, há a interferência de vários componentes até que o ar externo possa ser inserido na zona (dutos, serpentinas e a própria unidade climatizadora).

A opção de modelagem escolhida consiste em simular a exaustão do ar do ambiente, mantendo-se uma abertura na fachada Leste para a tomada do ar externo. O EnergyPlus possibilita a modelagem de exaustores, desde que os mesmos estejam instalados em paredes que mantenham contato com o ambiente externo. Entretanto, não há a possibilidade de reverter o funcionamento do equipamento, programando-o para insuflar o ar ao invés de exaurí-lo.

Conforme mencionado no item 3.2.2, o programa EnergyPlus desenvolve as simulações de ventilação através de um modelo de rede nodal, onde os ambientes são representados por “nós”, interligados através das aberturas. No caso da representação da ventilação mecânica, ao se modelar um exaustor juntamente com uma abertura de entrada de ar, ambos posicionados de modo adequado, cria-se um percurso para o fluxo de ar. A Figura 4.14 ilustra a solução considerada para a modelagem da exaustão do ar. Na Figura 4.14-b, o posicionamento das aberturas para entrada de ar corresponde exatamente à localização dos insufladores.

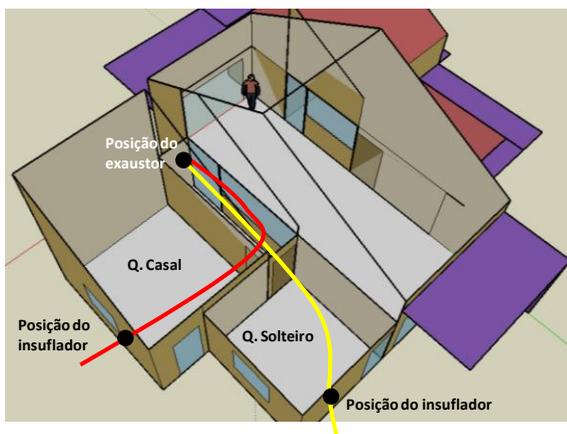
Observa-se ainda que foi posicionado um único exaustor na parede externa da zona correspondente ao corredor, na fachada Sul (Figura 4.14-a), para que o percurso dos fluxos de ar seguisse a mesma sequência que ocorre na edificação real. Portanto, nas simulações, o quarto de solteiro também foi submetido à ventilação mecânica noturna, embora seu desempenho térmico não tenha sido analisado<sup>23</sup>. A Figura 4.15 ilustra a representação dos fluxos de ar, de acordo com o modelo de rede utilizado pelo EnergyPlus, decorrente do insuflamento (Figura 4.15-a) e da exaustão (Figura 4.15-b).

---

<sup>23</sup> O desempenho térmico do quarto de solteiro não foi avaliado devido às incertezas na modelagem do teto jardim, tipo de cobertura empregada no ambiente.



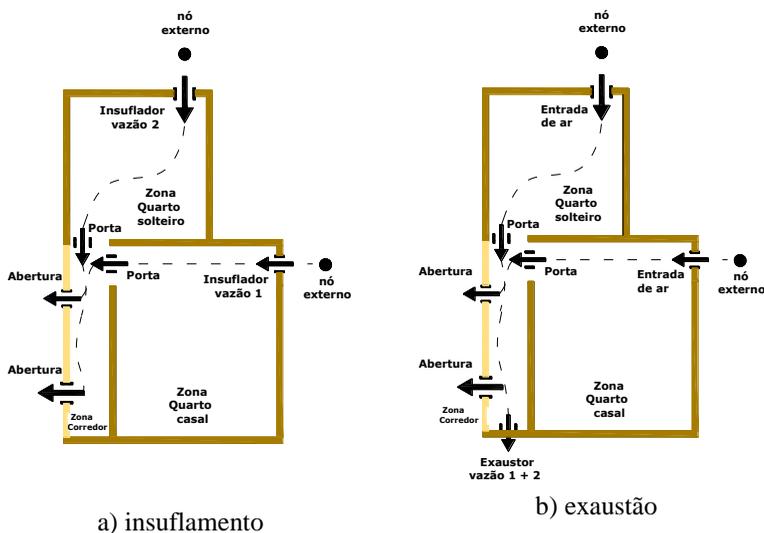
a) Posicionamento do exaustor na fachada Sul.



b) Vista superior (sem a cobertura), indicando os fluxos de ar decorrentes da exaustão.

**Figura 4.14 – Posicionamento dos exaustores e das aberturas de entrada de ar para ventilação mecânica noturna.**

Caso fosse possível a modelagem dos insufladores, o controle da vazão seria feito na entrada do ar externo em cada zona e a saída do fluxo ocorreria pelas portas dos quartos, que, por sua vez, representam a ligação com a zona adjacente, o corredor. No caso da exaustão, o controle da vazão pode ser feito somente na saída do ar e, para manter a mesma sequência do fluxo descrito anteriormente: 1) entrada de ar; 2) zona quarto casal 3) saída de ar e 4) zona corredor, o local considerado mais adequado foi a parede do corredor, na fachada Sul. Como o controle da vazão do ar para ambos os ambientes se localiza no mesmo ponto, o exaustor foi modelado com vazão equivalente ao dobro da vazão de um único exaustor.



**Figura 4.15 – Representação da ventilação mecânica nos ambientes de acordo com o modelo de rede.**

Convém salientar que os percursos dos fluxos de ar ilustrados na Figura 4.15 são uma representação esquemática da ligação entre os nós do modelo de rede do EnergyPlus, considerando-se que as portas internas dos ambientes estão abertas, tal qual ocorreu durante o período de realização dos experimentos.

Embora o modelo original construído por Pereira (2009) possuísse os coeficientes de pressão de todas as aberturas já quantificados, para a modelagem da exaustão foi necessário calcular os coeficientes de pressão para as aberturas de entrada do ar criadas nas fachadas Leste (quarto de casal) e Norte (quarto de solteiro), bem como para o ponto onde o exaustor foi instalado. Para tal, utilizou-se o programa *Cp Generator*, desenvolvido no TNO Building Research a partir de medições em túneis de vento (TNO, 2010). Com o *Cp Generator* podem ser modeladas edificações de formato retangular, considerando-se as obstruções do entorno e diferentes rugosidades do terreno. Esta 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. Os valores desses

coeficientes de pressão foram inseridos no programa EnergyPlus, possibilitando a simulação da ventilação pelo módulo *Airflow Network*.

Após a inserção do exaustor e das aberturas para insuflamento, do ajuste da geometria (área dos ambientes simulados e áreas de abertura), dos padrões de ventilação, de sombreamento e de ocupação dos ambientes, de acordo com os períodos considerados, deu-se início à análise de sensibilidade, destinada à calibração do Modelo Base Inicial.

As variáveis analisadas inicialmente, relativas a características básicas do modelo, foram testadas sem a ventilação mecânica: temperatura de solo, infiltração de ar por frestas, fluxos de ar através das aberturas e rugosidade do entorno<sup>24</sup>. Em seguida, foram realizados testes com a ventilação mecânica, contemplando ajustes da vazão e de outros parâmetros relacionados ao equipamento, bem como características relacionadas à abertura destinada ao insuflamento do ar.

#### 4.2.2 Procedimentos de calibração do Modelo Base Inicial

O modelo computacional foi calibrado a partir da análise de sensibilidade do mesmo frente a variações dos parâmetros de entrada das simulações. O processo de calibração consiste em testar limites pré-fixados para parâmetros de simulação selecionados. 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* no quarto de casal, utilizando-se as equações 4.7 e 4.8. 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. Nesta etapa, foram mantidos os algoritmos adotados como padrão pelo *software* para o cálculo da condução (CTF) e da convecção (*TARP*). Na etapa seguinte, foram testadas outras combinações de algoritmos, conforme descrito no item 4.2.3, obtendo-se o Modelo Base Final.

$$E. Q. = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - x_i)^2}{N} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad \text{Equação 4.7}$$

$$D. M. = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - x_i)}{N} \quad \text{Equação 4.8}$$

---

<sup>24</sup> O termo rugosidade do entorno diz respeito às características topográficas existentes no entorno imediato da edificação, também relacionado com a existência de quaisquer obstruções à ventilação natural.

onde:

E.Q. – Erro médio quadrático

D.M. – Desvio médio

$y_i$  - valor estimado e  $x_i$  - valor medido

N - número de observações

Partindo-se de uma condição inicial onde 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.

No primeiro período considerado (dias 01 e 02 de janeiro), os ambientes permaneceram completamente fechados, 24h por dia. No segundo (08 a 10 de janeiro), apenas a ventilação natural durante o período diurno foi aplicada (9h às 12h e 14h às 17h), sem o emprego da ventilação mecânica noturna. A Figura 4.16 apresenta as variáveis da análise de sensibilidade desenvolvida até se configurar o modelo calibrado sem ventilação mecânica.

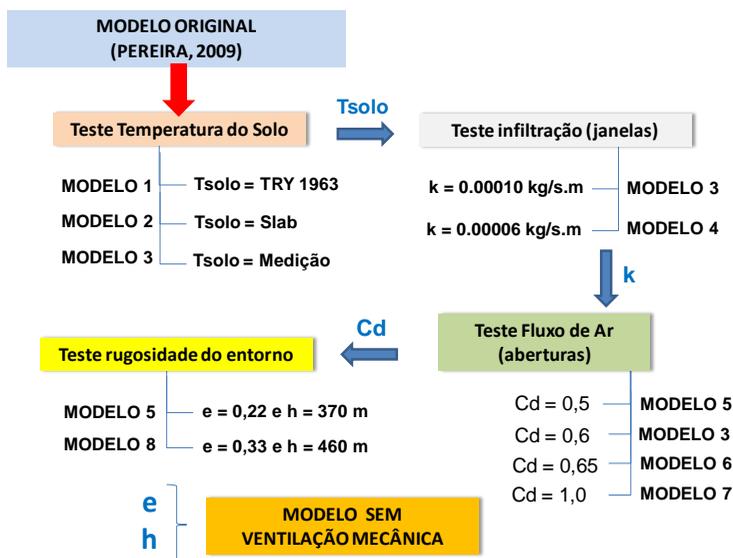


Figura 4.16 – Simulações realizadas para calibração do modelo da edificação sem ventilação mecânica.

Para cada variável testada na análise de sensibilidade há um modelo correspondente, totalizando-se oito modelos nesta primeira etapa do procedimento de calibração (Modelo 1 a Modelo 8, indicados na Figura 4.16). A seguir, os dados de entrada que caracterizam os modelos referentes a cada teste são descritos com detalhes.

No período sem ventilação natural diurna, foi testada a sensibilidade do modelo diante de diferentes dados de entrada para a temperatura do solo. A análise de sensibilidade desenvolvida por Pereira (2009) para a calibração do modelo computacional original da Casa Eficiente indicou uma influência significativa deste parâmetro na variação da temperatura dos ambientes internos. Também foi avaliado o efeito de alterações na infiltração de ar através das janelas. Para os dias 01 e 02 de janeiro, foram analisadas as seguintes variáveis:

- a) Temperatura do solo - foram testadas três possibilidades: i) dados obtidos a partir do arquivo TRY da cidade de Florianópolis (Modelo 1); ii) dados processados a partir do aplicativo *Slab*, destinado a calcular a temperatura mensal do solo em função das características do clima local e da variação das temperaturas internas das zonas (Modelo 2) e iii) dados de temperatura do solo medidos *in loco* na edificação (Modelo 3);
  
- b) Infiltração de ar através das janelas - caracterizada através do parâmetro coeficiente do fluxo de massa de ar por frestas ( $k$ ), é função da geometria da abertura e serve para caracterizar as perdas, devido à fricção da entrada e da saída do fluxo de ar através da abertura, e as perdas ao longo do percurso do fluxo de ar. 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: 0,00010 kg/s.m (Modelos 1, 2 e 3) e 0,00006 kg/s.m (Modelo 4), relativos às janelas de correr de duas folhas (plástico), segundo Liddament (1986).

Considerando-se o período de 08 a 10 de janeiro (com emprego da ventilação natural das 9h às 12h e das 14h às 17h), a análise de sensibilidade incluiu as seguintes variáveis:

- a) Fluxo de ar através das aberturas - caracterizado pelo coeficiente de descarga ( $C_d$ ), um parâmetro adimensional, diferenciado conforme a geometria da abertura, cujo valor

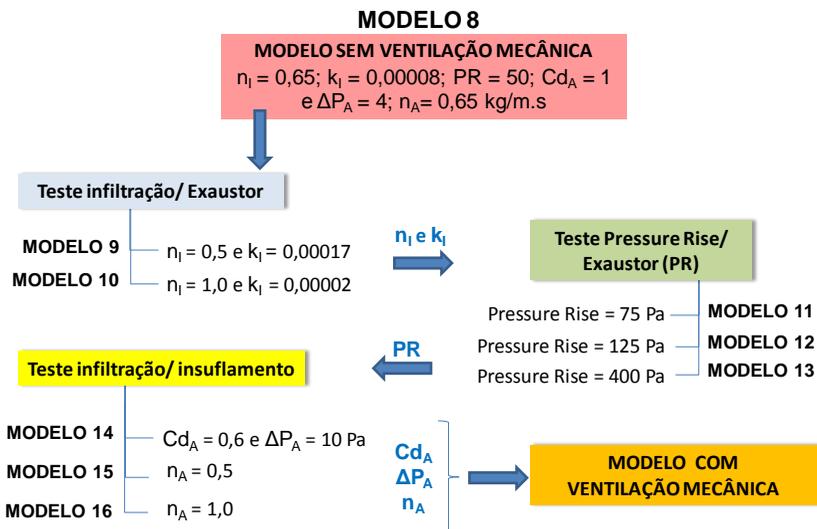
máximo é 1,0 (SANTAMOURIS, 1998). Os valores utilizados nas simulações foram estabelecidos considerando-se a relação entre a área da abertura e a área de parede onde a mesma se situa, conforme recomendado por Aynsley et al. (1977), para uma incidência do vento perpendicular à abertura. Desse modo, para o quarto de casal, foram testados os valores de 0,5 (Modelo 5) e 0,65 (Modelo 6), já que a área de abertura é inferior a 10% da área da parede. No Modelo 3, utilizou-se um valor intermediário:  $C_d = 0,6$ . Também foi testado o valor de  $C_d = 1$  (Modelo 7), valor adotado como *default* pelo EnergyPlus.

- b) Expoente da velocidade de vento (e) e altura da camada limite (h) – tais parâmetros caracterizam as condições do entorno da edificação, com relação ao perfil topográfico e existência de obstruções à ventilação natural. Foram testados os seguintes pares de valores: 0,22 e 370 m, terreno rugoso (Modelos 3 a 7) e 0,33 e 460 m, ambiente urbano (Modelo 8).

Após esta primeira análise, partiu-se para os testes com a ventilação mecânica noturna, considerando-se dois períodos distintos.

No período de 03 a 06 de janeiro, a referida estratégia foi aplicada e os ambientes permaneceram completamente fechados, 24h por dia, sem emprego da ventilação natural diurna. No quarto período, foi empregada também a ventilação natural pela manhã e à tarde (9h às 11h e 13h às 18h). A Figura 4.18 descreve as etapas de simulação realizadas para a calibração do modelo representativo da ventilação mecânica noturna.

Nesta etapa, foram simulados oito novos modelos (Modelo 9 a Modelo 16), os quais foram configurados considerando-se as incertezas introduzidas na simulação, em decorrência da modelagem da ventilação mecânica. Além disso, antes de se desenvolver a análise de sensibilidade com estes modelos, foram realizados testes com o Modelo 8, configurado na etapa anterior, a fim de determinar a vazão adequada do insuflador de ar. Para tal, foram testados os seguintes valores:  $0,18 \text{ m}^3/\text{s}$  (vazão máxima especificada pelo fabricante);  $0,31 \text{ m}^3/\text{s}$  (valor medido *in loco*) e  $0,24 \text{ m}^3/\text{s}$  (valor intermediário).



**Figura 4.18 – Simulações realizadas para calibração do modelo da edificação com ventilação mecânica noturna.**

Os testes desenvolvidos durante a análise de sensibilidade são descritos a seguir, indicando-se os dados de entrada que caracterizam todos os modelos indicados na Figura 4.18:

- Expoente do fluxo de massa de ar do exaustor desligado - ( $n_1$ ): O expoente  $n_1$  depende das características do fluxo de ar e pode variar de 0,5 (fluxo turbulento) a 1,0 (fluxo laminar), segundo Allard (1998). O programa indica o valor 0,65 como referência. Estes três limites foram testados na análise de sensibilidade, sendo utilizado o valor 0,65 no Modelo 8; 0,5 para o Modelo 9 e 1,0 para o Modelo 10.
- Coeficiente do fluxo de massa de ar do exaustor desligado - ( $k_1$ ): Este parâmetro também está relacionado à infiltração que ocorre através do exaustor quando o mesmo encontra-se desligado. O programa não indica valores de referência para este parâmetro. Portanto, utilizou-se a Equação 4.9 para o cálculo de  $k_1$  (ALLARD, 1998), em função dos valores de  $n_1$  testados: 0,5; 0,65 e 1,0.

$$k_I = \frac{L_{cr} \times 9,7 \times (0,092)^{n_I}}{1000} \quad \text{Equação 4.9}$$

onde,

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

$L_{cr}$  = Comprimento do orifício (m);

$n_I$  = Expoente do fluxo de massa de ar (adimensional).

Considerando-se a densidade do ar igual a  $1,2041 \text{ kg/m}^3$  (a  $20^\circ\text{C}$ ) e utilizando-se a referida equação, foram obtidos os seguintes resultados para os cálculos do  $k_I$ , respectivamente:  $0,00017 \text{ kg/s. Pa}^n$ , para  $n = 0,5$  (Modelo 9);  $0,00008 \text{ kg/s. Pa}^n$ , para  $n = 0,65$  (Modelo 8) e  $0,00002 \text{ kg/s. Pa}^n$ , para  $n = 1,0$  (Modelo 10). O comprimento do orifício utilizado nos cálculos corresponde à altura da abertura de insuflamento do ar, correspondente a  $0,15 \text{ m}$ .

- Aumento de pressão - (Pressure Rise – PR): indica a elevação de pressão, em Pascal, considerando-se a pressão atmosférica no nível do mar ( $101.325 \text{ Pa}$ ) e temperatura igual a  $20^\circ\text{C}$ . O programa não sugere limites de variação, então foram testados os seguintes valores:  $50$  (Modelo 8),  $75$  (Modelo 11),  $125$  (Modelo 12) e  $400$  (Modelo 13), obtidos a partir de outros exemplos de casos simulados com o programa (ENERGYPLUS, 2010);
- Coeficiente de descarga ( $Cd_A$ ) e diferença de pressão na abertura de entrada do ar ( $\Delta P_A$ ): estes parâmetros, utilizados em conjunto, estão relacionados à abertura inserida para insuflamento. Esta abertura foi modelada como um vão livre, através do qual o fluxo de ar penetra nos horários em que a ventilação mecânica é ativada, cuja área corresponde à abertura dos insufladores:  $0,31 \text{ m} \times 0,15 \text{ m}$ . Nesse caso, foram utilizadas duas combinações de valores:  $Cd_A = 1$  e  $\Delta P_A = 4 \text{ Pa}$  (utilizada no Modelo 8) ou  $Cd_A = 0,6$  e  $\Delta P_A = 10 \text{ Pa}$  (Modelo 14), conforme sugerido no manual do programa (ENERGYPLUS, 2010);
- Expoente do fluxo de ar da abertura de entrada do ar ( $n_A$ ): também relacionado à abertura de insuflamento, depende das características do fluxo de ar e pode variar de  $0,5$  (Modelo 15) a  $1,0$  (Modelo 16). O programa indica o valor  $0,65$  como referência (Modelo 8).

Ao final desta etapa, foi configurado o Modelo Base Inicial, que foi submetido aos testes dos algoritmos de condução e convecção, conforme descrito a seguir.

#### **4.2.3 Calibração do Modelo Base Final: teste dos algoritmos de condução e convecção**

Conforme descrito no item 3.2.2, o programa EnergyPlus utiliza diferentes algoritmos para a solução dos processos de condução e convecção que, juntamente com os processos de radiação, definem o balanço térmico de uma zona no modelo computacional. Interação no balanço térmico os ganhos de calor relativos à ocupação, infiltração, iluminação, equipamentos e as trocas de calor entre o ar e as superfícies que compõem o ambiente, através do processo de convecção. Para cada componente, a temperatura superficial correspondente será influenciada também pelo processo de condução, que ocorre com a transferência de calor através da massa construtiva, e pela radiação de onda longa (trocas entre as superfícies e com fontes internas) e onda curta (radiação solar)<sup>25</sup>.

Em se tratando do estudo do balanço térmico de uma zona, destaca-se um parâmetro importante: o coeficiente de convecção ( $h_c$ ). Erros na estimativa deste parâmetro interferem no balanço térmico, uma vez que o resultado do produto do coeficiente de convecção  $h_c$  pela diferença de temperatura entre a superfície e o ar ( $T_{\text{superfície}} - T_{\text{ar-zona}}$ ) determina a intensidade do fluxo de calor num dado instante de tempo.

Visando identificar qual a influência da escolha desses algoritmos nos resultados da simulação, os processos de condução através dos elementos opacos e convecção entre as superfícies internas e o ar são focos de investigação neste trabalho. Para tal, foi desenvolvida uma segunda série de simulações, que foram configuradas a partir de combinações distintas de algoritmos de condução e convecção disponíveis no EnergyPlus.

Com relação ao cálculo da condução, foram excluídos os algoritmos HAMT e EMPD. O algoritmo HAMT fornece perfis de temperatura e umidade nas diferentes camadas constituintes das paredes e considera a umidade presente no ar. Já o algoritmo EMPD considera também os efeitos de adsorção e desorção nas superfícies que delimitam o ambiente, tais como as paredes e a própria mobília. Ambos os

---

<sup>25</sup> Ao contrário dos processos de condução e convecção, para o cálculo da radiação no interior da zona térmica o EnergyPlus apresenta apenas uma possibilidade de solução.

algoritmos não foram utilizados por dois motivos. Em primeiro lugar, requerem dados de entrada relativos às propriedades higroscópicas de cada material constituinte da envoltória, de difícil determinação, tais como o conteúdo de água presente no material, coeficientes de transporte de líquido e resistência à difusão do vapor de água (ENERGYPLUS, 2010). Em segundo lugar, a aplicabilidade desses algoritmos está relacionada a simulações de sistemas de condicionamento artificial, visto que a umidade possui um efeito significativo no desempenho desses sistemas durante os períodos onde há necessidade de resfriamento. Portanto, não é o caso das simulações desenvolvidas neste trabalho.

Com relação ao cálculo da convecção, foi excluído das simulações o algoritmo *Ceilling Diffuser (CeID)*, visto que o mesmo só pode ser empregado quando há algum sistema de condicionamento artificial instalado no ambiente. Também foi excluído o algoritmo *Trombe Wall*, específico para a simulação de paredes trombe.

Considerando-se as demais opções de algoritmos, a segunda série de simulações foi desenvolvida utilizando-se o Modelo Base Inicial resultante da etapa anterior, o qual havia sido simulado com o emprego dos algoritmos *Conduction Transfer Function e TARP*. Para cada simulação, foi efetuada uma combinação diferenciada de algoritmos para a solução da condução e da convecção (vide item 3.2.2):

- Algoritmos para o cálculo da condução: 2 opções, *Conduction Transfer Function – CTF* e *Detailed Conduction Finite Difference – CondFD*;
- Algoritmos para o cálculo da convecção: 3 opções, *TARP*, *Simple Natural – SimN* e *Adaptive*.

De acordo com as opções listadas acima e as possibilidades de combinação desses algoritmos aos pares para a realização das simulações, têm-se um total de 6 combinações. Nesta 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 de 2008, único período no qual foi empregada a ventilação natural pela manhã e à tarde e também a ventilação mecânica à noite.

Foram utilizados para a calibração os registros das temperaturas superficiais das paredes externas e do teto do quarto de casal. Os dados registrados pelo fluxímetro instalado no piso da sala de jantar também foram analisados, visto ser este o único ponto de medição dos fluxos de calor no piso da edificação, sendo que ambos os ambientes são térreos. Também foi comparada a variação diária dos ganhos e perdas de calor através desses componentes, bem como os somatórios de ganhos e perdas correspondentes a cada dia monitorado, obtidos a partir das simulações, com os valores do fluxo de calor medidos *in loco*, os quais representam o fluxo de calor em cada superfície, por convecção e radiação, de forma integrada. Os critérios para a definição da melhor combinação entre os algoritmos foram os erros quadráticos e os desvios médios verificados na comparação entre os valores simulados e medidos, de acordo com as equações 4.7 e 4.8 (vide item 4.2.2).

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. Este valor situa-se dentro da faixa de 90% de aceitabilidade da temperatura neutra de conforto calculada para o período de análise (meses de janeiro e fevereiro de 2008), que corresponde a 25,4°C. A temperatura neutra de conforto ( $T_{neutra}$ ) foi calculada de acordo com a equação proposta por Dear e Brager (2002), em função da temperatura média externa ( $T_{ext-média}$ ) (Equação 4.10):

$$T_{neutra} = 0,31T_{ext-média} + 17,8 \quad \text{Equação 4.10}$$

$T_{neutra}$  = Temperatura neutra de conforto (°C);

$T_{ext-média}$  = Temperatura média externa correspondente ao período monitorado, meses de janeiro e fevereiro (°C).

Convém salientar que a temperatura base igual a 26°C também foi utilizada no estudo desenvolvido por Sorgato (2009) para residências em Florianópolis e também na metodologia de avaliação da eficiência energética da envoltória de edificações residenciais pelo método prescritivo, segundo o RTQ-R. No método prescritivo do RTQ-R, o parâmetro GHR (Graus Hora de Resfriamento) representa o indicador responsável pela classificação da eficiência energética da envoltória durante o verão, predito por equações de regressão linear múltipla, que por sua vez são diferenciadas em função da zona bioclimática onde a

edificação se localiza. Na formulação de todas as equações de regressão destinadas a estimar o GHR, foi adotada a temperatura base de 26°C (VERSAGE, 2011).

No total, foram simulados 11 modelos, onde foram combinados os algoritmos CTF e ConDFD (condução), com os algoritmos *TARP*, *Simple Natural* e *Adaptive* (convecção). Além da análise de sensibilidade do modelo computacional frente às diferentes combinações de algoritmos, os coeficientes de convecção calculados pelo *software* EnergyPlus, de acordo com o algoritmo *Simple*, *TARP* (Equação 4.11) e *Adaptive* (Equação 4.12) foram comparados aos coeficientes de convecção estimados a partir dos dados do monitoramento *in loco*.

$$h_{TARP} = 1,31 \cdot |\Delta T|^{1/3} \quad \text{Equação 4.11}$$

$$h_{ADAPTIVE} = 1,235 \cdot e^{(0,0467H)} \cdot |\Delta T|^{0,316} \quad \text{Equação 4.12}$$

onde:

$\Delta T$  = Diferença de temperatura entre a superfície e o ar no interior do ambiente (°C);

H = altura do teto da zona térmica<sup>26</sup> (m).

Para o algoritmo *Simple*, o valor do coeficiente de convecção é fixo, igual a 3,076 W/m<sup>2</sup>.K para superfícies verticais. Quanto ao algoritmo *Adaptive*, há 29 tipos diferentes de equações para o cálculo do coeficiente de convecção, sendo que o *software* seleciona automaticamente a equação mais indicada para as condições do ambiente simulado e indica nos resultados qual foi o modelo utilizado. Para o ambiente em análise, a equação 4.12 corresponde ao modelo de Fohanno Polidori para paredes verticais (ENERGYPLUS, 2011) tendo sido selecionada automaticamente pelo *software* para aplicação nas simulações.

Dentre os coeficientes de convecção calculados nas simulações, buscou-se identificar qual opção apresentou um melhor ajuste (menor diferença) em relação aos coeficientes de convecção forçada, estimados

---

<sup>26</sup> No EnergyPlus, a altura H pode ser maior do que a altura de uma determinada superfície, pois uma parede pode ser composta por superfícies de diversos tamanhos. Devido à empena da cobertura (plano inclinado 27° em relação à horizontal), a parede Leste do ambiente analisado possui altura variável. Desse modo, foram efetuados dois cálculos para h<sub>ADAPTIVE</sub>, em função de ambas as alturas.

a partir dos dados do monitoramento *in loco*. Para tal, os coeficientes de convecção forçada foram estimados em função dos diferenciais de temperatura entre a superfície e o ar no interior do ambiente ( $\Delta T$ ), observados durante o período em análise (22/01 a 25/01).

O modelo computacional resultante desta etapa da calibração representa o Modelo Base Final, calibrado e ajustado de acordo com a combinação de algoritmos mais adequada à solução do balanço térmico da zona modelada, servindo como referência para a elaboração dos modelos computacionais utilizados para a análise paramétrica efetuada a partir do balanço térmico. Os resultados dos testes dos algoritmos de condução e convecção são apresentados no item 5.3.

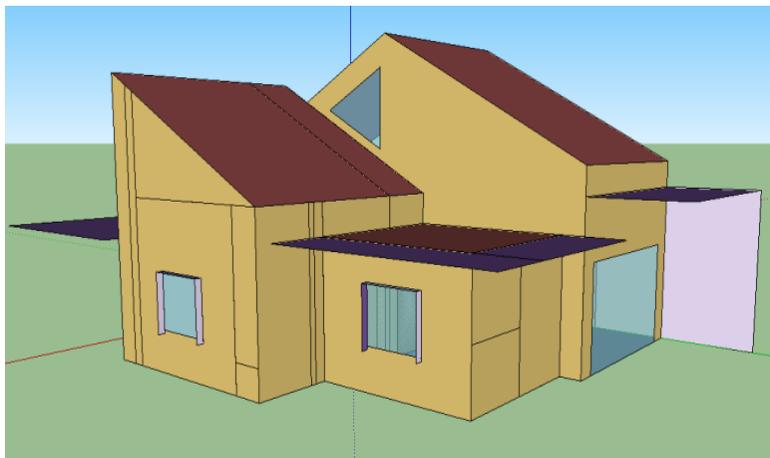
#### 4.3 CARACTERIZAÇÃO DOS MODELOS COMPUTACIONAIS DESTINADOS À ANÁLISE PELO MÉTODO DO BALANÇO TÉRMICO

Nesta etapa foram desenvolvidas novas simulações, incorporando diversas combinações de parâmetros cuja influência é capaz de interferir no desempenho térmico da edificação. Foi utilizado o Modelo Base Final calibrado na etapa anterior, mantendo-se a mesma orientação e dimensões, porém substituindo-se os componentes construtivos e alterando-se os padrões de ventilação natural diurna e mecânica noturna, assim como os padrões de ocupação e a carga térmica referente a pessoas, equipamentos e iluminação.

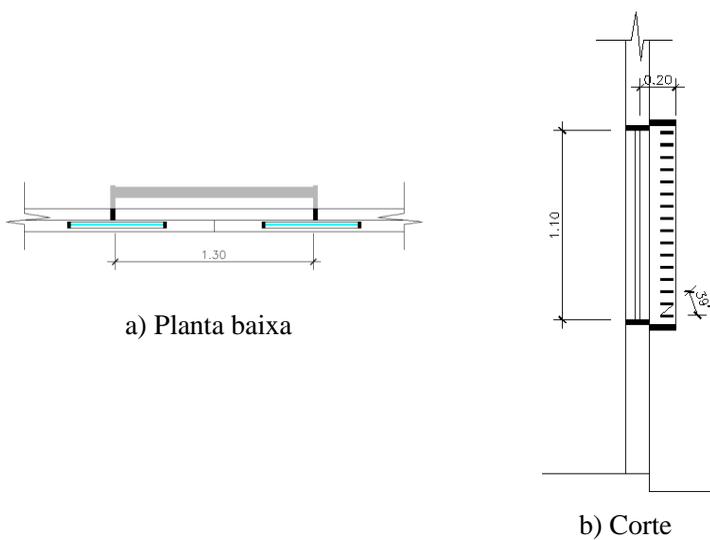
Com relação à geometria do modelo, foram modificadas as áreas de abertura dos quartos (Figura 4.19). As portas externas localizadas nas fachadas de ambos os quartos foram retiradas. A janela da fachada Leste foi mantida (janela de correr com 2 folhas), sendo que sua área foi ampliada para  $1,4 \text{ m}^2$ , equivalente a 8,3% da área de piso do ambiente, com possibilidade de abertura de 100% do vão para ventilação<sup>27</sup>. Entretanto, nas simulações com ventilação natural, optou-se por manter o mesmo percentual de abertura para ventilação do Modelo Base Inicial: 6% da área de piso. Para assegurar a proteção solar no verão, foi inserido um brise fixo (Figura 4.20), cujo ângulo vertical ( $39^\circ$ ) proporciona sombreamento total a partir das 8h durante o verão (Figura 4.21).

---

<sup>27</sup> O Regulamento Técnico da Qualidade (RTQ-R) para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (PROCEL, 2010) e o Código de Obras de Florianópolis (FLORIANÓPOLIS, 2003) recomendam um percentual mínimo de 8% da área de piso do ambiente para o dimensionamento do vão de ventilação.



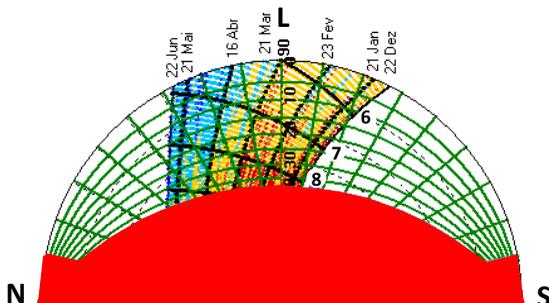
**Figura 4.19 – Vista do modelo computacional.**



a) Planta baixa

b) Corte

**Figura 4.20 – Proteção solar da janela do quarto de casal, localizada na fachada Leste.**



**Figura 4.21 – Máscara de sombreamento das janelas dos quartos.**

Quanto ao uso da iluminação, adotou-se uma padronização da densidade de potência instalada de iluminação de  $5 \text{ W/m}^2$  em todos os ambientes, semelhante ao estudo desenvolvido por Sorgato (2009). Segundo o autor, esta baixa densidade de potência justifica-se devido ao aumento significativo do uso de lâmpadas fluorescentes compactas no contexto residencial brasileiro, conforme foi identificado na pesquisa de Posses de Eletrodomésticos e Hábitos de Consumo (ELETROBRAS; PROCEL, 2007). O uso da iluminação artificial no quarto de casal foi restrito aos seguintes horários: durante a semana, ocorreu entre 7h e 8h e entre 18h e 23h; nos finais de semana, ocorreu entre 18h e 19h e também entre 22h e 0h. Nos demais ambientes, os horários de utilização da iluminação artificial são os seguintes: entre 18h e 0h para a sala de estar/jantar e entre 18h e 21h para a cozinha, durante todos os dias da semana. Quanto aos equipamentos, considerou-se o uso de um microcomputador no quarto de casal durante os períodos de ocupação do ambiente, até as 23h.

Durante os dias úteis, os horários de ocupação coincidem com os padrões de ventilação determinados para o ambiente. Estabeleceu-se que a janela seria mantida aberta durante o dia sempre que o quarto de casal estivesse ocupado, sempre por dois usuários, desempenhando atividades leves: dormindo (81 W), descansando, sentado (108 W) ou utilizando o computador, digitando (117 W). Nos finais de semana, os períodos de ocupação do quarto foram os mesmos em todas as simulações, com permanência dos dois usuários entre 22h e 10h, desempenhando atividades leves ou dormindo.

Considerando-se que a residência seria ocupada por quatro moradores, também foram estabelecidos padrões ocupação para os demais ambientes, caracterizando-se as taxas metabólicas

correspondentes às atividades desempenhadas pelos ocupantes. De segunda a sexta-feira, a sala de estar/jantar foi ocupada por quatro moradores no intervalo de 18h até 21h. Entre 9h e 12h, assim como no intervalo entre 14h e 18h, a sala foi ocupada por dois moradores. Entre 9h e 12h e das 14h às 18h, apenas uma pessoa permaneceu no ambiente. Nos finais de semana, a sala foi ocupada por duas pessoas entre 8h e 18h e pelos quatro moradores nos horários de 18h a 21h. Sob todas as situações considerou-se que os ocupantes desempenhariam atividades sedentárias e a taxa metabólica admitida foi igual a  $108 \text{ W/m}^2$ . Já a cozinha foi ocupada por uma pessoa nos horários de 7h a 12h e de 18h as 21h. No intervalo entre 14h e 15h, o ambiente foi ocupado por duas pessoas, em todos os dias da semana. A área de serviço foi ocupada por uma pessoa, entre 7h e 15h. Tanto na cozinha quanto na área de serviço foi considerada uma taxa metabólica igual a  $207 \text{ W/m}^2$ , correspondente ao desempenho de tarefas domésticas.

Visando desenvolver uma análise do desempenho térmico de ambientes sob o efeito de uma estratégia híbrida, a inércia térmica para resfriamento associada à ventilação mecânica noturna, foram desenvolvidas duas categorias de simulações computacionais, com e sem o emprego da ventilação mecânica noturna. Com base no estudo de Goulart (2004), realizado em residências de Florianópolis, admitiu-se que os parâmetros capazes de influenciar o desempenho térmico de ambientes caracterizados pelo uso da inércia térmica combinada à ventilação noturna, encontram-se já reconhecidos. Entretanto, a avaliação do potencial da estratégia híbrida investigada no presente trabalho buscou estabelecer relações entre diversas combinações destes parâmetros e o somatório de graus-hora de resfriamento, resultante para o período do verão. Portanto, cada modelo simulado representa uma combinação de variáveis arquitetônicas, listadas na Tabela 4.3 e detalhadas a seguir.

**Tabela 4.3 – Caracterização das variáveis arquitetônicas e alternativas avaliadas nas simulações computacionais.**

Variáveis arquitetônicas	Caracterização	Alternativas simuladas
1) Inércia térmica do ambiente	Fator de Resposta (SZOKOLAY, 2007)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Inércia baixa</li> <li>• Inércia média</li> </ul>
2) Ventilação no período diurno	Períodos nos quais as janelas permanecem abertas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sem ventilação</li> <li>• Manhã (7h-13h)</li> <li>• Tarde (13h-18h)</li> <li>• Manhã e tarde (7h – 18h)</li> </ul>
3) Ventilação noturna	Vazão do ar insuflado (Nº de renovações/hora)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 0 (sem ventilação noturna)</li> <li>• 10</li> <li>• 20</li> <li>• 30</li> </ul>

### 4.3.1 Inércia térmica do ambiente

A fim de investigar a influência da inércia térmica no desempenho do ambiente, buscou-se caracterizar configurações construtivas que fossem representativas dos sistemas construtivos empregados usualmente em Florianópolis.

Dentre esses sistemas, destacam-se a alvenaria de blocos de concreto e a alvenaria de tijolos cerâmicos. Com relação aos tipos de coberturas, para residências de padrão médio e alto, são recorrentes os seguintes sistemas construtivos: telhas cerâmicas e laje impermeabilizada, com e sem proteção térmica (CONSTRUÇÃO E MERCADO, 2009). Foram definidas duas configurações construtivas, classificadas quanto a sua inércia térmica, utilizando-se como parâmetro o Fator de Resposta do ambiente, calculado segundo a metodologia descrita por Szokolay (2007).

A configuração classificada com inércia baixa obteve um Fator de Resposta igual a 2,1, conforme indicado na Tabela 4.4, que apresenta os dados utilizados no cálculo. Este modelo apresenta paredes externas constituídas por blocos de concreto, rebocadas em ambas as faces e pintadas na cor branca ( $\alpha = 0,2$ ). Possui cobertura cerâmica com forro de madeira, câmara de ar e barreira radiante (manta de polietileno

aluminizado dupla-face). Optou-se pelo uso da barreira radiante em virtude dos resultados obtidos por Goulart (2004), que indicaram um melhor desempenho da inércia térmica quando utilizada em conjunto com este tipo de cobertura em residências localizadas em Florianópolis. A Tabela 4.5 apresenta as demais propriedades térmicas das paredes externas e cobertura, determinadas de acordo com a NBR 15220-2 (ABNT, 2005a): capacidade térmica, atraso térmico e fator solar<sup>28</sup>.

---

<sup>28</sup> O fator solar para elementos opacos ( $FS_o$ ), expresso em porcentagem, é calculado a partir da equação  $FS_o = 4.U.\alpha$ , onde  $U$  é a transmitância térmica do componente e  $\alpha$  é a absorptância à radiação solar, que por sua vez é função da cor da superfície (ABNT, 2005).

Tabela 4.4 – Propriedades térmicas utilizadas no cálculo do Fator de Resposta: Modelo com inércia baixa

Superfície	Composição	Área (m <sup>2</sup> )	U (W/m <sup>2</sup> K)	A x U	Y (W/m <sup>2</sup> K)	A x Y	
Fachada Leste	Blocos de concreto rebocados em ambas as faces (espessura = 14 cm)	20,04	2,86	57,31	4,54	90,95	
Fachada Norte		6,74	2,86	19,28	4,51	30,39	
Parede interna (Norte)		5,33	1,60	8,53	4,77	25,40	
Fachada Sul		20,81	2,86	59,52	4,54	94,54	
Parede interna Oeste (corredor)	Telha cerâmica com câmara de ar, barreira radiante e forro de madeira	18,24	1,60	29,18	4,77	86,97	
Cobertura		19,24	0,89	8,66	1,48	28,48	
Piso	Laje Maciça 10 cm	17,14	0,39	6,68	6,00	102,84	
Janela (área envidraçada)	Vidro duplo, com câmara de ar interna (espessura = 1,8 cm)	1,43	2,74	3,91	2,98	4,26	
Porta de Madeira (interna)	Madeira	1,78	2,17	3,87	2,28	4,06	
<b>RESULTADOS</b>							
$q_v = 0,33 \times N \times V$ : Taxa do fluxo térmico devido à ventilação (W/K)							<b>24,8</b>
$q_a = \Sigma(A \times Y)$ : Taxa do fluxo térmico devido à admitância (W/K)							<b>467,9</b>
$q_c = \Sigma(A \times U)$ : Taxa do fluxo térmico devido à condução (W/K)							<b>205,3</b>
Massa específica do ambiente (kg/m <sup>3</sup> )							<b>80,5</b>
FR: Fator de Resposta							<b>2,1</b>
CLASSIFICAÇÃO: INÉRCIA BAIXA (FR < 3)							

**Tabela 4.5 – Propriedades térmicas das vedações externas: modelo com inércia baixa**

<b>Componente</b>	<b>Materiais constituintes</b>	<b>Capacidade térmica - <math>C_T</math> (kJ/m<sup>2</sup>.K)</b>	<b>Atraso térmico - <math>\phi</math> (h)</b>	<b>Fator Solar - <math>FS_o</math> (%)</b>
<b>Cobertura</b>	Telha cerâmica + Câmara de ar (alta emissividade) + Manta de polietileno aluminizado + Câmara de ar (baixa emissividade) + Forro de madeira (10 mm)	52,89	3,7	1,7
<b>Paredes</b>	Reboco externo (25 mm), com pintura branca ( $\alpha = 0,2$ ) + Bloco de concreto (9 cm) + Reboco interno (25 mm)	212,18	3,7	2,3

A configuração classificada com inércia média obteve um Fator de Resposta igual a 3,9, conforme indicado na Tabela 4.6. Esta configuração possui paredes externas constituídas por tijolo cerâmico maciço, com isolamento externo em lã de rocha, também rebocadas em ambas as faces, com pintura branca. A cobertura também é constituída por telha cerâmica, mas possui laje de concreto maciço. Em ambos os casos (configurações com inércia baixa e com inércia média), as telhas cerâmicas foram mantidas ao natural (não esmaltadas,  $\alpha = 0,48$ ). A Tabela 4.7 apresenta as demais propriedades térmicas das paredes externas e cobertura, determinadas de acordo com a NBR 15220-2 (ABNT, 2005a).

Convém salientar que a configuração com inércia média difere da edificação real, pois a Casa Eficiente possui cobertura cerâmica com forro de madeira, barreira radiante e isolamento de lã de rocha, enquanto as paredes são duplas, de tijolo maciço com isolamento intermediário de lã de rocha. Entretanto, a inércia do quarto de casal da Casa Eficiente também foi classificada como média, tendo sido obtido um Fator de Resposta igual a 4,1 (vide item 4.1).

Tabela 4.6 – Propriedades térmicas utilizadas no cálculo do Fator de Resposta: Modelo com inércia média

Superfície	Composição	Área (m <sup>2</sup> )	U (W/m <sup>2</sup> K)	A x U	Y (W/m <sup>2</sup> K)	A x Y
Fachada Leste	Blocos de concreto rebocados em ambas as faces (espessura = 14 cm)	20,04	1,14	21,24	5,33	99,14
Fachada Norte		6,74	1,14	6,25	5,33	29,16
Parede interna (Norte)		5,33	1,04	6,84	5,35	35,31
Fachada Sul		20,81	1,14	23,77	5,33	110,92
Parede interna Oeste (corredor)		18,24	1,04	18,90	5,35	97,58
Cobertura	Telha cerâmica com câmara de ar, barreira radiante e forro de madeira	19,24	1,97	37,85	4,63	89,08
Piso	Laje Maciça 10 cm	17,14	0,39	6,68	6,00	102,84
Janela (área envidraçada)	Vidro duplo, com câmara de ar interna (espessura = 1,8 cm)	1,43	2,74	3,91	2,98	4,26
Porta de Madeira (interna)	Madeira	1,78	2,17	3,87	2,28	4,06
<b>RESULTADOS</b>						
$q_v = 0,33 \times N \times V$ : Taxa do fluxo térmico devido à ventilação (W/K)						
$q_a = \Sigma(A \times Y)$ : Taxa do fluxo térmico devido à admitância (W/K)						
$q_c = \Sigma(A \times U)$ : Taxa do fluxo térmico devido à condução (W/K)						
Massa específica do ambiente (kg/m <sup>3</sup> )						
FR: Fator de Resposta						
CLASSIFICAÇÃO: INÉRCIA MÉDIA ( $3 \leq FR \leq 5$ )						
<b>24,8</b>						
<b>572,3</b>						
<b>129,3</b>						
<b>111,0</b>						
<b>3,9</b>						

**Tabela 4.7 – Propriedades térmicas das vedações externas: modelo com inércia média**

Componente	Materiais constituintes	Capacidade térmica - $C_T$ (kJ/m <sup>2</sup> .K)	Atraso térmico - $\phi$ (h)	Fator Solar - $FS_o$ (%)
<b>Cobertura</b>	Telha cerâmica + Câmara de ar (alta emissividade) + Laje de concreto maciço (10 mm) + Reboco interno (25 mm)	288,40	5,9	3,8
<b>Paredes</b>	Reboco externo (25 mm), com pintura branca ( $\alpha = 0,2$ ) + Manta de lã de rocha (925 mm) + Tijolo maciço (10 cm) + Reboco interno (25 mm)	257,67	8,0	0,9

### 4.3.2 Ventilação no período diurno

Optou-se por simular apenas a orientação Leste para a janela do quarto de casal, mantendo-se a mesma orientação existente na Casa Eficiente. Isto também se justifica pelo fato de que esta orientação favorece a captação da ventilação natural, pois a janela mantém-se exposta à incidência dos ventos Norte e Nordeste, duas das principais frequências de direção do vento no verão (ANDRADE, 1996). Quanto às estratégias de ventilação, foram simuladas quatro condições de aplicação da ventilação natural no período diurno:

- Sem ventilação diurna;
- Ventilação pela manhã ( $V_{MANH\tilde{A}}$ ): intervalo das 7h às 13h;
- Ventilação à tarde ( $V_{TARDE}$ ): intervalo das 13h às 18h;
- Ventilação pela manhã e à tarde ( $V_{7A18}$ ): intervalo das 7h às 18h.

Convém salientar também que os mesmos padrões de ventilação foram aplicados simultaneamente a todos os ambientes da edificação.

Quanto ao ambiente analisado, tais padrões foram definidos com o intuito de representar diferentes rotinas de uso de um dormitório. Por exemplo: situações nas quais o ambiente permanecesse desocupado pela

manhã ou à tarde porque seus usuários encontram-se no trabalho ou na escola. Ou situações em que os ocupantes permanecem fora de casa o dia inteiro (padrão sem ventilação diurna, ambiente desocupado), ou o contrário, quando os usuários deixam o ambiente apenas nos horários das refeições (padrão  $V_{7A18}$ ). Evidentemente não se pretende caracterizar todas as possibilidades de padrões de uso que um ambiente real pode apresentar. Buscou-se caracterizar situações diversificadas, a fim de investigar o impacto de diferentes rotinas no desempenho térmico do ambiente, com ou sem o emprego da ventilação mecânica noturna, a fim de investigar seu impacto na eficácia desta estratégia.

### 4.3.3 Ventilação mecânica noturna

À noite, os ambientes eram ocupados a partir das 21h e a janela permaneceu fechada, empregando-se a ventilação mecânica, com vazão constante, durante o intervalo de 21h às 7h. Este intervalo de aplicação da estratégia foi o mesmo para dias úteis e finais de semana. Foram simuladas três alternativas, caracterizadas por vazões de insuflamento do ar diferenciadas<sup>29</sup>:

- $V_{10}$ : 10 renovações de ar por hora, equivalentes a  $0,21 \text{ m}^3/\text{s}$ ;
- $V_{20}$ : 20 renovações de ar por hora, equivalentes a  $0,42 \text{ m}^3/\text{s}$ ;
- $V_{30}$ : 30 renovações de ar por hora, equivalentes a  $0,63 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Segundo Goulart (2004), recomenda-se no mínimo 10 renovações de ar/hora no período noturno para promover o resfriamento da envoltória<sup>30</sup>. A vazão equivalente a esta taxa de renovação é superior à vazão do insuflador instalado na residência experimental real ( $0,18 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Portanto, buscou-se avaliar o efeito gradual do aumento da vazão da ventilação mecânica no desempenho térmico do ambiente.

Considerando-se todas as combinações das estratégias de ventilação e as duas configurações construtivas modeladas, com vedações leves e pesadas, indicadas na Tabela 4.3, foram realizadas 32

<sup>29</sup> O volume do ambiente simulado é o mesmo do Modelo Base Final:  $75,2 \text{ m}^3$ .

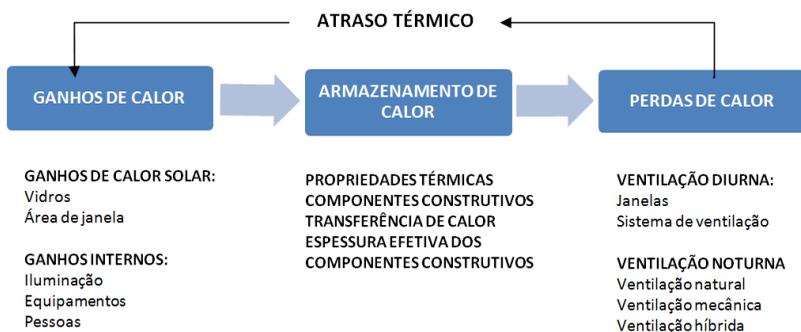
<sup>30</sup> Goulart (2004) desenvolveu simulações da ventilação noturna em residências de Florianópolis considerando duas possibilidades de emprego dessa estratégia: ventilação natural e ventilação mecânica. Com o emprego da ventilação natural, foram obtidas taxas médias de renovação do ar variando entre 5 e 16,7 renovações/h, dependendo da área de abertura considerada. Para a taxa igual a 5 renovações/h, o somatório de graus-hora de resfriamento (temperatura base =  $29^\circ\text{C}$ ) foi igual a  $21,7^\circ\text{Ch}$ . Quando a ventilação mecânica foi empregada com a taxa de 10 renovações/h, obteve-se um somatório de graus-hora de resfriamento igual a  $18,9^\circ\text{Ch}$  (redução de 13%).

simulações, correspondentes aos meses de dezembro a março (verão), totalizando-se 121 dias (2.904 horas). Utilizou-se o arquivo TRY de Florianópolis para o ano de 1963 (LABEEE, 2011).

De posse dos resultados das simulações, na seqüência foram desenvolvidos os estudos paramétricos a partir da análise do balanço térmico de todos os modelos simulados. A partir dos resultados do balanço térmico, foram desenvolvidas análises visando relacionar estes parâmetros e o somatório de graus-hora de resfriamento verificado em cada caso.

#### 4.4 ANÁLISE DO BALANÇO TÉRMICO E ESTIMATIVA DA CARGA TÉRMICA

A Figura 4.22 descreve o princípio da ventilação noturna: devido à inércia da construção, os ganhos de calor diários são dissipados durante a noite. O potencial de ventilação noturna é deduzido a partir do equilíbrio entre os ganhos, armazenamento de calor e perdas de calor (PFAFFEROTT et al., 2003).



**Figura 4.22 – Princípio da ventilação noturna: balanço de energia.**  
Adaptado de PFAFFEROTT et al. (2003).

De acordo com a Figura 4.22, distinguem-se três categorias de fluxos energéticos no balanço térmico de um ambiente: ganhos, perdas e armazenamento de calor, este último mais relevante para edificações com significativa massa construtiva (paredes e coberturas pesadas). No caso de uma edificação com tais características, onde se emprega a ventilação mecânica noturna, o armazenamento de calor nos componentes construtivos alcança maior relevância, pois interfere no

balanço térmico na medida em que produz os efeitos de atraso e amortecimento das temperaturas internas em relação às variações da temperatura externa. Como o desempenho térmico da edificação representa uma resposta às variações climáticas externas e também às condições de ocupação e uso dos ambientes internos, é possível relacionar os fluxos energéticos principais com o clima externo, com as características construtivas da edificação (forma e materiais constituintes) e com as suas condições de ocupação e uso (geração de calor interno advindo de pessoas, equipamentos e iluminação artificial), incluindo os mecanismos de condicionamento empregados. No caso do presente trabalho, estes mecanismos incluem a ventilação natural no período diurno e a ventilação mecânica noturna.

A análise aqui desenvolvida visa relacionar diretamente as características das tipologias simuladas, submetidas às características climáticas de Florianópolis, com a expectativa de desempenho térmico na fase de uso, que por sua vez é expressa em função somatório de graus-hora de resfriamento durante o verão.

A fim de investigar o efeito das estratégias de ventilação natural e mecânica no comportamento térmico dos ambientes simulados, o balanço térmico foi caracterizado a partir das trocas de calor no interior do quarto de casal. O balanço térmico é modelado considerando-se os seguintes processos de transferência de calor: condução através dos componentes construtivos; convecção para o ar; e trocas de radiação de onda curta e onda longa. É através do processo de convecção que as superfícies internas interagem com o ar da zona durante o balanço térmico, sofrendo a influência das trocas de ar internas (com os demais ambientes da edificação) e das trocas proporcionadas pela infiltração do ar externo.

Para esta análise, foram utilizados os fluxos de calor por convecção obtidos nas simulações (*convective heat gain*, segundo a nomenclatura do *software*). Valores com sinal positivo indicam acréscimo de calor ao ar contido no interior da zona térmica, propiciado por um componente da envoltória, trocas de ar (internas ou externas) ou gerado por fonte de calor interna. Valores com sinal negativo indicam retirada de calor do ar interno, que também pode ocorrer devido às trocas de ar ou por absorção pelos componentes da envoltória. Convém salientar que os ganhos térmicos relativos à ocupação, iluminação e equipamentos são os mesmos para as configurações leves e pesadas, variando em função dos períodos de ocupação do ambiente.

O balanço térmico do ambiente foi caracterizado para quatro intervalos horários distintos. As 2.904 horas simuladas para cada

modelo foram subdivididas e agrupadas segundo intervalos correspondentes aos períodos ventilados e não ventilados em cada simulação, conforme indicado na Tabela 4.8. Para cada intervalo, os fluxos de calor relativos a cada componente do balanço térmico foram somados. A obtenção de valores positivos ou negativos definiu a ocorrência de ganho ou perda de calor, respectivamente, para os componentes da envoltória (paredes, teto, piso e janela). No caso das trocas proporcionadas pela infiltração do ar externo ou por trocas de ar entre o ambiente e as demais zonas térmicas internas, as simulações fornecem valores simultâneos de ganhos e perdas. Nestes casos, foi admitido o valor com maior módulo para definir a ocorrência de ganho ou perda de calor.

**Tabela 4.8 – Intervalos considerados nas análises do balanço térmico**

Intervalos	Padrões de ventilação diurna	Total de horas diárias	Total de horas analisadas (dezembro a março)
7h – 13h	Ventilação natural ou fechado	6 horas	726 horas
13h – 18h	Ventilação natural ou fechado	5 horas	605 horas
18h – 21h	Fechado	3 horas	363 horas
21h – 7h	Ventilação mecânica ou fechado	10 horas	1.210 horas
<b>TOTAL</b>		24 horas	2.904 horas

Com base nesses resultados, foi possível observar a influência da ventilação natural no comportamento de cada componente envolvido no balanço térmico, bem como observar alterações nesse comportamento, decorrentes do emprego da ventilação mecânica noturna. Para tal, foram definidos como critério de avaliação: o somatório de graus-hora de resfriamento e o percentual de horas de desconforto, calculados em função de uma temperatura base pré-estabelecida.

Ambos os parâmetros foram estabelecidos considerando-se a abordagem adaptativa do conforto térmico. Segundo esta abordagem, a temperatura neutra de conforto ( $T_{\text{neutra}}$ ) no interior do edifício está diretamente relacionada à temperatura média mensal externa (NICOL, 1993), podendo ser calculada a partir da Equação 4.10, apresentada no item 4.2.3. A ASHRAE Standard 55 (2010) - *Thermal environmental*

*conditions for human occupancy*, apresenta limites de aceitabilidade para a temperatura operativa de ambientes naturalmente ventilados, em função da temperatura neutra de conforto ( $T_{\text{neutra}}$ ). De acordo com a referida norma, a  $T_{\text{neutra}}$  representa o valor central da zona de conforto. O limite superior desta zona é definido considerando-se um acréscimo de + 2,5°C ou + 3,5°C ao valor da  $T_{\text{neutra}}$ , valores que correspondem aos limites de 90% e 80% de aceitabilidade das condições térmicas do ambiente. De modo análogo, o limite inferior da zona de conforto é determinado subtraindo-se - 2,5°C ou - 3,5°C do valor da  $T_{\text{neutra}}$  (90% e 80% de aceitabilidade, respectivamente).

A Tabela 4.9 apresenta as temperaturas neutras de conforto e seus respectivos limites superiores de aceitabilidade, calculados para os meses de dezembro a março em Florianópolis, de acordo com a ASHRAE Standard 55 (2010). Convém salientar que os valores da temperatura média mensal apresentados na Tabela 4.9 foram obtidos a partir do arquivo TRY de Florianópolis, do ano de 1963 (LABEEE, 2011).

**Tabela 4.9 – Limites superiores da temperatura operativa de conforto para os meses de dezembro a março.**

Mês	Temperatura Média Mensal ( $T_{\text{mm}}$ )	Temperatura neutra ( $T_{\text{neutra}}$ )	Limite superior da temperatura operativa de conforto	
			90% aceitabilidade	80% aceitabilidade
Dezembro	23,1	25,0	27,5	28,5
Janeiro	24,3	25,3	27,8	28,8
Fevereiro	24,5	25,4	27,9	28,9
Março	23,6	25,1	27,6	28,6
MÉDIA	23,9	25,2	27,7	28,7

A temperatura operativa possibilita uma representação combinada dos efeitos da temperatura do ar, da temperatura radiante média e da velocidade do ar. Quando a velocidade do ar e a diferença entre a temperatura radiante média e a temperatura do ar são pequenas, uma forma aproximada de calculá-la é através da média entre a temperatura do ar e a temperatura radiante média. Nos casos em que a velocidade do ar é maior ou igual a 2 m/s e a diferença entre a temperatura do ar e a temperatura radiante média do ambiente é maior ou igual a 4°C, a

temperatura operativa pode ser obtida a partir da Equação 4.11 (ASHRAE, 2010):

$$T_{OP} = A \cdot T_a + (1 - A) \cdot T_r \quad \text{Equação 4.11}$$

onde:

- $T_{OP}$  = temperatura operativa (°C);
- $A$  = fração radiante (adimensional);
- $T_a$  = temperatura do ar (°C);
- $T_r$  = temperatura radiante média (°C).

A fração radiante “A” é um parâmetro representativo da relação entre as trocas térmicas por radiação e por convecção. Portanto, este parâmetro varia em função da velocidade do ar, conforme indicado pela ASHRAE Standard 55 (2010)<sup>31</sup>:

- $A=0,5$  para  $V_{ar} < 0,2$  m/s;
- $A=0,6$  para  $0,2 \leq V_{ar} < 0,6$  m/s;
- $A=0,7$  para  $0,6 \leq V_{ar} < 1,0$  m/s, onde:  
 $V_{ar}$  = Velocidade do ar no ambiente (m/s).

De acordo com a Tabela 4.9, a temperatura neutra de conforto correspondente ao período total de análise é igual a 25,2°C, mas pode variar até 27,7°C e 28,7 °C considerando-se os limites de aceitabilidade de 90% e 80%, respectivamente. Portanto, a temperatura operativa de conforto pode ser utilizada como referência para o cálculo dos graus-hora de resfriamento. Ou seja, indica a quantidade de graus que excedem a temperatura considerada adequada ao conforto térmico em cada hora do período de análise.

No presente trabalho, os graus-hora de resfriamento foram calculados de acordo com os valores horários da temperatura operativa obtidos nas simulações, em função de uma temperatura base igual a 26 °C. Foram calculados os totais de graus-hora correspondentes a cada um dos quatro intervalos diários: 1) 7h-13h; 2) 13h-18h; 3) 18h-21h; 4) 21h-

---

<sup>31</sup> Segundo a ISO 7730 (2005), a temperatura operativa serve como referência para a estimativa do índice PMV. O Anexo E da referida norma apresenta valores de PMV estimados em função da temperatura operativa, considerando-se diferentes valores de taxa metabólica, níveis de isolamento da vestimenta e limites de velocidade do ar. Para tal, considera uma umidade relativa do ar correspondente a 50% e a velocidade do ar variando desde valores inferiores a 0,1 m/s até 1 m/s.

7h. Estes intervalos, por sua vez, coincidem com os intervalos de emprego da ventilação natural diurna ou mecânica noturna. Também foram calculados os percentuais de horas contidos em cada intervalo nos quais a temperatura operativa excedia  $27,7^{\circ}\text{C}$  (90% de aceitabilidade) e  $28,7^{\circ}\text{C}$  (80% de aceitabilidade).

Em se tratando de edificações que fazem uso da inércia térmica associada ao uso da ventilação noturna para resfriamento, é importante quantificar os efeitos do balanço térmico separadamente para cada período do dia, devido a duas razões principais. A primeira delas se deve ao efeito do amortecimento térmico proporcionado pela envoltória. Este amortecimento pode ser benéfico no período diurno, amenizando a temperatura interna máxima. Porém, caso a estrutura não seja adequadamente resfriada por meio da ventilação durante a noite e a madrugada, pode-se registrar a ocorrência de graus-hora de resfriamento nesses horários. Esta ocorrência também pode indicar a necessidade de aumento da vazão da ventilação mecânica, verificando-se até que ponto esta medida é capaz de alterar o perfil de desempenho térmico do ambiente. Com base nos resultados dessa análise, poder-se-á identificar se a ventilação mecânica noturna é uma opção viável e eficaz para promover o resfriamento do ambiente.

Esta análise possibilita correlacionar o comportamento térmico da envoltória, sujeito aos efeitos das estratégias de ventilação natural e mecânica, com o atendimento das necessidades de conforto térmico dos usuários. Portanto, a presente análise visa responder a duas questões principais:

- Considerando-se uma determinada configuração construtiva, qual o comportamento dos componentes da envoltória quanto ao ganho, perda e armazenamento de calor, como resposta a uma variação de temperatura no ambiente externo?
- Como os fatores relacionados ao balanço térmico interagem para determinar o somatório de graus-hora de resfriamento em edificações residenciais localizadas em Florianópolis?

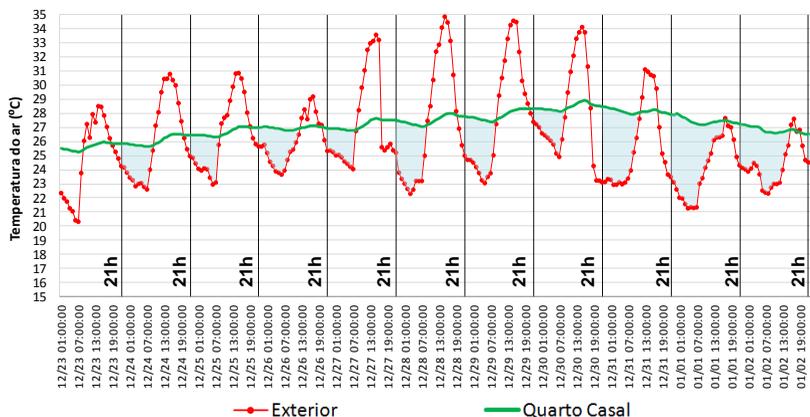
Desse modo, o efeito combinado da inércia térmica e da ventilação para resfriamento no verão pôde ser avaliado e os resultados obtidos sugerem diretrizes para a adequação climática de residências localizadas em Florianópolis-SC.

Os resultados obtidos a partir do cumprimento das etapas metodológicas descritas no Capítulo 4 são apresentados nos itens a seguir:

- 5.1) Monitoramento *in loco* na Casa Eficiente e avaliação do impacto da ventilação mecânica noturna no desempenho térmico do quarto de casal;
- 5.2) Calibração do Modelo Base Inicial para simulação da ventilação mecânica noturna;
- 5.3) Calibração do Modelo Base Final, verificando-se a influência dos algoritmos de condução e convecção nos resultados das simulações;
- 5.4) Avaliação da eficácia da ventilação noturna para resfriamento: aplicabilidade da estratégia em ambientes residenciais no verão, caracterizados pelo emprego de vedações leves e pesadas.

### 5.1 TESTE DA ESTRATÉGIA: RESULTADOS DO MONITORAMENTO *IN LOCO* NA CASA EFICIENTE

No início do período de monitoramento da Casa Eficiente foram coletados dados das temperaturas do ar externo e interno para a definição dos horários de aplicação da ventilação mecânica noturna. Sabendo-se que a temperatura do ar externo ( $T_{EXT}$ ) deveria ser inferior à temperatura interna ( $T_{INT}$ ) para que a ventilação noturna pudesse promover o resfriamento do ambiente, estabeleceu-se uma diferença mínima entre  $T_{INT}$  e  $T_{EXT}$  igual a 1,0 °C para determinar o horário de início do emprego da estratégia. De acordo com a variação das temperaturas no período de 23/12/2007 a 02/01/2008 (Figura 5.1), quando o quarto de casal foi mantido com as esquadrias fechadas durante 24h por dia, observa-se que tal diferença foi igual ou maior que 1,0 °C às 21h em todos os dias. Portanto, com o auxílio de um temporizador, o acionamento do insuflador de ar ocorria às 21h e seu desligamento às 7h da manhã, totalizando 10h de funcionamento.



**Figura 5.1 – Variação das temperaturas do ar externo e interno (23/12/2007 a 02/01/2008).**

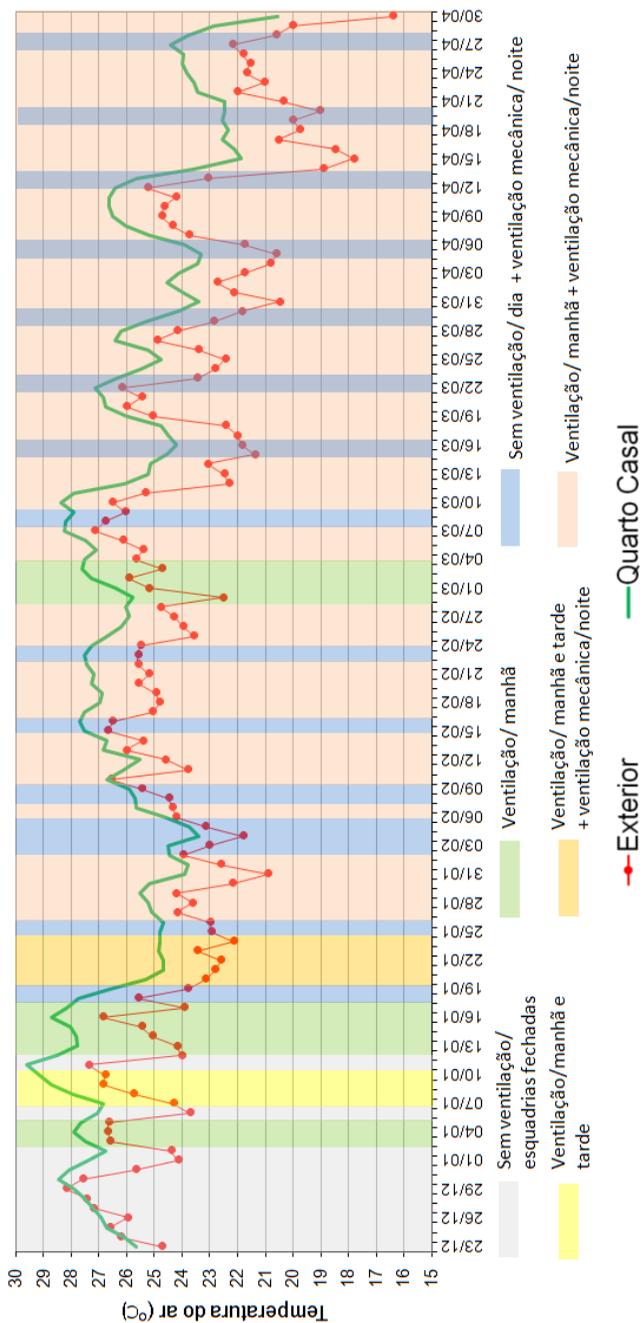
Foram testados 6 padrões de ventilação, resultantes da combinação entre a ventilação natural diurna e a ventilação mecânica noturna. Buscou-se verificar o impacto do uso desta estratégia no desempenho térmico da edificação e também o impacto causado pela admissão da ventilação natural e dos ganhos de calor durante o dia na eficácia da ventilação mecânica noturna. A Figura 5.2 ilustra a variação da temperatura média diária externa e no interior do quarto de casal no período entre 23/12/2007 a 30/04/2008 (130 dias), indicando-se a seqüência dos experimentos realizados, diferenciados por cores no gráfico. Cada experimento foi denominado de acordo com as condições de operação das aberturas durante o dia (manhã e tarde), combinadas ou não com o emprego da ventilação mecânica noturna. Não foi realizado nenhum experimento onde tenha sido empregada a ventilação natural no período noturno, pois não foi permitido manter as janelas da edificação abertas nesses horários.

Conforme indicado na Figura 5.2, inicialmente os ambientes foram mantidos com as janelas fechadas e sombreadas pelas persianas, bloqueando-se a entrada de radiação pela janela e as trocas de calor advindas da ventilação natural. Na seqüência, a ventilação natural foi empregada no período diurno, pela manhã e à tarde, ou somente pela manhã. A partir do dia 18/01, a ventilação mecânica noturna passou a ser empregada, combinada a diferentes períodos de exposição à ventilação durante o dia.

Entre os dias 21 e 25/01 as janelas e as persianas foram mantidas abertas pela manhã e à tarde, enquanto que entre os dias 28/01 e 01/02 isto correu apenas pela manhã. No período entre 02 e 06/02 os ambientes foram novamente mantidos com as janelas fechadas e sombreadas. A partir do dia 07/02 até o final do período indicado na Figura 5.2, as janelas e persianas foram mantidas abertas durante a manhã, com exceção dos finais de semana. O funcionamento do insuflador foi interrompido entre os dias 29/02 e 04/03, devido à substituição do temporizador responsável pelo acionamento do equipamento.

A seqüência dos experimentos foi realizada em função da disponibilidade dos ambientes para realização das pesquisas, pois, em cada mês, a Casa Eficiente era aberta à visitação durante uma quinzena, de modo que as condições de uso dos ambientes estavam sujeitas aos horários reservados para tal. Além disso, nos finais de semana, a edifica o também era mantida completamente fechada, sem o emprego da ventila o mecânica diurna.

A Tabela 5.1 caracteriza os experimentos realizados, indicando-se a varia o das temperaturas externas correspondentes a cada série de dias analisados. O impacto das condições de uso dos ambientes sobre o seu desempenho térmico   exemplificado através dos registros efetuados a partir do terceiro dia de cada seq ncia, observando-se as seguintes condições: a semelhança da amplitude térmica externa nesses dias e o reconhecimento de um padrão de comportamento da temperatura no interior do ambiente.



**Figura 5.2 – Sequência de experimentos e temperaturas médias do ar, internas e externas: 23/12/2007 a 30/04/2008.**

**Tabela 5.1 – Caracterização os experimentos realizados e períodos de análise correspondentes.**

<b>Experimento</b>	<b>Caracterização do período</b>	<b>Períodos</b>	<b>Varição da temperatura externa</b>
<b>EXPERIMENTO 1 CASO BASE</b>	Fechado (dia), sem ventilação mecânica	23/12 a 02/01	20,3°C a 34,8°C
<b>EXPERIMENTO 2</b>	Ventilação diurna (manhã e tarde), sem ventilação mecânica noturna	07/01 a 11/01/08	18,1°C a 34,6°C
<b>EXPERIMENTO 3</b>	Ventilação diurna (manhã), sem ventilação mecânica noturna	14/01 a 18/01/08	21,5°C a 31,1°C
<b>EXPERIMENTO 4</b>	Ventilação diurna (manhã e tarde) + ventilação mecânica noturna	21/01 a 25/01/08	18,8°C a 27,2°C
<b>EXPERIMENTO 5</b>	Fechado (dia) + ventilação mecânica noturna	02 a 06/02/08	15,4°C a 30,2°C
<b>EXPERIMENTO 6</b>	Ventilação diurna (manhã) + ventilação mecânica noturna	11/02 a 15/02 24/03 a 28/03	20,5°C a 31,7°C 19,8°C a 27,5°C

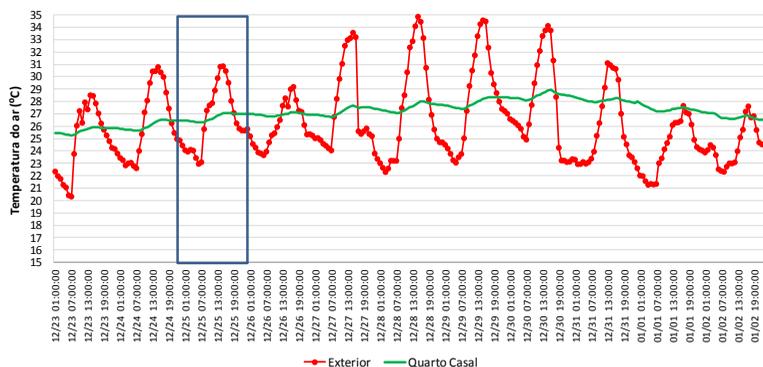
Em cada período de análise, foram selecionados dias que apresentassem temperaturas externas com comportamento semelhante, ou seja, valores próximos para as temperaturas máximas e mínimas, assim como a amplitude térmica, a fim de possibilitar a comparação entre os resultados obtidos em cada caso. Tal comparação foi realizada com base nos amortecimentos das temperaturas máximas e mínimas internas em função da temperatura externa. Os atrasos térmicos apresentaram poucas distinções nos diferentes experimentos analisados, variando entre 1h e 2h.

### **5.1.1 Impacto da ventilação natural diurna: ambiente sem ventilação mecânica noturna**

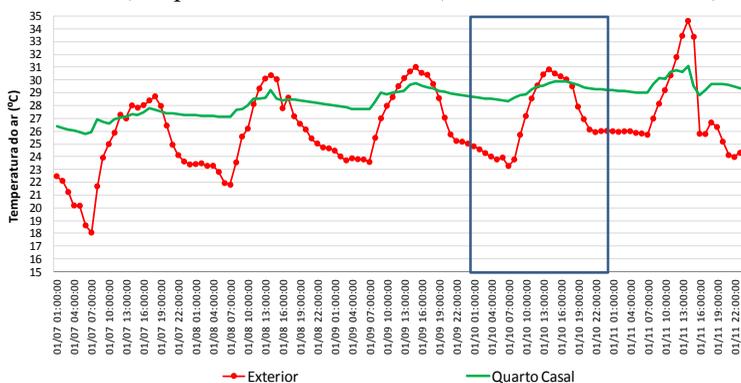
O experimento 1, denominado Caso Base, caracterizado pela ausência total de ventilação, foi usado como referência para a comparação com o desempenho dos ambientes sob as demais condições de ventilação monitoradas. Dentre os dias correspondentes a este experimento, foi selecionado o dia 25/12/2007 (Figura 5.3-a). O dia 10/01 (Figura 5.3-b) foi selecionado como dia representativo do experimento 2 (ventilação natural diurna aplicada entre 9h e 12h e entre as 14h e 17h). Por fim, o dia 16/01 foi selecionado como representativo do experimento 3 (ventilação natural diurna aplicada entre 9h e 11h).

A Figura 5.4. ilustra os amortecimentos das temperaturas máximas e mínimas obtidos em todos os dias correspondentes aos experimentos 1 e 2. Nos gráficos, as amplitudes da temperatura externa verificadas em ambos os experimentos foram agrupadas e ordenadas de forma crescente, indicando-se qual o amortecimento verificado no experimento realizado na data correspondente. Comparando-se os amortecimentos da temperatura máxima registrados em dias com amplitudes semelhantes (assinalados na Figura 5.4.-a), observa-se que os amortecimentos obtidos no experimento com ventilação diurna (experimento 2), que variaram entre  $-0,9^{\circ}\text{C}$  e  $-3,6^{\circ}\text{C}$ , foram menores do que aqueles obtidos no experimento sem ventilação (experimento 1), que variaram entre  $-0,5^{\circ}\text{C}$  e  $-6,9^{\circ}\text{C}$ .

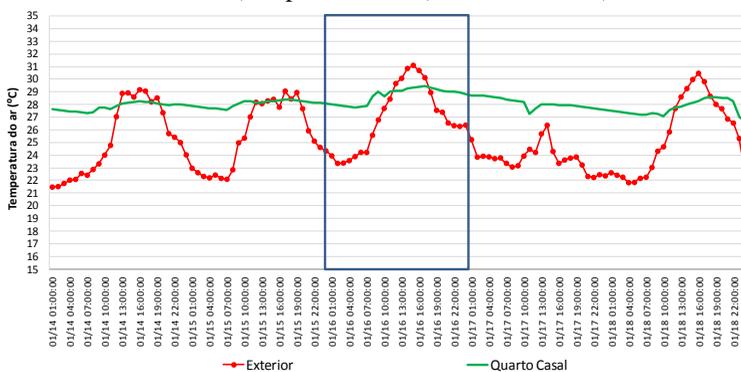
Quanto aos amortecimentos da temperatura mínima, variaram entre  $4,1^{\circ}\text{C}$  e  $7,7^{\circ}\text{C}$  no experimento 2, enquanto no experimento 1 variaram entre  $3,0^{\circ}\text{C}$  e  $5,9^{\circ}\text{C}$ . Observando-se os dias assinalados na Figura 5.4-b, com amplitudes semelhantes, observa-se que os maiores amortecimentos foram obtidos no experimento 2.



a) Experimento 1: Caso Base (23/12/2007 a 02/01/2008).

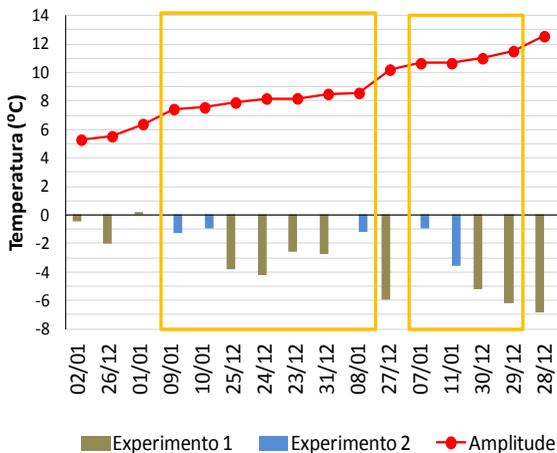


b) Experimento 2 (07 a 11/01/2008).

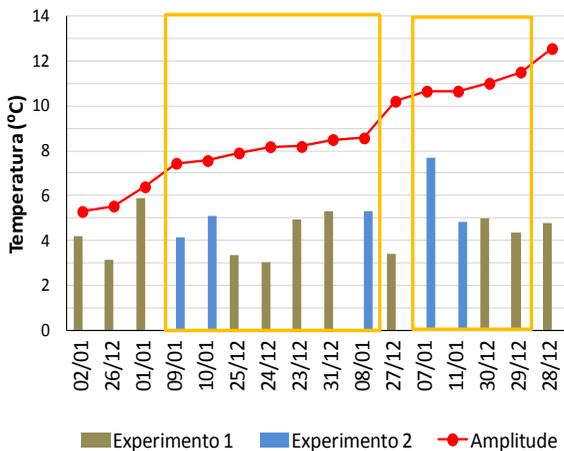


c) Experimento 3 (14 a 18/01/2008).

**Figura 5.3 – Dias selecionados para comparação dos experimentos sem ventilação mecânica noturna**



a) Amortecimento da temperatura máxima

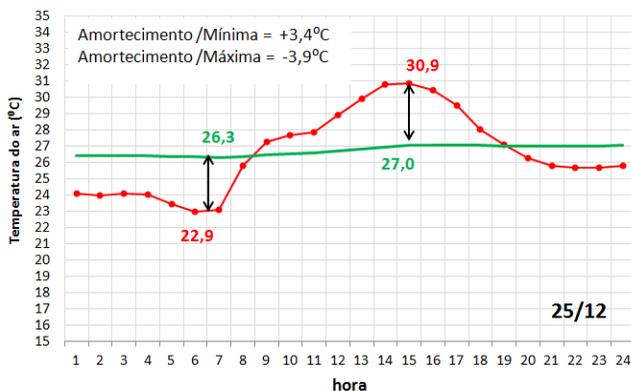


b) Amortecimento da temperatura mínima

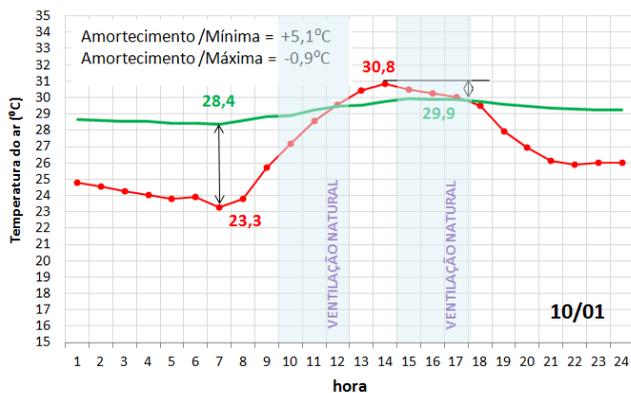
**Figura 5.4 – Amplitudes externas e amortecimentos obtidos no quarto de casal nos experimentos 1 e 2.**

Os comportamentos térmicos do ambiente nos dias 10/01/2008 (ventilação natural entre 9h e 11h e entre 14h e 17h) e 25/12/2007 (sem ventilação) foram comparados. Observa-se que em ambos os dias a amplitude térmica externa foi igual a 7,9°C e que as temperaturas externas foram semelhantes (Figura 5.5). No dia 10/01, com o emprego

da ventilação natural no período cujas temperaturas foram mais elevadas (indicado em azul no gráfico), o amortecimento da temperatura máxima foi reduzido em 76,3% em relação ao dia sem ventilação (25/12). No período noturno, a temperatura interna se manteve mais elevada durante o experimento 2, de modo que o amortecimento da temperatura mínima neste caso foi 50% maior do que aquele verificado no experimento 1.



a)



b)

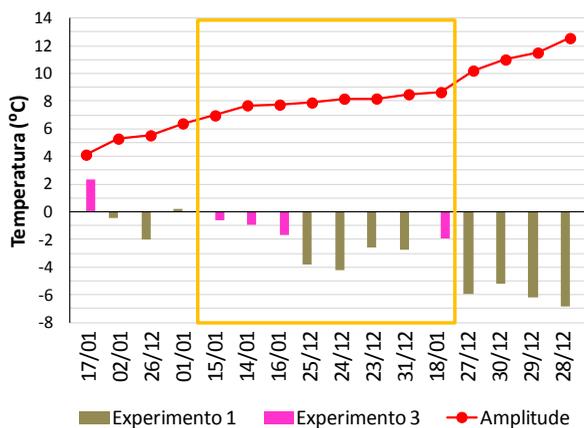
● Exterior

— Quarto Casal

**Figura 5.5 – Comportamentos térmicos do ambiente: a) experimento 1 e b) experimento 2.**

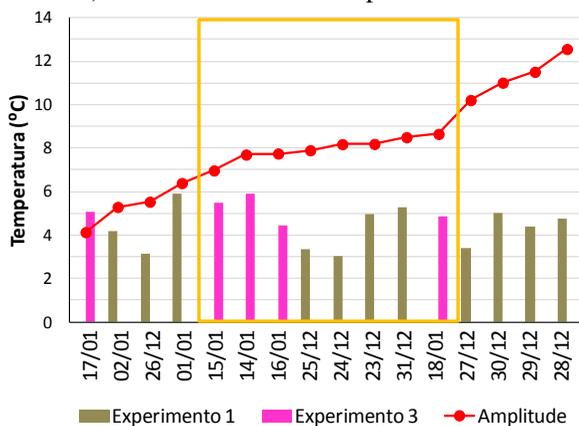
Nas figuras a seguir, os dias assinalados nos gráficos apresentam amplitudes externas variando entre 7°C e 9°C. Comparando-se os

experimentos sem ventilação (experimento 1) e com ventilação apenas pela manhã (9h às 11h, experimento 3), observa-se que os amortecimentos da temperatura máxima foram menores neste último experimento:  $-0,6^{\circ}\text{C}$  a  $-1,9^{\circ}\text{C}$ , sendo que no dia 17/01 não houve amortecimento da temperatura máxima no ambiente (Figura 5.6-a). Já os menores amortecimentos da temperatura mínima foram alcançados no experimento 1:  $3,0^{\circ}\text{C}$  e  $5,9^{\circ}\text{C}$ , enquanto no experimento 3 os amortecimentos variaram entre  $4,4^{\circ}\text{C}$  a  $5,9^{\circ}\text{C}$  (Figura 5.6 –b).



■ Experimento 1   ■ Experimento 3   ● Amplitude

a) Amortecimento da temperatura máxima

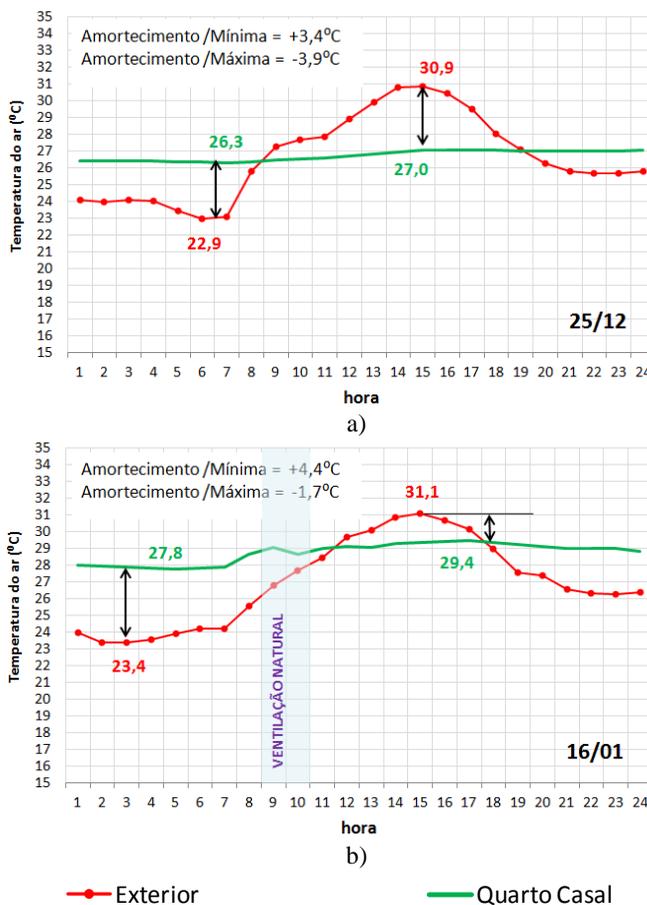


■ Experimento 1   ■ Experimento 3   ● Amplitude

b) Amortecimento da temperatura mínima

**Figura 5.6 – Amplitudes externas e amortecimentos obtidos no quarto de casal nos experimentos 1 e 3.**

Dando prosseguimento à comparação entre os experimentos 1 e 3, foram selecionados os dias 25/12 e 16/01, caracterizados por amplitudes térmicas externas iguais a 7,9°C e 7,8°C, respectivamente. Comparando-se os amortecimentos verificados em ambas as datas, observa-se que o emprego da ventilação diurna no dia 16/01 (intervalo destacado em azul na Figura 5.7) resultou em uma redução de 55% no amortecimento da temperatura máxima, enquanto o amortecimento da temperatura mínima foi 30% maior do que no experimento 1.



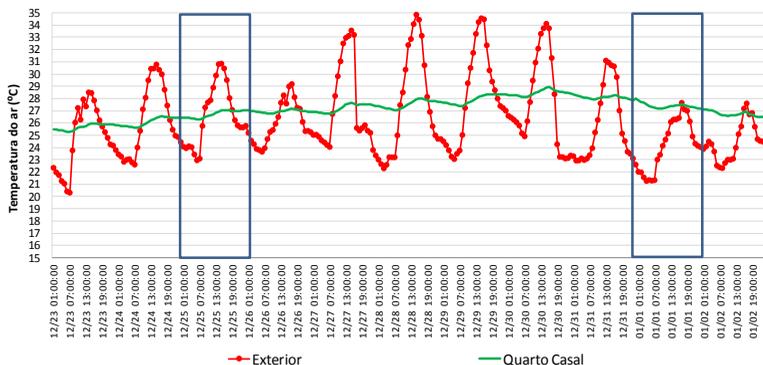
**Figura 5.7 – Comportamentos térmicos do ambiente: a) experimento 1 e b) experimento 3.**

De acordo com as comparações efetuadas entre os experimentos 2 e 3 e o experimento 1, observa-se que o emprego da ventilação natural diurna resultou na elevação da temperatura interna. Isto indica a ocorrência de um maior acúmulo de calor na envoltória, sendo que isto ocorreu em menor proporção no experimento 3, já que neste caso a exposição à ventilação ocorreu durante um intervalo mais curto (2h). Em ambos os casos, a ventilação noturna poderia atuar na remoção da carga térmica advinda da envoltória, proporcionando o seu resfriamento.

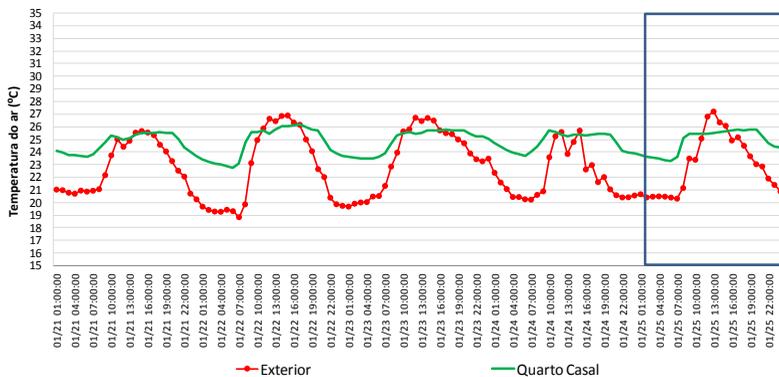
### **5.1.2 Impacto da ventilação mecânica noturna: ambientes com ventilação natural diurna**

Ainda considerando-se o experimento 1 como referência, verificou-se o efeito do emprego da ventilação mecânica noturna associada à ventilação natural diurna no comportamento térmico do ambiente. Os dias 25/12/2007 e 01/01/2008 foram selecionados como representativos do experimento 1 (Figura 5.8-a). Para fins de comparação, foram selecionados os dias 25/01 (experimento 4) e 13/02 (experimento 6). A ventilação mecânica noturna foi empregada em ambos, sendo que no experimento 4 a ventilação natural diurna foi empregada nos horários de 9h a 11h e 13h a 18h (Figura 5.8-b). No experimento 6, a ventilação diurna foi empregada entre 8h e 11h (Figura 5.8-c).

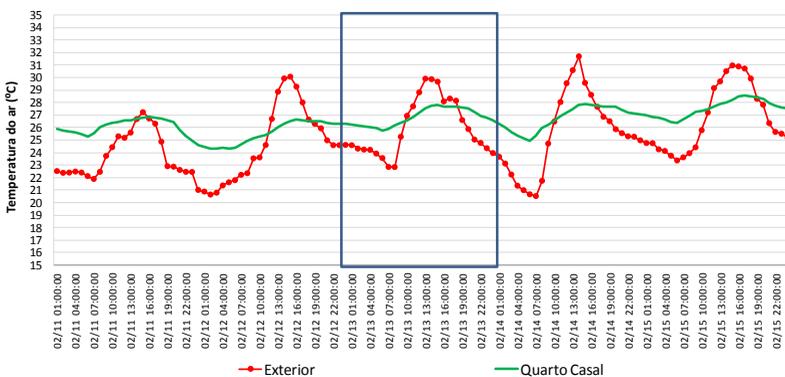
A Figura 5.9. ilustra os amortecimentos das temperaturas máximas e mínimas obtidos em todos os dias correspondentes aos experimentos 1 e 4, juntamente com as amplitudes externas correspondentes a cada dia. Com relação ao amortecimento das temperaturas máximas (Figura 5.9-a), observa-se que os maiores amortecimentos foram obtidos com o experimento 1, sem ventilação. Quanto aos amortecimentos das temperaturas mínimas, mesmo com o emprego da ventilação mecânica noturna durante o experimento 4, as distinções entre ambos os experimentos foram menores, com diferenças máximas de 1°C (dias com amplitudes semelhantes, assinalados na Figura 5.9-b).



a) Experimento 1: Caso Base (23/12/2007 a 02/01/2008).

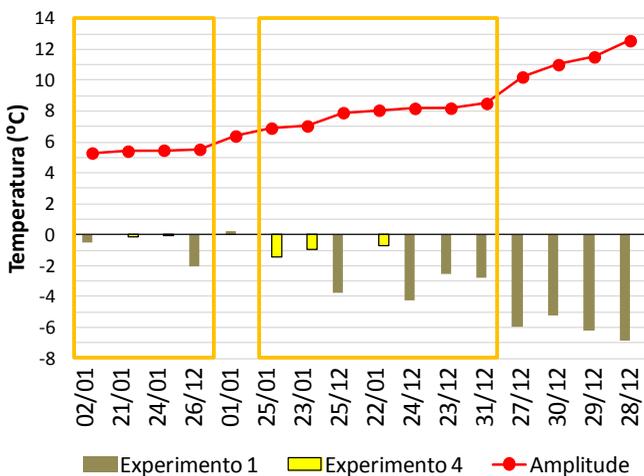


b) Experimento 4 (21 a 25/01/2008).

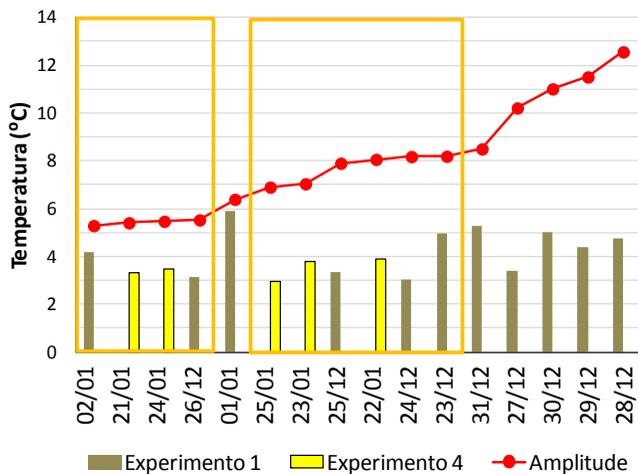


c) Experimento 6 (11 a 15/02/2008).

**Figura 5.8 – Dias selecionados para comparação dos experimentos com ventilação mecânica noturna.**



a) Amortecimento da temperatura máxima

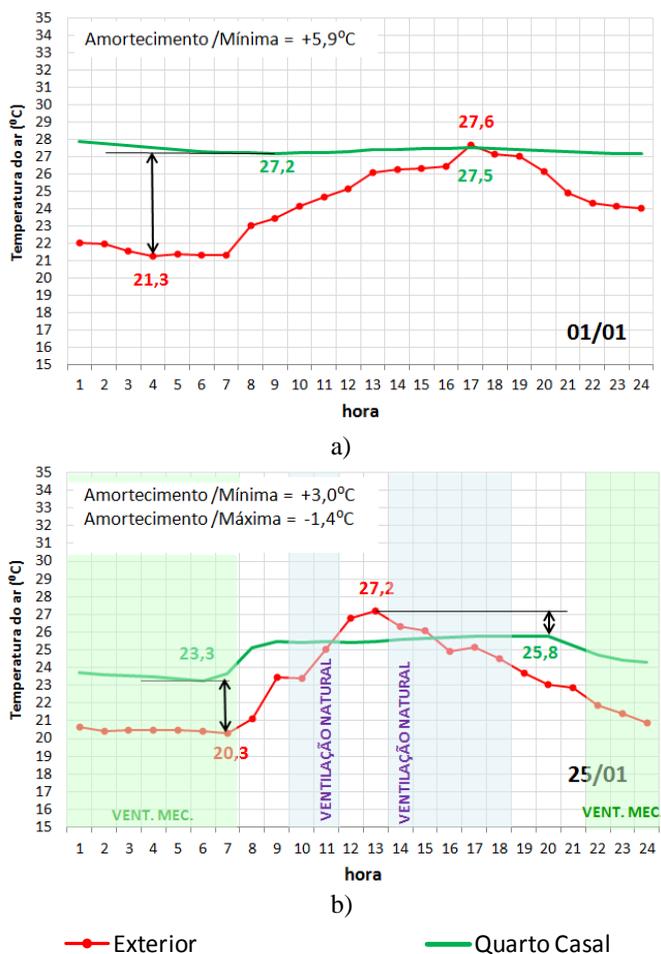


b) Amortecimento da temperatura mínima

**Figura 5.9 – Amplitudes externas e amortecimentos obtidos no quarto de casal nos experimentos 1 e 4.**

Entretanto, convém salientar que durante o experimento 1 as temperaturas mínimas externas variaram entre 20,3°C e 23,7°C (Figura 5.8-a), enquanto durante o experimento 4 variaram entre 18,8°C e

20,3°C (Figura 5.8-b). Portanto, para efetuar a comparação entre o desempenho da ventilação mecânica e a situação sem ventilação noturna, é necessário selecionar dias com amplitudes semelhantes e temperaturas mínimas também semelhantes. Para tal, foram selecionados os dias 01/01 (experimento 1) e 25/01 (experimento 4), cujas amplitudes térmicas externas foram, respectivamente, iguais a 6,4°C e 6,9°C. Nesses dias, as temperaturas máximas externas foram baixas (Figura 5.9).

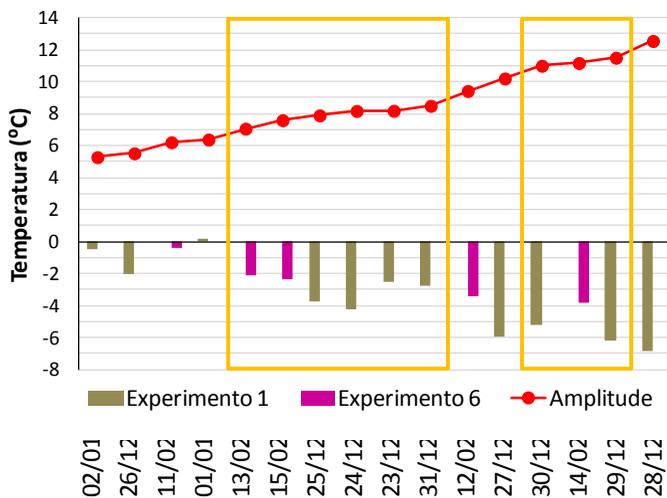


**Figura 5.9 – Comportamentos térmicos do ambiente: a) experimento 1 e b) experimento 4.**

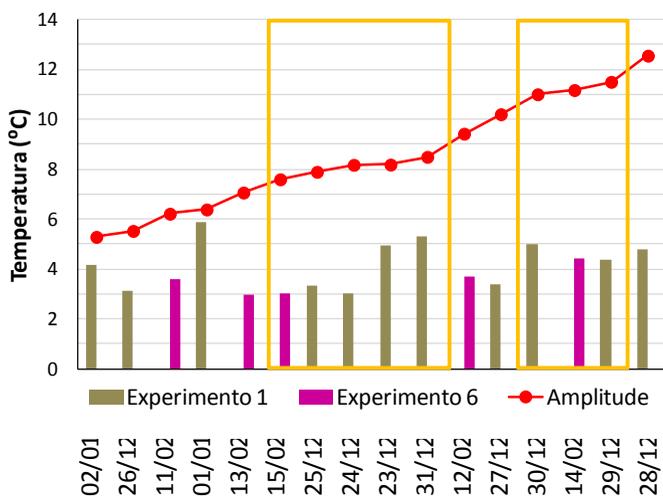
Sob tais condições, o amortecimento da temperatura máxima foi nulo quando o ambiente foi mantido fechado (dia 01/01). Já no dia 25/01, sob efeito da ventilação mecânica, observa-se um amortecimento maior da temperatura máxima:  $-1,4^{\circ}\text{C}$ . Com a ventilação noturna, as temperaturas internas se aproximam das externas nesses horários, de modo que o amortecimento da temperatura mínima é reduzido pela metade em relação ao experimento 1. Por outro lado, uma vez que as temperaturas externas foram amenas, o emprego da ventilação natural diurna não prejudicou o desempenho do ambiente. Em ambos os dias analisados, as temperaturas internas mantiveram-se inferiores a  $28^{\circ}\text{C}$ .

Outra comparação foi realizada entre o experimento 1 (sem ventilação) e o experimento 6, que também se caracteriza pelo emprego da ventilação mecânica noturna, sendo que neste caso a ventilação diurna foi empregada durante um intervalo menor (8h às 11h). Observa-se na Figura 5.10-a que os amortecimentos das temperaturas máximas foram maiores quando o ambiente permaneceu sem ventilação (experimento 1). Isto indica que o emprego da ventilação mecânica à noite durante o experimento 6 não foi suficiente para minimizar o efeito dos ganhos de calor, proporcionados nos horários em que a ventilação natural foi empregada no período diurno. Por outro lado, a Figura 5.10-b indica a obtenção de amortecimentos menores da temperatura mínima externa durante o experimento 6, quando comparados ao experimento 1.

Os dias 25/12 e 13/02 foram escolhidos para exemplificar o comportamento térmico do ambiente durante os dois experimentos (Figura 5.11). Nesses dias, as amplitudes externas foram semelhantes ( $7,9^{\circ}\text{C}$  e  $7,1^{\circ}\text{C}$ , respectivamente) e as temperaturas máximas externas foram aproximadamente  $30^{\circ}\text{C}$ . Verifica-se uma redução de 45% no amortecimento da temperatura máxima quando o ambiente é ventilado no período diurno, pois o mesmo ficou exposto aos ganhos de calor em horários nos quais a temperatura externa foi elevada (variando de  $25,3^{\circ}\text{C}$  a  $27,7^{\circ}\text{C}$ ). Durante a noite, o emprego da ventilação mecânica resultou em um amortecimento da temperatura mínima igual a  $3,0^{\circ}\text{C}$ , com pouca diferença em relação ao dia 25/12, quando se obteve um amortecimento igual a  $3,4^{\circ}\text{C}$ . Tais resultados indicam que a admissão da ventilação no período diurno também dificultou a redução da temperatura interna ao longo do dia, mesmo com o emprego da ventilação mecânica noturna.

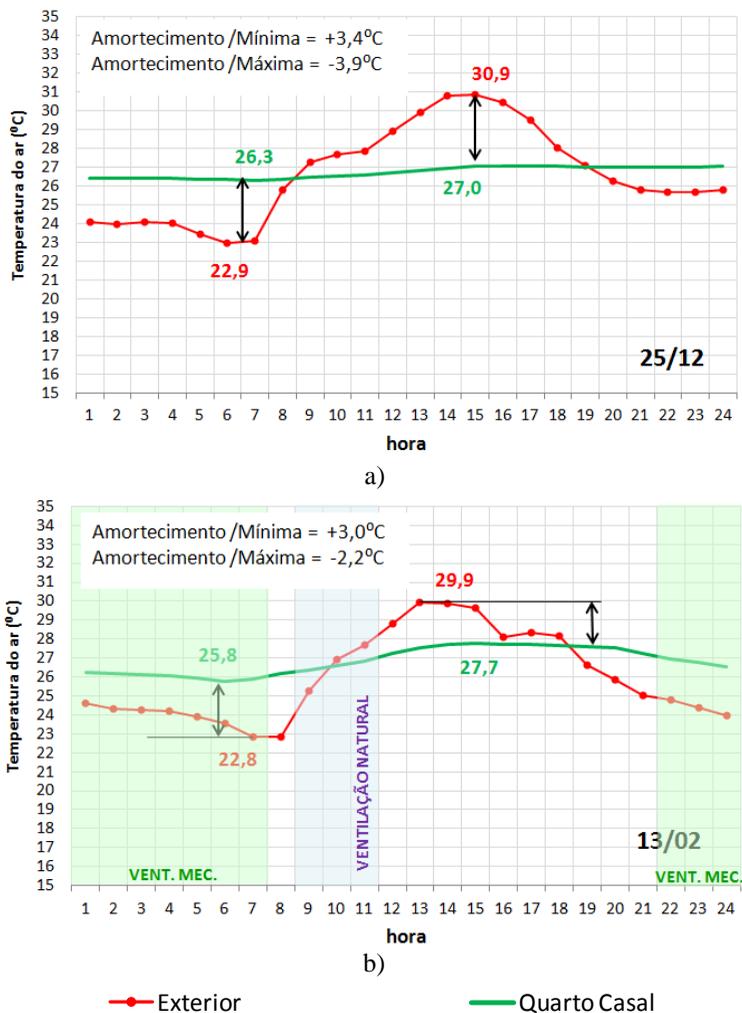


a) Amortecimento da temperatura máxima



b) Amortecimento da temperatura mínima

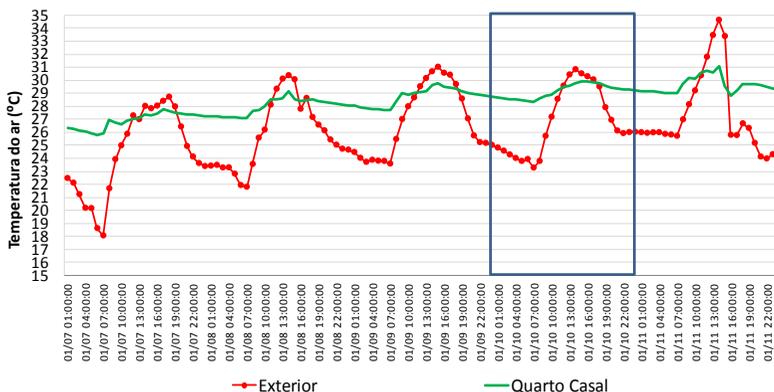
**Figura 5.10 – Amplitudes externas e amortecimentos obtidos no quarto de casal, experimentos 1 e 6.**



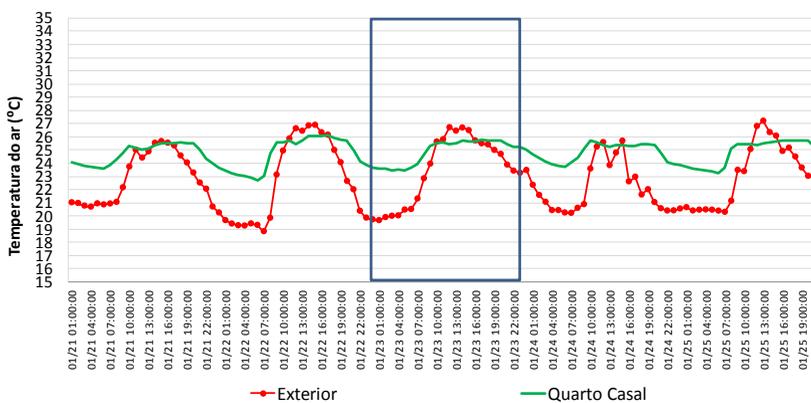
**Figura 5.11 – Comportamentos térmicos do ambiente: a) experimento 1 e b) experimento 6.**

Os resultados anteriores demonstram o impacto das estratégias híbridas de ventilação no comportamento térmico do ambiente, tomando-se como referência uma condição na qual nenhuma estratégia de ventilação é empregada. Para identificar o efeito isolado da ventilação mecânica noturna, foram utilizados dados correspondentes a

períodos nos quais o ambiente foi ventilado durante o dia, considerando-se diferentes intervalos de aplicação da ventilação natural: durante a manhã e a tarde (Figura 5.12) e apenas pela manhã (Figura 5.13).

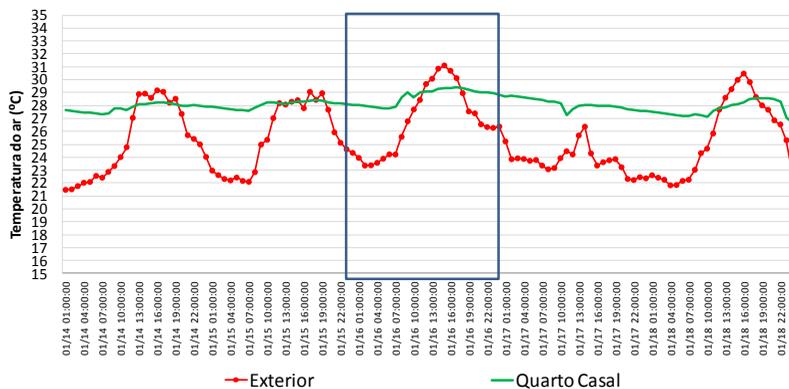


a) Experimento 2 (07 a 11/01/2008).

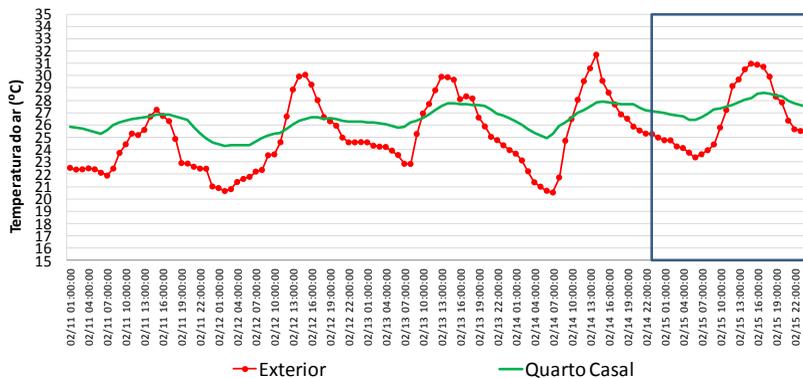


b) Experimento 4 (21 a 25/01/2008).

**Figura 5.12 – Dias selecionados para comparação dos experimentos com ventilação natural (manhã e tarde) e ventilação mecânica noturna.**



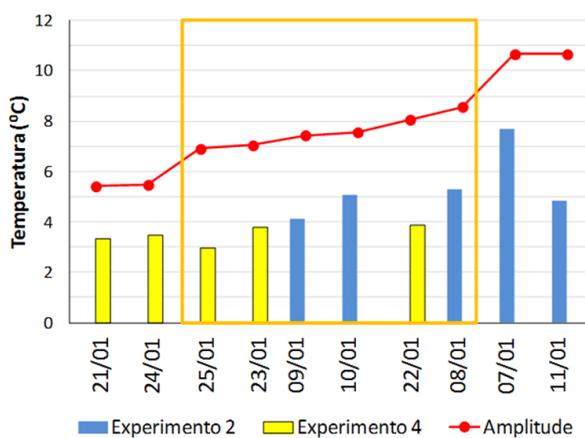
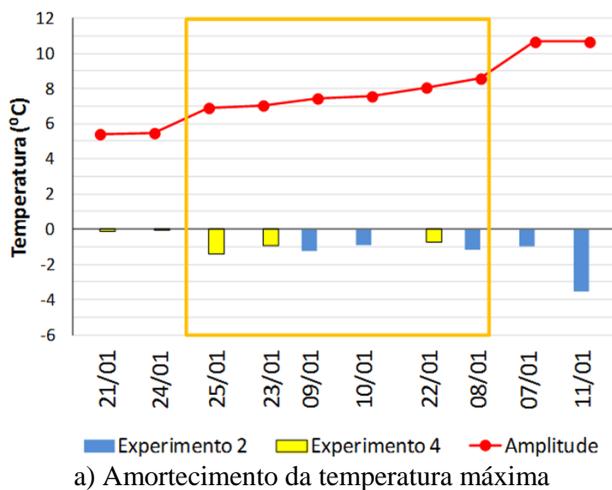
a) Experimento 3 (14 a 18/01/2008).



b) Experimento 6 (11 a 15/02/2008).

**Figura 5.13 – Dias selecionados para comparação dos experimentos com ventilação natural (manhã) e ventilação mecânica noturna.**

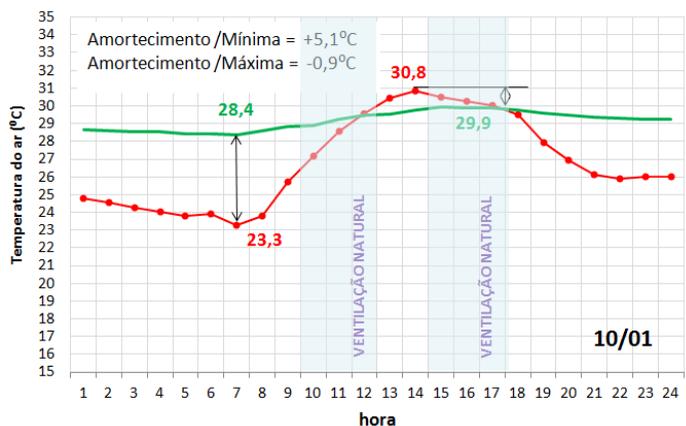
A Figura 5.14 ilustra as amplitudes térmicas externas e os amortecimentos obtidos nos experimentos que empregaram a ventilação natural pela manhã e à tarde, sem ventilação noturna (experimento 2) e com ventilação mecânica à noite (experimento 4). Observa-se que os amortecimentos das temperaturas máximas foram semelhantes em ambos os experimentos (Figura 5.14-a). O efeito da ventilação mecânica pode ser observado no experimento 4 (Figura 5.14-b), no qual foram verificados os menores amortecimentos das temperaturas mínimas.



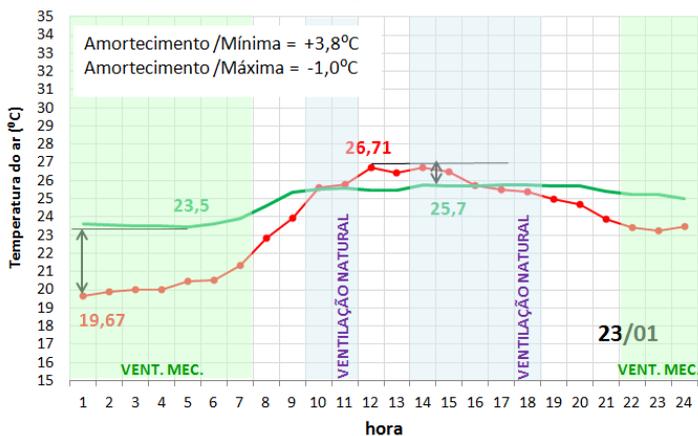
**Figura 5.14 – Amplitudes externas e amortecimentos obtidos no quarto de casal, nos experimentos 2 e 4.**

Foram selecionados dias com amplitudes semelhantes para uma comparação entre os experimentos 2 e 4. A Figura 5.15 ilustra os comportamentos térmicos do ambiente quando ventilado pela manhã e à tarde, sem ventilação mecânica noturna (dia 10/01) e com o emprego desta estratégia (dia 23/01). As amplitudes térmicas externas nessas

datas foram, respectivamente, iguais a 7,5°C e 7,0°C. Apesar da diferença entre as temperaturas máximas externas em cada caso, observa-se que os amortecimentos das temperaturas máximas foram semelhantes. Já no período noturno, o amortecimento da temperatura mínima é 25% menor quando a ventilação mecânica é empregada.



a)



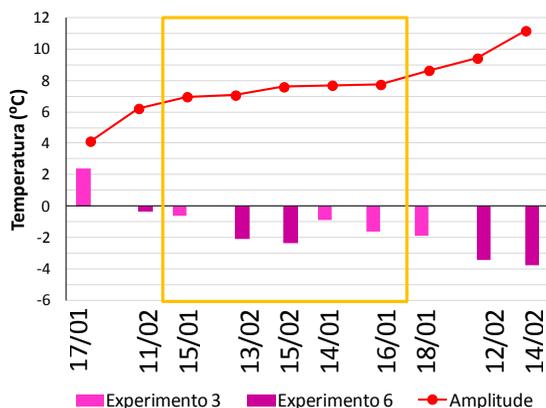
b)

—●— Exterior

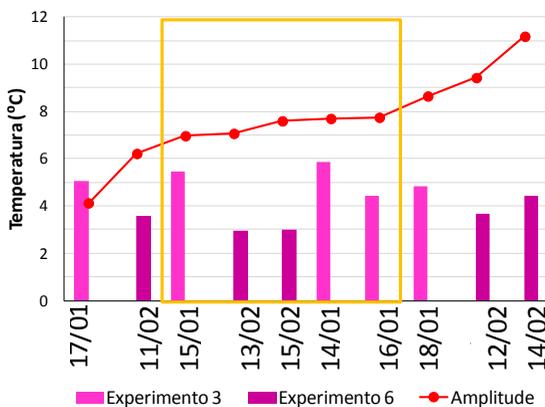
—■— Quarto Casal

Figura 5.15 – Comportamentos térmicos do ambiente: a) experimento 2 e b) experimento 4.

A Figura 5.16 ilustra as amplitudes térmicas externas e os amortecimentos obtidos nos experimentos que empregaram a ventilação natural somente pela manhã, sem ventilação noturna (experimento 3) e com ventilação mecânica à noite (experimento 6). Restringindo-se a ventilação natural apenas pela manhã, foram obtidos maiores amortecimentos da temperatura máxima durante o experimento 6 (Figura 5.16-a). No experimento 6 também foram obtidos os menores amortecimentos das temperaturas mínimas (Figura 5.16-b), apresentando diferenças de até 50% em relação aos amortecimentos obtidos durante o experimento 3.



a) Amortecimento da temperatura máxima



b) Amortecimento da temperatura mínima

**Figura 5.16 – Amplitudes externas e amortecimentos obtidos no quarto de casal, nos experimentos 3 e 6.**

Na Figura 5.17 são comparados dias correspondentes aos experimentos 3 (16/01) e 6 (15/02). As amplitudes externas foram, respectivamente, iguais a 7,7°C e 7,6°C. Observa-se que no dia 15/02 as temperaturas externas no intervalo de aplicação da ventilação natural foram menores do que no dia 16/01, contribuindo para o resfriamento e para um amortecimento maior da temperatura máxima. Além disso, a ventilação mecânica reduziu o amortecimento da temperatura mínima em 23%.

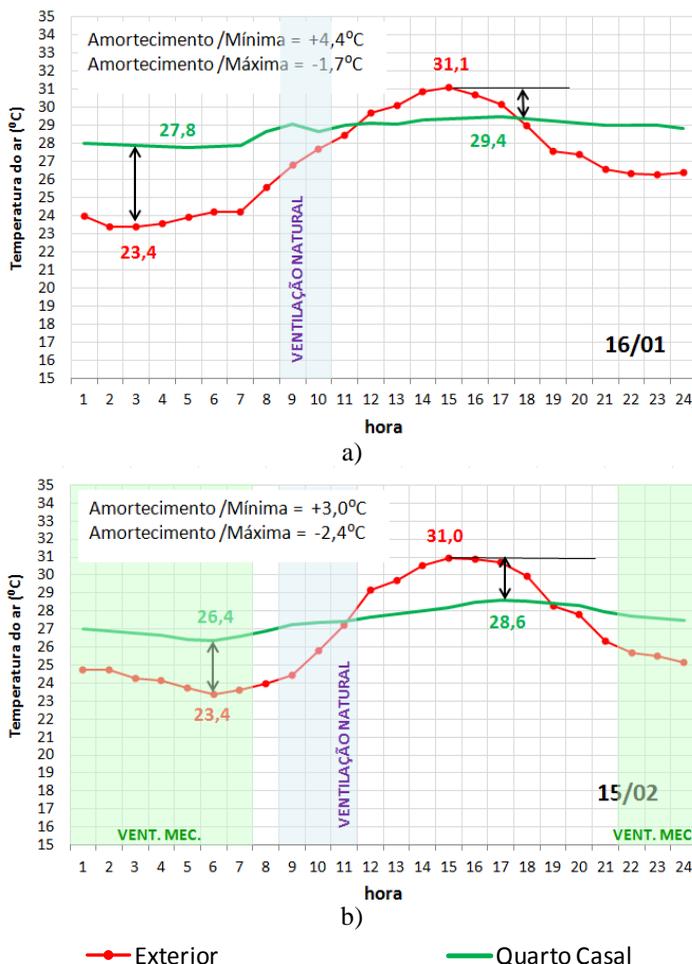
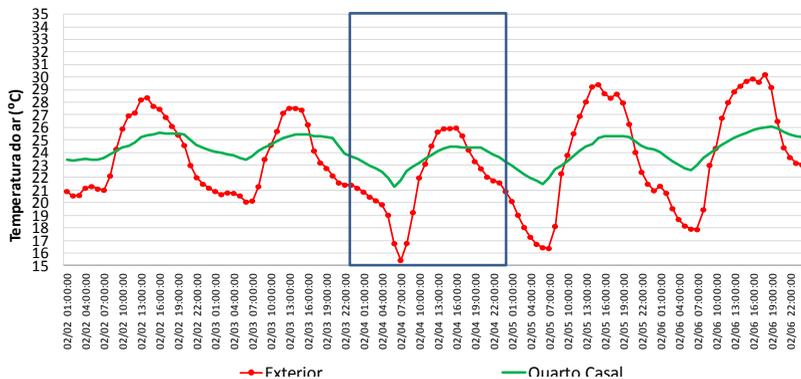


Figura 5.17 – Comportamentos térmicos do ambiente: a) experimento 3 e b) experimento 6.

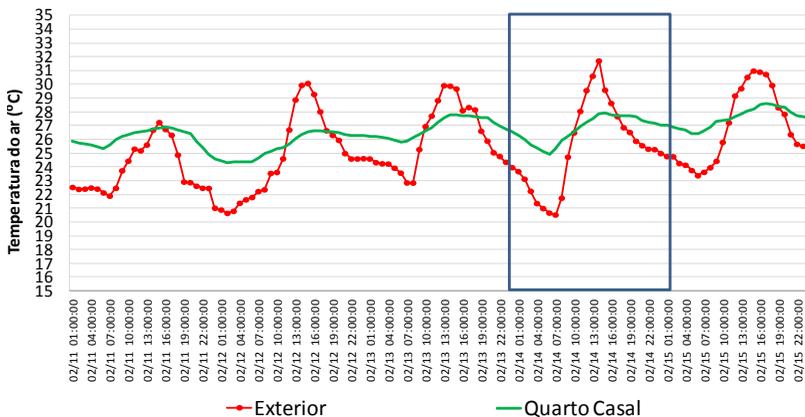
Nos próximos exemplos, são comparados os comportamentos térmicos do ambiente quando submetido à ventilação mecânica noturna, porém sob diferentes períodos de aplicação da ventilação natural diurna (Figuras 5.18 e 5.19).

O experimento 5, no qual a ventilação mecânica noturna foi empregada no ambiente sem admissão da ventilação natural diurna, foi desenvolvido nos dias 02/02 a 06/02. Este período foi caracterizado pelas menores temperaturas externas dentre todos os dias selecionados para análise (ver Figura 5.18-a). Por outro lado, apresentou amplitudes externas elevadas em relação aos demais períodos, superiores a  $13^{\circ}\text{C}$  (Figura 5.20). Comparando-se os resultados do experimento 5 e do experimento 6 (ventilação diurna empregada apenas pela manhã), observa-se que os amortecimentos da temperatura máxima foram semelhantes nos dias assinalados na Figura 5.20-a. Também não foram verificadas diferenças significativas nos amortecimentos da temperatura mínima em ambos os experimentos, considerando-se dias nos quais as amplitudes externas foram semelhantes, conforme destacado na Figura 5.20-b.

Entretanto, observa-se na Figura 5.20 uma maior distinção entre os amortecimentos obtidos nos dois experimentos quando os dias 04/02 (experimento 5) e 14/02 (experimento 6) são comparados. Nestes dias, as amplitudes externas foram respectivamente iguais a  $10,5^{\circ}\text{C}$  e  $11,2^{\circ}\text{C}$ . De acordo com a Figura 5.20, observa-se que o amortecimento da temperatura máxima foi igual a  $-1,4^{\circ}\text{C}$  no dia 04/02, enquanto no dia 14/02 o amortecimento foi 1,5 vezes maior, mesmo com a ventilação em horários com temperatura elevada. Isto se justifica devido às menores temperaturas externas no dia 04/02, pois nesse caso o efeito do amortecimento da temperatura máxima é reduzido. Observa-se também que nesta data o resfriamento no período noturno foi mais eficiente: com a temperatura mínima externa mais baixa, a temperatura interna sofreu uma redução de  $3,2^{\circ}\text{C}$  entre as 21h e as 6h, enquanto a temperatura externa sofreu uma redução de  $4,8^{\circ}\text{C}$ . No dia 14/02, a redução da temperatura interna no mesmo intervalo foi igual a  $2,3^{\circ}\text{C}$  e a redução da temperatura externa foi igual a  $4,4^{\circ}\text{C}$  (Figura 5.21).

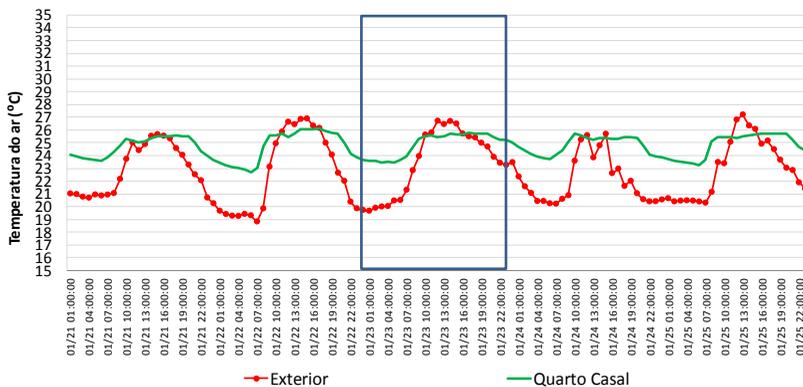


a) Experimento 5 (02 a 06/02/2008).

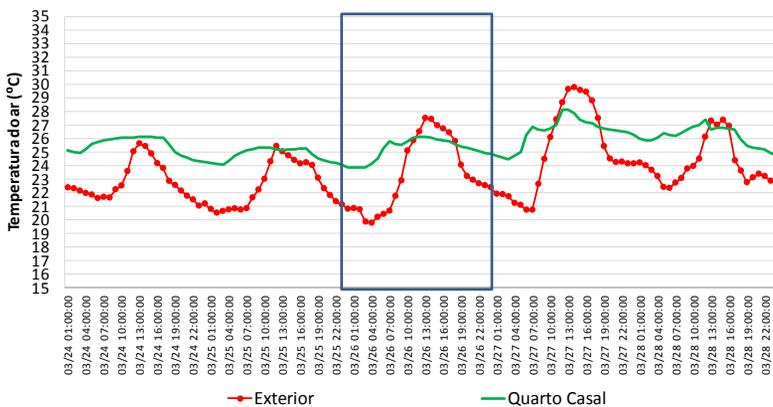


b) Experimento 6 (11 a 15/02/2008).

**Figura 5.18 – Dias selecionados para comparação do experimento sem ventilação natural: 04/02 e experimento com ventilação pela manhã: 15/02, ambos com ventilação mecânica noturna.**

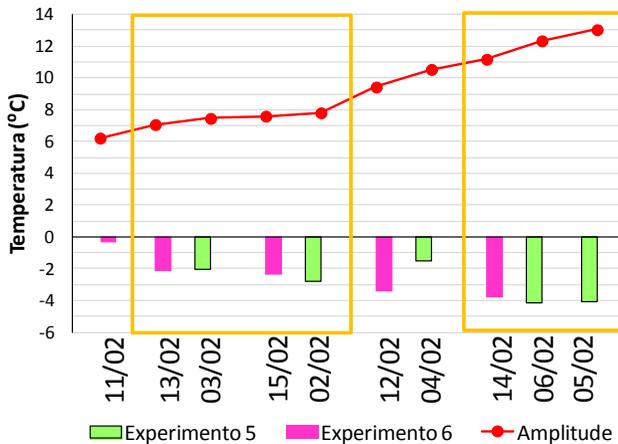


a) Experimento 4 (21 a 25/01/2008).

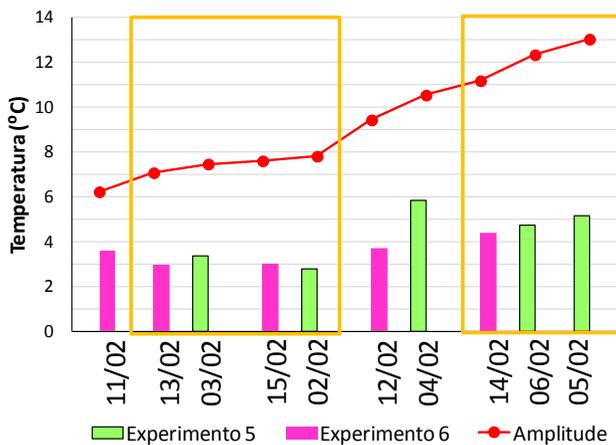


b) Experimento 6 (24 a 28/03/2008).

**Figura 5.19 – Dias selecionados para comparação dos experimentos com ventilação natural: 23/01 (manhã e tarde) e 26/03 (manhã), ambos com ventilação mecânica noturna.**

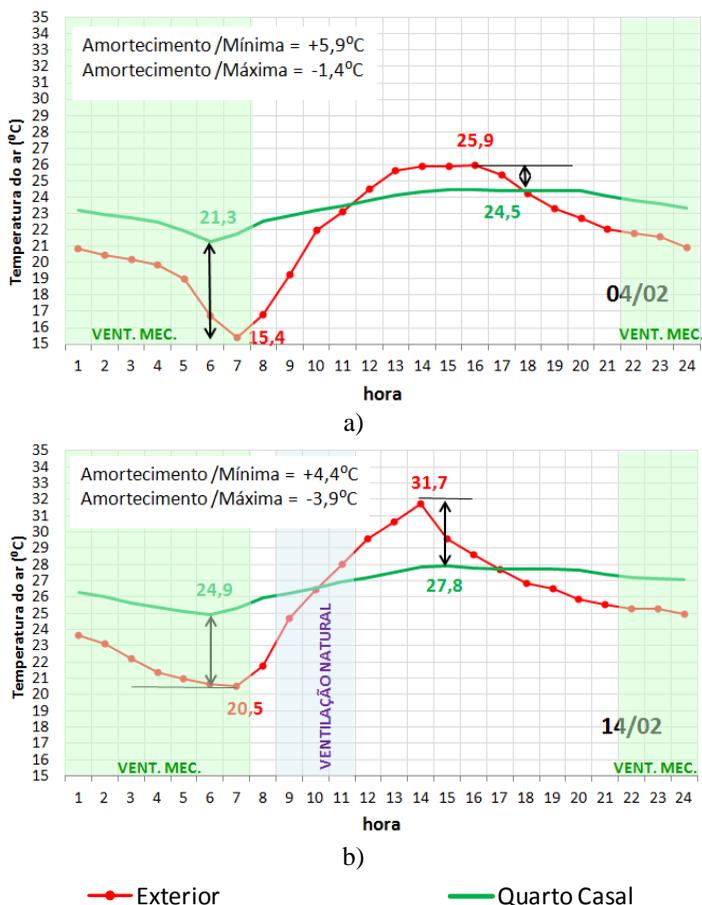


a) Amortecimento da temperatura máxima



b) Amortecimento da temperatura mínima

**Figura 5.20 – Amplitudes externas e amortecimentos obtidos no quarto de casal nos experimentos 3 e 6.**

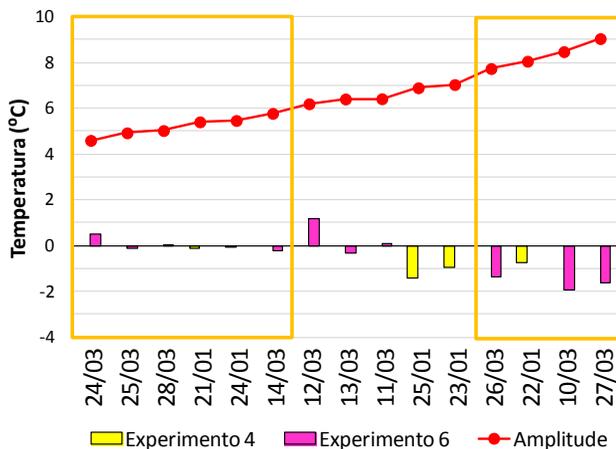


**Figura 5.21 – Comportamentos térmicos do ambiente: a) experimento 5 e b) experimento 6.**

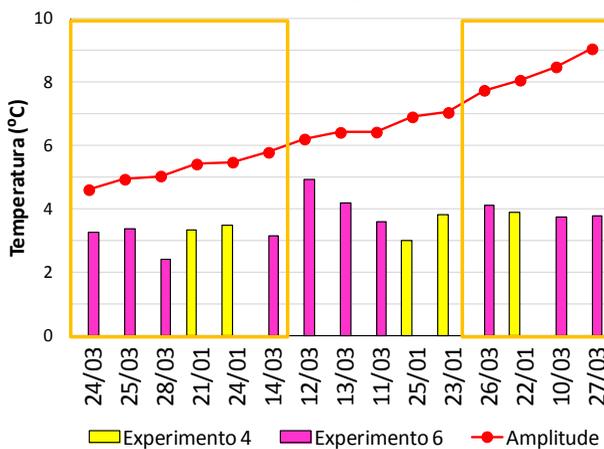
Quando o ambiente foi ventilado pela manhã e à tarde (experimento 4) ou apenas pela manhã (experimento 6), com ventilação mecânica noturna em ambos os casos, observam-se comportamentos térmicos semelhantes. De acordo com a Figura 5.22-a, em ambos os experimentos, foram obtidos amortecimentos muito baixos, inferiores a  $-0,5^{\circ}\text{C}$ <sup>32</sup>, quando a amplitude externa foi inferior a  $6^{\circ}\text{C}$ . Nos dias com amplitudes maiores que  $8,0^{\circ}\text{C}$ , os amortecimentos das temperaturas

<sup>32</sup> Sabendo-se que a precisão dos sensores de temperatura do ar corresponde a  $\pm 0,35^{\circ}\text{C}$ , pode-se afirmar que os amortecimentos das temperaturas máximas nesses casos foram inexistentes.

máximas foram mais expressivos, variando entre  $-0,7^{\circ}\text{C}$  e  $-1,9^{\circ}\text{C}$ . Sob tais condições, os maiores amortecimentos foram obtidos durante o experimento 6. Com relação aos amortecimentos das temperaturas mínimas, observa-se pouca distinção entre ambos os experimentos, sendo que os amortecimentos variaram entre  $2,4^{\circ}\text{C}$  e  $3,5^{\circ}\text{C}$ , quando a amplitude externa foi inferior a  $6^{\circ}\text{C}$ , e entre  $3,7^{\circ}\text{C}$  e  $4,1^{\circ}\text{C}$ , quando as amplitudes externas foram maiores que  $8,0^{\circ}\text{C}$ .



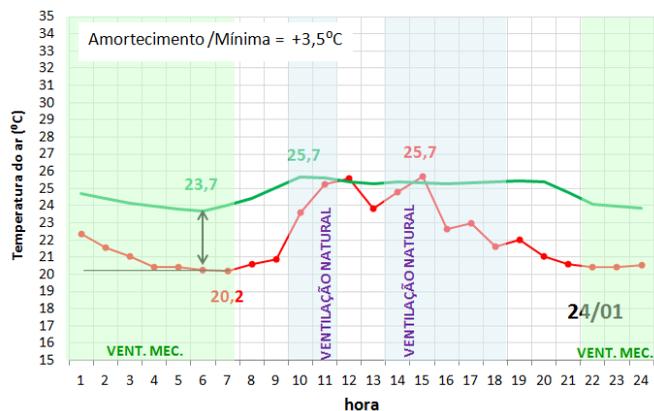
a) Amortecimento da temperatura máxima



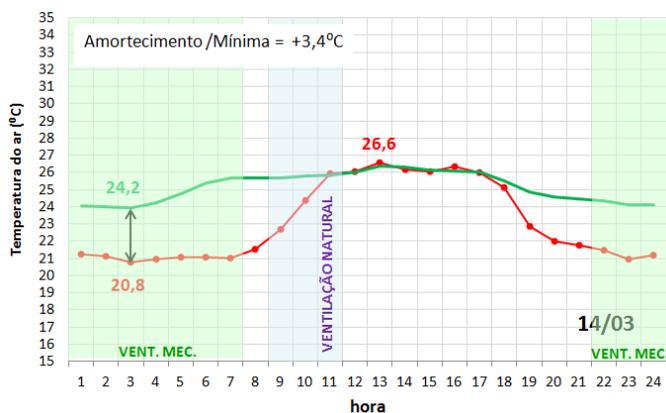
b) Amortecimento da temperatura mínima

**Figura 5.22 – Amplitudes externas e amortecimentos obtidos no quarto de casal nos experimentos 4 e 6.**

As Figuras 5.23 e 5.24 a seguir ilustram o comportamento térmico do ambiente em dias representativos dos experimentos 4 e 6, exemplificando as poucas distinções quanto aos amortecimentos das temperaturas máximas e das temperaturas mínimas sob diferentes amplitudes externas.



a)

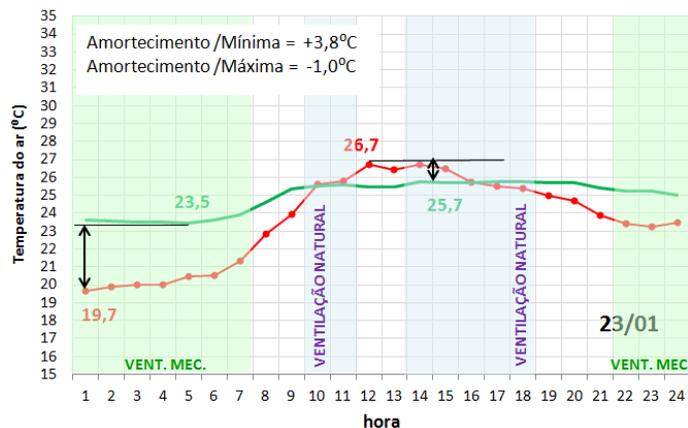


b)

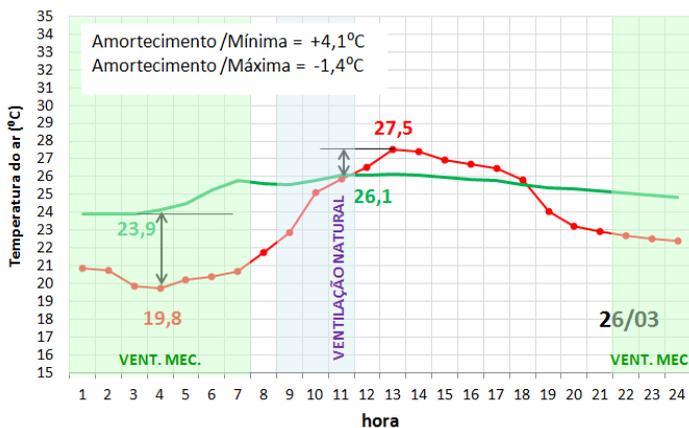
● Exterior

— Quarto Casal

Figura 5.23 – Comportamentos térmicos do ambiente: a) experimento 4 e b) experimento 6.



a)



b)

—●— Exterior

—■— Quarto Casal

**Figura 5.24 – Comportamentos térmicos do ambiente: a) experimento 4 e b) experimento 6.**

De acordo com os resultados ora apresentados, pode-se concluir que a admissão da ventilação natural no período diurno causou a elevação da temperatura interna do quarto de casal. Com isso, verifica-se que o amortecimento da temperatura máxima externa é menor nessas situações, em relação aos dias nos quais o ambiente foi mantido sem ventilação. A admissão da ventilação natural em horários nos quais a

temperatura externa é elevada também afetou o desempenho da ventilação mecânica. Entretanto, o impacto da admissão da ventilação natural é maior quando a temperatura máxima externa é superior a 30°C, no caso dos experimentos realizados.

A fim de caracterizar o efeito dos diferentes padrões de ventilação nos ganhos e perdas de calor no resfriamento da envoltória, foi desenvolvida uma análise dos fluxos de calor através dos componentes construtivos, conforme apresentado a seguir.

### 5.1.3 Análise dos fluxos de calor através dos componentes construtivos

Dentre os dados do monitoramento, foram selecionados registros de fluxo de calor medidos no teto e nas paredes Sul e Leste (Figura 5.25), em períodos representativos de quatro padrões de ventilação: ventilação natural pela manhã e tarde e ventilação natural apenas pela manhã, ambos com e sem ventilação mecânica noturna. O piso e as paredes internas do quarto de casal não possuem sensores de fluxo de calor.



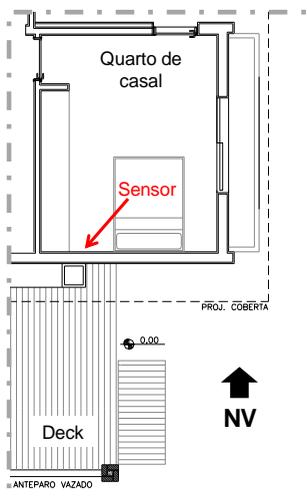
**Figura 5.25 – Localização dos pontos de medição de fluxo de calor: paredes Sul e Leste**

Antes das análises dos fluxos de calor, convém observar algumas características arquitetônicas da edificação que interferem nas condições de exposição solar da envoltória, as quais, por conseguinte, afetam também os fluxos de calor através das paredes e cobertura.

Dentre as paredes que delimitam o ambiente, a parede Sul possui a maior área superficial: 20,8 m<sup>2</sup>. A Figura 5.26-a indica a localização do sensor (fluxímetro) em planta-baixa. Externamente, esta parede é parcialmente sombreada devido à existência de um deck ao lado da entrada Sul da Casa Eficiente, o qual é coberto por uma laje e um anteparo vertical vazado, ilustrado na Figura 5.26. Além disso, a cobertura do próprio quarto de casal também possui um beiral, auxiliando no sombreamento do restante da fachada (Figura 5.26-b).

A fachada Leste possui área total igual a 20 m<sup>2</sup>, dos quais 18,5 m<sup>2</sup> correspondem à parede dupla de tijolos maciços e 1,5 m<sup>2</sup> correspondem à área ocupada pela janela. Dada a sua orientação, esta fachada está exposta à insolação direta pela manhã ao longo de todo o ano. Entretanto, o beiral e a proteção horizontal acima da janela atuam como elementos de sombreamento. A Figura 5.27-a indica a localização do sensor de fluxo de calor posicionado na face interna da parede Leste. A Figura 5.27-b ilustra a vista externa da fachada Leste.

A Figura 5.28 ilustra a vista da fachada Norte da Casa Eficiente, destacando-se a cobertura do quarto de casal. A área total desta cobertura corresponde a 19,2 m<sup>2</sup>, e a inclinação em relação ao plano horizontal é igual a 27°. Este valor correspondente à latitude de Florianópolis, favorecendo a exposição da cobertura à insolação ao longo de todos os meses do ano. Entretanto, a cobertura do quarto de casal está sujeita ao sombreamento durante a tarde, proporcionado pelo bloco central da edificação, que possui altura mais elevada do que os demais ambientes.

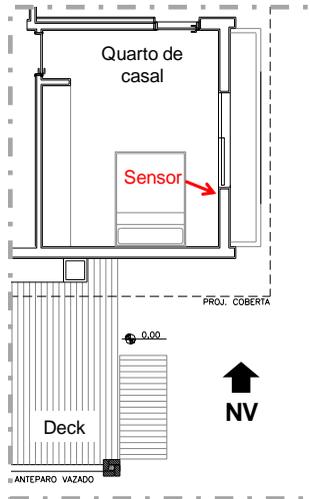


a) Planta-baixa



b) Fachada Sul

**Figura 5.26 – Planta-baixa do quarto de casal e vista externa da Casa Eficiente (fachada Sul).**



a) Planta-baixa



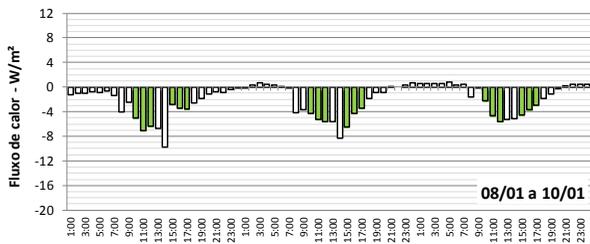
b) Fachada Leste

**Figura 5.27 – Planta-baixa do quarto de casal e vista externa da Casa Eficiente, destacando-se a fachada Leste do quarto de casal.**

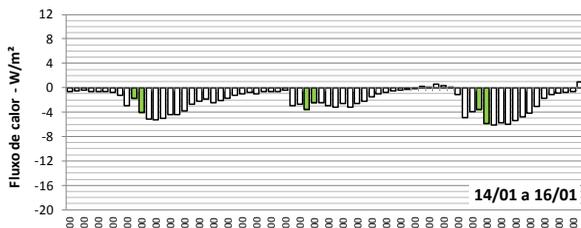


**Figura 5.28 – Vista da fachada Norte, destacando-se a coberta do quarto de casal.**

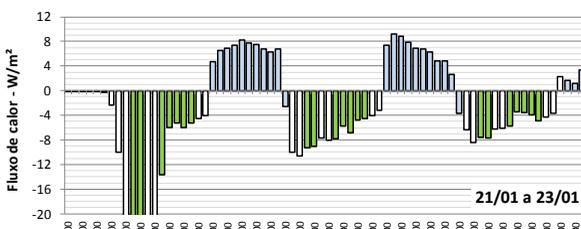
A Figura 5.29 indica o comportamento dos fluxos de calor registrados na parede Sul sob diferentes condições de ventilação do ambiente. Nos períodos sem ventilação mecânica (Figura 5.29-a e 5.29-b), predomina a absorção de calor pela parede Sul (fluxos negativos). Há transmissão de calor pela parede durante a noite e a madrugada, porém em proporção muito inferior ao calor absorvido durante o dia. Mesmo com a ventilação natural, não há remoção do calor acumulado na parede durante o dia. Com a ventilação mecânica noturna, percebe-se que esta estratégia proporciona a remoção do calor acumulado na parede Sul (Figura 5.29-c e d), praticamente durante todo o intervalo em que é aplicada (21h às 7h), conforme demonstrado pelos fluxos positivos indicados nos gráficos. Observa-se ainda que os fluxos de calor absorvidos pela parede aumentam quando há maior exposição à ventilação diurna.



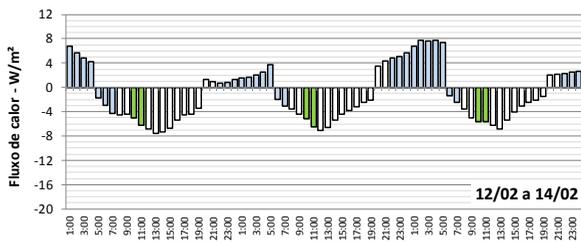
a) Ventilação manhã e tarde, sem ventilação mecânica



b) Ventilação manhã, sem ventilação mecânica



c) Ventilação manhã e tarde, com ventilação mecânica



d) Ventilação manhã, com ventilação mecânica

■ Ventilação natural

■ Ventilação mecânica noturna

Figura 5.29 – Fluxos de calor na parede Sul.

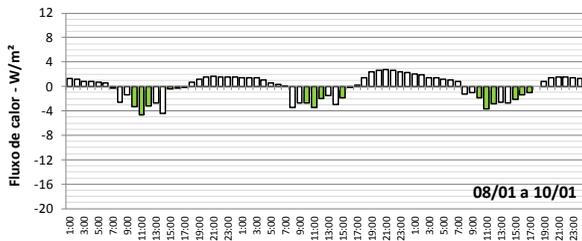
Quando comparados aos gráficos a) e b), os gráficos c) e d) indicam que o calor removido durante a noite intensifica a absorção de calor pela parede no período diurno, potencializando o efeito do amortecimento térmico no interior do ambiente. Nos períodos sem ventilação mecânica ilustrados na Figura 5.29-a e 5.29-b, o amortecimento da temperatura máxima variou entre  $-0,6^{\circ}\text{C}$  e  $-1,7^{\circ}\text{C}$ . Com o emprego da ventilação mecânica (Figura 5.29-c e 5.29-d), o amortecimento da temperatura máxima variou entre  $-0,7^{\circ}\text{C}$  e  $-3,8^{\circ}\text{C}$ .

Na parede Leste, o efeito da ventilação mecânica também é evidenciado pela remoção do calor durante a noite e a madrugada (fluxos positivos) (Figura 5.30-c e d). Entretanto, observa-se que, mesmo sem o emprego desta estratégia, ocorre transmissão de calor pela parede durante a noite, em proporção semelhante à quantidade de calor absorvida durante o dia (fluxos negativos) (Figura 5.30-a e b), ao contrário do que ocorre com a parede Sul. Tal comportamento se justifica, pois a parede Leste é mais exposta à radiação solar do que a parede Sul, resultando em maior acúmulo de calor durante o dia, que é transmitido posteriormente ao ambiente interno.

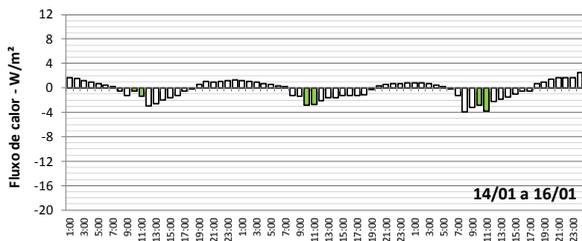
O comportamento do teto é diferenciado em relação às paredes. Neste caso, o sentido dos fluxos de calor é alterado e o efeito da ventilação mecânica é diferenciado. Nos períodos sem ventilação mecânica, o teto transmite calor ao ambiente interno entre as 10h e 19h, absorvendo calor nos demais horários (Figura 5.31-a e b). Com o emprego da ventilação mecânica, a absorção de calor pelo teto se torna mais restrita (Figura 5.31-c), sendo que em alguns horários chega a ocorrer transmissão de calor entre as 21h e 7h<sup>33</sup>.

---

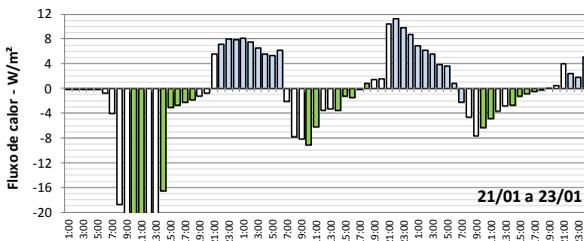
<sup>33</sup> Os registros dos fluxos de calor no teto do quarto de casal no período de 21/01 a 24/01, quando a ventilação natural foi empregada pela manhã e à tarde, juntamente com a ventilação noturna, foram descartados das análises devido à ocorrência de falha nos registros efetuados pelo fluxímetro.



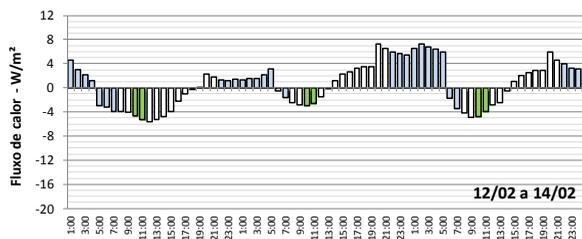
a) Ventilação manhã e tarde, sem ventilação mecânica



b) Ventilação manhã, sem ventilação mecânica



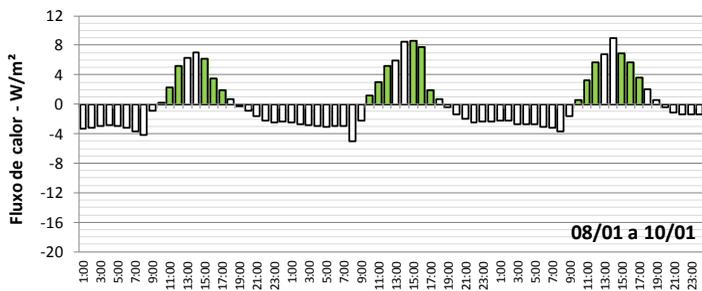
c) Ventilação manhã e tarde, com ventilação mecânica



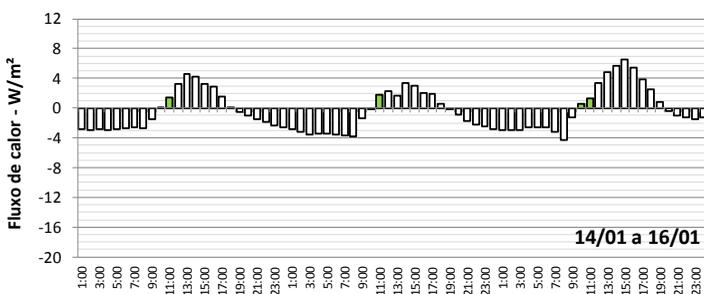
d) Ventilação manhã, com ventilação mecânica

Ventilação natural
  Ventilação mecânica noturna

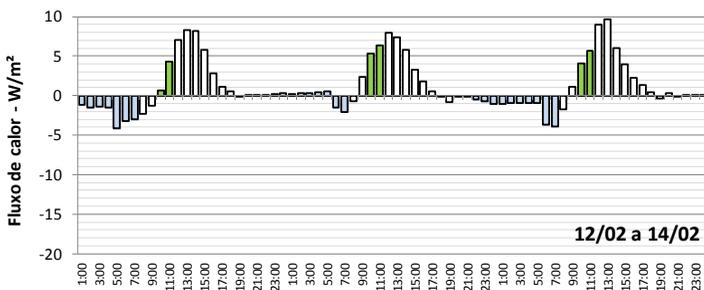
Figura 5.30 – Fluxos de calor na parede Leste .



a) Ventilação manhã e tarde, sem ventilação mecânica



b) Ventilação manhã, sem ventilação mecânica



c) Ventilação manhã, com ventilação mecânica

■ Ventilação natural

■ Ventilação mecânica noturna

**Figura 5.31 – Fluxos de calor no teto.**

De acordo com os resultados apresentados nos itens 5.1.1 a 5.1.3, pode-se concluir que a ventilação mecânica noturna beneficiou o desempenho térmico do quarto de casal, conforme foi demonstrado através de comparações entre os experimentos com e sem o emprego da

referida estratégia. Observou-se também que mesmo quando a ventilação natural diurna é empregada, os amortecimentos das temperaturas máximas são maiores com o emprego da ventilação mecânica noturna. Nesses casos, a admissão da ventilação e da insolação no período diurno afeta o desempenho da ventilação mecânica noturna, mas se as mesmas não forem empregadas nos horários mais quentes do dia, principalmente entre 11h e 15h, o impacto sobre a eficácia da ventilação mecânica noturna é menor.

Por fim, convém salientar que os efeitos sobre o resfriamento fisiológico produzido quando o escoamento do ar atinge os usuários dos ambientes internos não foi considerado. Com relação ao conforto térmico, ao favorecer a evaporação do suor, o movimento do ar reduz a temperatura efetiva, ampliando o limite de conforto térmico. Entretanto, os resultados ora apresentados limitam-se à caracterização do efeito da ventilação natural sobre o resfriamento do ambiente, conforme pôde ser observado também a partir da análise dos fluxos de calor através das paredes externas e coberturas, sendo este efeito o alvo da análise do balanço térmico desenvolvida no presente trabalho.

## 5.2 CALIBRAÇÃO DO MODELO BASE INICIAL

Neste item são apresentados os resultados da calibração do Modelo Base Inicial da Casa Eficiente, de acordo com os procedimentos metodológicos apresentados no item 4.2.2.

A calibração do Modelo Base Inicial foi realizada a partir da análise de sensibilidade do modelo computacional, utilizando-se como referência os resultados do monitoramento obtidos em quatro sequências de dias, diferenciadas em função dos padrões de ventilação aplicados no ambiente:

- a) Dias 01/01 e 02/01;
- b) Dias 08/01 a 10/01;
- c) Dias 22/01 a 25/01;
- d) Dias 03/02 a 06/02.

A análise de sensibilidade efetuada para os dias 01/01 e 02/01 corresponde a um período no qual o ambiente permaneceu fechado 24h, 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: i) temperatura do solo e ii) coeficiente de fluxo de massa de ar por frestas (k).

A Figura 5.32 apresenta os resultados das simulações dos Modelos 1 a 4, podendo-se observar a variação das temperaturas internas obtidas em cada simulação e também as temperaturas medidas *in loco*, assim como a temperatura externa, para fins de comparação. Nesta etapa, foram realizados testes referentes à temperatura do solo e ao coeficiente do fluxo de massa de ar por frestas (k), parâmetro que caracteriza a infiltração de ar através das janelas. A Tabela 5.2 apresenta os desvios médios e erros quadráticos das temperaturas do ar simuladas em relação às medições.

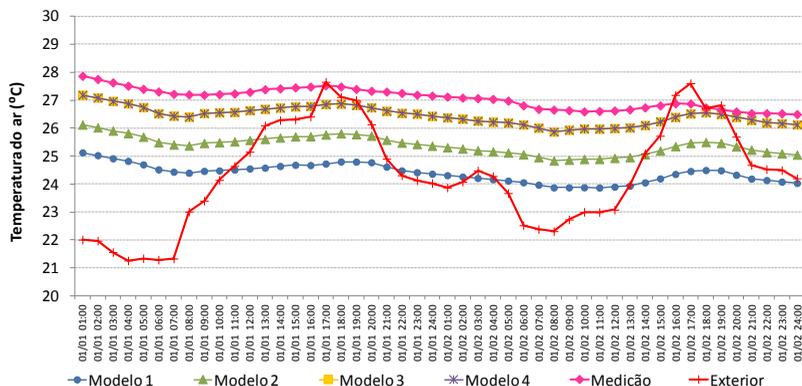


Figura 5.32 – Temperaturas do ar medidas e simuladas (01/01 e 02/01).

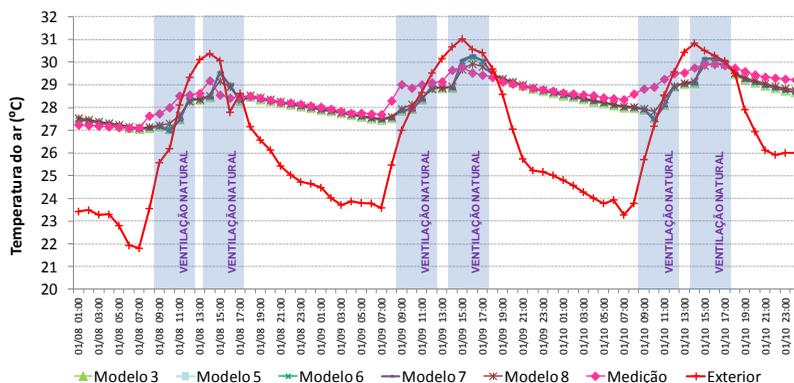
Tabela 5.2 – Análise de sensibilidade, dias 01 e 02 de janeiro.

Modelo	Caracterização dos dados de entrada	Desvio Médio	Erro Quadrático	Dados de entrada mantidos
1	Modelo base: Temp. Solo arquivo climático e $k=0,0001 \text{ kg/s.m}$	2,7	2,7	-
2	Modelo 1 + Temp. Solo Slab	1,7	1,7	Não
3	Modelo 1 + Temp. Solo medida	0,6	0,6	Sim
4	Modelo 3 + $k=0,00006 \text{ kg/s.m}$	0,6	0,6	Não

De acordo com a Tabela 5.2, o Modelo 3 e o Modelo 4 apresentaram os melhores resultados: D.M. = 0,6 e E.Q. = 0,6, atestando a influência da temperatura do solo no resultado das simulações. Entretanto, como a alteração no valor de  $k$  não afetou os desvios obtidos, conforme pode ser observado na Tabela 5.2, optou-se pela escolha do Modelo 3 para dar prosseguimento às simulações.

O Modelo 3 foi utilizado para a análise de sensibilidade de outro período: 08 a 10 de janeiro (Figura 5.33 e Tabela 5.3), no qual o ambiente foi exposto à ventilação natural apenas nos seguintes horários:

9h às 12h e 14 às 17h (assinalados em azul, na Figura 5.33). 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 ( $e$ ).



**Figura 5.33 – Temperaturas do ar medidas e simuladas (08/01 a 10/01).**

**Tabela 5.3 – Análise de sensibilidade, dias 08 a 10 de janeiro.**

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

Segundo a Tabela 5.3, houve pouca variação nos resultados, verificando-se uma pequena redução no desvio médio obtido na simulação do Modelo 5, que foi o mesmo desvio obtido pelo Modelo 8, sendo que este também apresentou o menor erro quadrático. Portanto, o uso de parâmetros característicos de um entorno urbano ( $e=0,33$  e  $h = 460$  m) apresentou melhores resultados. Desse modo, o Modelo 8 (D. M. = 0,3 e E.Q. = 0,4), que também se caracteriza pelo uso do coeficiente de descarga menor ( $C_d = 0,5$ ), foi utilizado na análise de sensibilidade do período seguinte.

As simulações seguintes correspondem ao período de 03 a 09 de fevereiro, caracterizado pelo emprego da ventilação mecânica noturna entre 21h e 7h. Inicialmente, buscou-se identificar o valor adequado para a vazão do insuflador. O Modelo 8 foi adaptado, com a inserção do insuflamento mecânico, considerando-se vazões diferenciadas (ver item 2.2). A Figura 5.34 ilustra as temperaturas internas obtidas nas simulações, juntamente com as temperaturas obtidas por medição no interior do ambiente. Os desvios médios (D.M.) e erros quadráticos (E.Q.) obtidos para cada vazão simulada foram os seguintes:

- Vazão =  $0,18 \text{ m}^3/\text{s}$ : D.M.= 1,14 e E.Q. = 1,30;
- Vazão =  $0,24 \text{ m}^3/\text{s}$ : D.M.= 1,23 e E.Q. = 1,33;
- Vazão =  $0,31 \text{ m}^3/\text{s}$ : D.M.= 1,30 e E.Q. = 1,40.

Observando-se a variação das temperaturas durante os horários nos quais a ventilação mecânica foi empregada (21h às 7h), destacados em verde na Figura 5.34, e considerando-se os desvios médios e erros quadráticos indicados acima, verifica-se que o modelo simulado com vazão igual a  $0,18 \text{ m}^3/\text{s}$  apresentou os melhores resultados. Portanto, esta vazão foi adotada em todas as simulações seguintes.

Para a análise de sensibilidade correspondente ao período de 03 a 09 de fevereiro foram simulados nove modelos no total: o Modelo 8, resultante da etapa anterior da calibração, re-simulado após a inserção do insuflamento, e os modelos 9 a 16. Foram testados parâmetros de simulação relativos ao insuflamento do ar: o expoente do fluxo de massa de ar ( $n_i$ ) e o coeficiente do fluxo de massa de ar ( $k_i$ ) do equipamento, que caracterizam a infiltração do ar através do mesmo quando este se encontra desligado, e o aumento da pressão do ar (*Pressure Rise* – PR). Os seguintes parâmetros correspondentes à abertura de insuflamento do ar foram avaliados: coeficiente de descarga ( $C_{d_A}$ ), variação de pressão através da abertura ( $\Delta P_A$ ) e expoente do fluxo de massa de ar ( $n_A$ ). A

Figura 5.35 ilustra os resultados das simulações. Convém salientar que não foi utilizada nenhuma outra estratégia de ventilação além da ventilação mecânica noturna, de modo que a janela permaneceu fechada e totalmente sombreada pela persiana durante o dia.

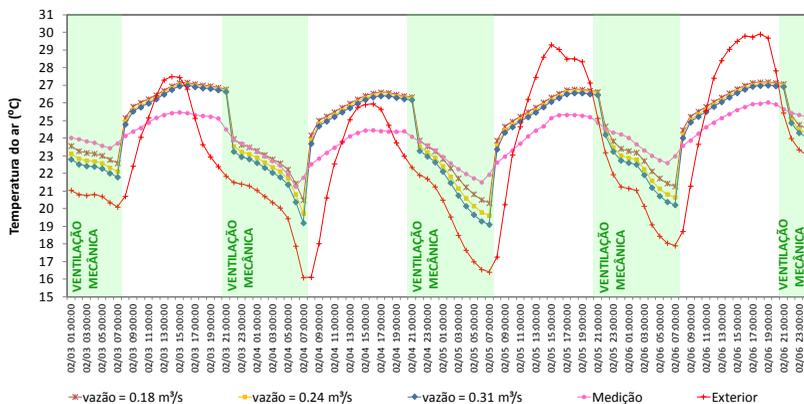


Figura 5.34 – Temperaturas do ar medidas e simuladas com diferentes vazões de ar no período noturno (03/02 a 06/02).

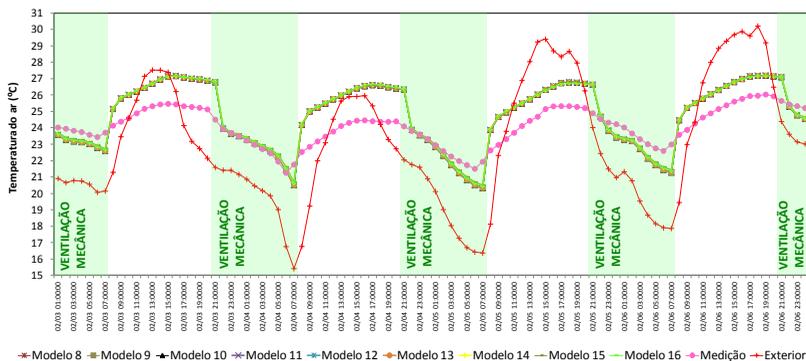


Figura 5.35 – Temperaturas do ar medidas e simuladas (03/02 a 06/02).

Observou-se que apenas a alteração do coeficiente de descarga da abertura de insuflamento ( $Cd_A$ ) e da variação da pressão através da abertura ( $\Delta P_A$ ) resultou na redução do desvio médio e erro quadrático da

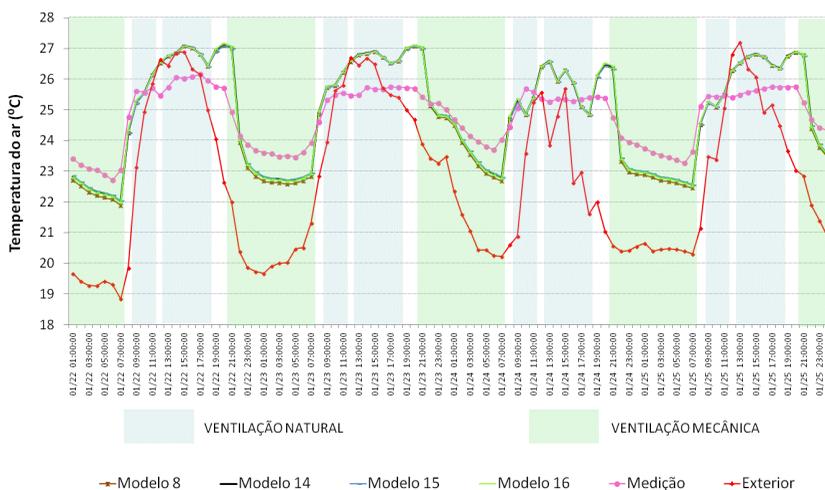
simulação (Modelo 14). Observou-se que os desvios em relação às medições foram menores nos horários em que ventilação mecânica é empregada, destacando-se as variações mais acentuadas das temperaturas simuladas nos horários de acionamento (21h) e interrupção do insuflamento (7h). Desse modo, a análise 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 5.4). 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 24h diárias, os desvios médios e erros quadráticos foram os mesmos para todas as simulações, sendo respectivamente iguais a 1,1 e 1,3.

**Tabela 5.4 – Análise de sensibilidade, dias 03 a 06 de fevereiro (intervalo 21h às 7h, com ventilação mecânica).**

Modelo	Caracterização dos dados de entrada	Desvio Médio	Erro Quadrático	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 + $n_A = 0,5$	0,5	0,6	Não
16	Modelo 14+ $n_A = 1,0$	0,5	0,6	Não

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 5.36 ilustra as temperaturas medidas e simuladas no período. Também foram observados desvios menores nos horários em que a ventilação mecânica foi empregada. A Tabela 5.5 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 5.36 – Temperaturas do ar medidas e simuladas (22 a 25/01).**

**Tabela 5.5 – Análise de sensibilidade, dias 22 a 25 de janeiro.**

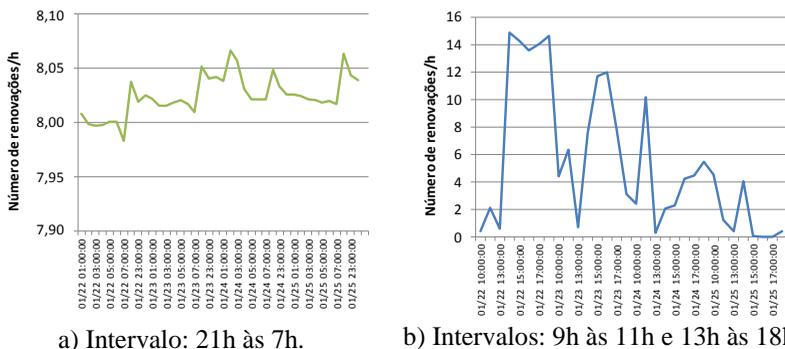
Modelo	Caracterização dos dados de entrada	24 h		7h – 21h (ventilação natural/ fechado)		21h – 7h (vent. mecânica)		Dados de entrada mantidos
		D.M.	E.Q.	D.M.	E.Q.	D.M.	E.Q.	
8	Modelo 8	0,8	0,9	0,8	0,9	0,3	0,5	-
14	Modelo 8 + $Cd_1 = 0,6$ e $\Delta P = 10$ Pa	0,8	0,9	0,8	1,0	0,3	0,5	Não
15	Modelo 14 + $n_1 = 0,5$	0,7	0,8	0,8	0,9	0,3	0,4	Sim
16	Modelo 14 + $n_1 = 1,0$	0,8	0,9	0,9	1,0	0,3	0,5	Não

### 5.2.1 Considerações sobre o Modelo Base Inicial

O Modelo 15 representa o modelo calibrado para a simulação da ventilação mecânica noturna. Os resultados obtidos na análise de sensibilidade desenvolvida para os períodos de 03/02 a 06/02 e 22/01 a 25/01 se destacaram pela obtenção de desvios diferenciados entre os valores simulados e medidos nos horários em que a ventilação mecânica foi empregada. No intervalo de 21h às 7h, os desvios foram menores do que aqueles verificados nos demais horários. Convém salientar que o algoritmo de convecção *TARP* foi utilizado em todas as simulações realizadas para a calibração do Modelo Base Inicial. Este algoritmo calcula o coeficiente de convecção em função do diferencial de temperatura entre a superfície e o ar.

Entretanto, o modelo de rede utilizado para a simulação da ventilação natural pelo EnergyPlus não considera a estratificação do ar no interior do ambiente. Desse modo, ocorrem desvios significativos no gradiente de temperatura mencionado anteriormente, quando simulado pelo *software*. Tais desvios tendem a ser maiores quando o ambiente é exposto à ventilação natural, dada a variabilidade do movimento do ar. Tal fato justifica a diferença nos desvios obtidos na calibração do Modelo Base Inicial, pois quando a ventilação mecânica noturna é empregada, a taxa de renovação do ar do ambiente é constante (8,02

renovações de ar por hora, em média, de acordo com a vazão de insuflamento igual a  $0,18 \text{ m}^3/\text{s}$  (Figura 5.37-a), ao contrário dos horários nos quais a ventilação natural é aplicada. De acordo com as simulações realizadas para o período de 22/01 a 25/01, sob o efeito da ventilação natural as taxas de renovação de ar do quarto de casal variaram entre 0,00068 renovações/h e 14,83 renovações/h (Figura 5.37-b).

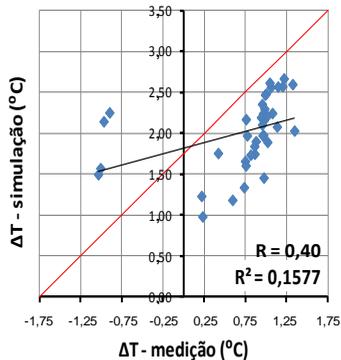


a) Intervalo: 21h às 7h.

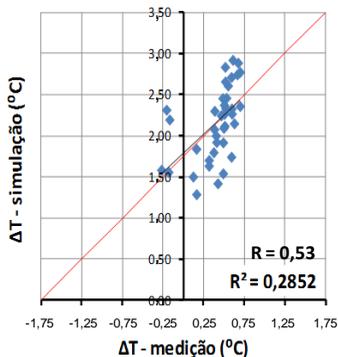
b) Intervalos: 9h às 11h e 13h às 18h.

**Figura 5.37 – Taxas de renovação de ar do ambiente no período de 22/01 a 25/01.**

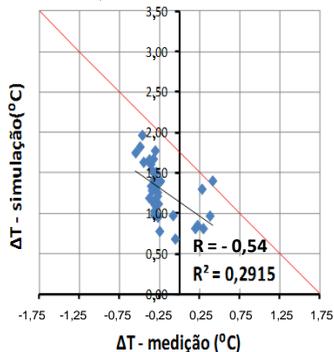
Comparando-se os diferenciais de temperatura entre as superfícies das paredes Sul e Leste e do teto, medidos *in loco* no período de 22/01 a 25/01 com os valores simulados, observa-se uma baixa correlação entre os resultados no intervalo de 21h a 7h, sob o emprego da ventilação mecânica noturna (Figura 5.38). A Figura 5.39 indica os coeficientes de correlação ( $R$ ) e determinação ( $R^2$ ) obtidos nos horários em que a ventilação natural foi empregada (9h às 11h e 13h às 18h). De acordo com tais resultados, verifica-se que a correlação entre os dados medidos e simulados é nula para este intervalo.



a) Parede Sul

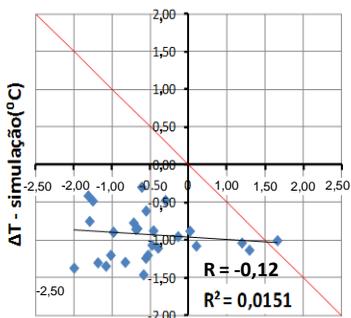


b) Parede Leste



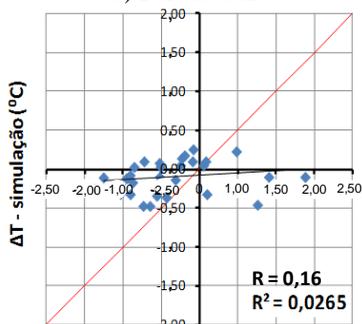
c) Teto

Figura 5.38 – Correlação entre os diferenciais de temperatura das superfícies em relação à temperatura do ar interno, simulados e medidos, sob o emprego da ventilação mecânica (intervalo 21h às 7h).



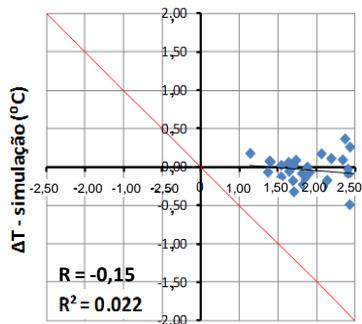
$\Delta T$  - medição ( $^{\circ}\text{C}$ )

a) Parede Sul



$\Delta T$  - medição ( $^{\circ}\text{C}$ )

b) Parede Leste



$\Delta T$  - medição ( $^{\circ}\text{C}$ )

c) Teto

Figura 5.39 – Correlação entre os diferenciais de temperatura das superfícies em relação à temperatura do ar interno, simulados e medidos, sob o emprego da ventilação natural (intervalo 9h às 11h e 13h às 18h).

Dadas as diferentes possibilidades de cálculo dos coeficientes de convecção proporcionadas pelo *software* EnergyPlus, foram realizados testes com diferentes algoritmos a fim de obter a redução nos desvios das simulações em relação aos valores obtidos durante o monitoramento. Tais resultados constituem a segunda etapa da calibração do modelo computacional, conforme apresentado a seguir.

### 5.3 CALIBRAÇÃO DO MODELO BASE FINAL

O Modelo 15, calibrado na etapa anterior, foi submetido a uma nova análise de sensibilidade, na qual foram testadas diferentes combinações de algoritmos de condução e convecção disponibilizados pelo *software* EnergyPlus.

Os dados analisados nesta etapa correspondem aos fluxos de calor<sup>34</sup> e temperaturas superficiais das paredes Sul e Leste, temperaturas superficiais do teto do quarto de casal<sup>35</sup> e dados registrados pelo fluxímetro instalado no piso da sala de jantar (único ponto de medição instalado no piso térreo da Casa Eficiente). Convém salientar que as análises apresentadas neste tópico se referem ao balanço térmico das superfícies, e não ao balanço térmico do ar. Portanto, a terminologia adotada designa os ganhos e perdas de calor ocorridos pelas superfícies das paredes e do piso, sendo que ambos os fluxos integram as trocas por convecção e radiação. Ou seja, representam o fluxo de calor total que cada superfície absorve (ganhos de calor pela superfície, indicados com sinal negativo) ou transmite ao ambiente (perdas de calor pela superfície, indicadas com sinal positivo)<sup>36</sup>.

Foram calculados também os somatórios de graus-hora de resfriamento da temperatura do ar interno durante o período de 22/01 a 25/01, a fim de identificar os desvios nos resultados das simulações quando comparados aos valores obtidos pela medição *in loco*.

Esta análise subsidiou a seleção dos algoritmos de condução e convecção, com o objetivo de reduzir os desvios nas simulações do ambiente estudado. Os algoritmos selecionados foram incluídos nas

---

<sup>34</sup> Em todas as análises aqui desenvolvidas, foram utilizados dados de densidade do fluxo de calor, expressa em  $W/m^2$ .

<sup>35</sup> Foram identificados erros nos registros efetuados pelo fluxímetro instalado no teto do quarto de casal entre os dias 21/01 e 24/01, conforme citado anteriormente.

<sup>36</sup> A convenção relativa ao sinal dos fluxos de calor está associada ao resultado da diferença entre a temperatura da superfície e a temperatura do ar ( $\Delta T = T_{\text{superfície}} - T_{\text{ar}}$ ). Os ganhos de calor ocorrem sempre que a temperatura da superfície é maior do que a temperatura do ar ( $\Delta T > 0$ ), enquanto as perdas de calor ocorrem sempre que  $\Delta T < 0$ .

simulações do balanço térmico apresentadas no item 5.4, destinadas a avaliar a eficácia da ventilação mecânica noturna sob diferentes configurações construtivas e padrões de ventilação.

A seguir, são apresentados os resultados da análise de sensibilidade desenvolvida a partir do balanço térmico de cada superfície interna. O dia 25/01 foi escolhido como dia representativo para ilustrar as análises, sendo que o comportamento dos fluxos de calor segue a mesma tendência em todos os dias do período analisado. Os gráficos com os resultados referentes aos dias 22/01 a 24/01 encontram-se no Apêndice II.

Na sequência, são apresentados os resultados obtidos a partir da análise das temperaturas superficiais e do ar interno, juntamente com os somatórios de graus-hora de resfriamento. Ao final deste item é apresentada a combinação de algoritmos de condução e convecção selecionada, comprovando-se a redução dos desvios das simulações do Modelo Base Final em relação ao Modelo Base Inicial calibrado na etapa anterior.

### 5.3.1 Análise do balanço térmico das superfícies internas

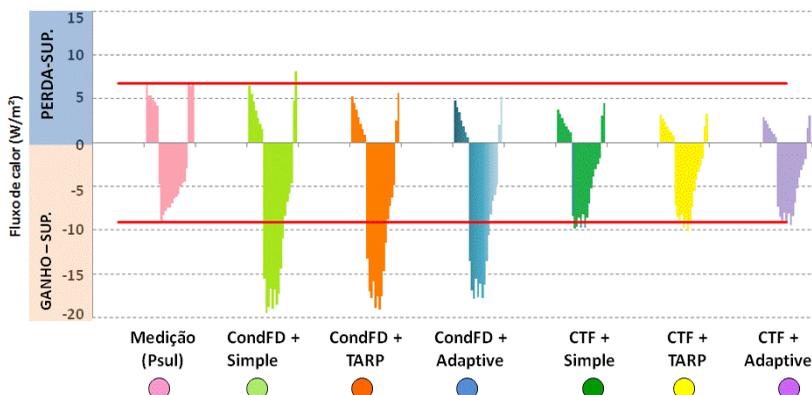
A Figura 5.40 ilustra o balanço térmico da parede Sul ao longo do dia 25/01, registrado durante o monitoramento (medição) e obtido a partir das simulações computacionais. As linhas em vermelho indicam os valores máximo e mínimo dos fluxos de calor registrados durante o monitoramento, no dia assinalado. As diferentes colunas representam os fluxos de calor transmitidos pela superfície para o ar interno (perdas) ou absorvido pela mesma (ganhos), obtidos a partir da medição e das simulações (valores instantâneos). Conforme descrito anteriormente, as perdas de calor pela superfície são quantificadas com sinal positivo, enquanto os ganhos de calor pela superfície são quantificados com sinal negativo<sup>37</sup>.

Segundo as medições, os fluxos de calor na parede Sul apresentaram valor máximo igual a  $6,82 \text{ W/m}^2$  e valor mínimo igual a  $-9,11 \text{ W/m}^2$ . Os resultados das simulações com o algoritmo CondFD indicam que os ganhos de calor pela superfície são superestimados, alcançando até o dobro dos fluxos de calor medidos, enquanto as perdas

---

<sup>37</sup> Nas análises do balanço térmico das superfícies, a convenção adotada neste trabalho para designar o sinal dos fluxos de calor tem como referência a superfície, ao invés do ar interno. Portanto, ganhos de calor pela superfície estão representados com sinal negativo e correspondem a perdas de calor no ar interno. Do mesmo modo, perdas de calor pela superfície estão representadas com sinal positivo e correspondem a ganhos de calor no ar interno.

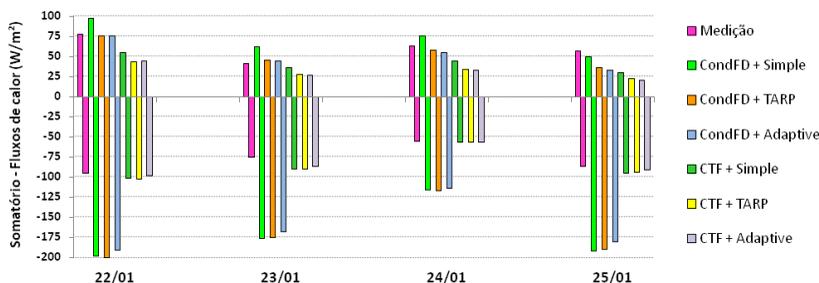
de calor pela superfície são equivalentes aos valores medidos. Já as simulações com o algoritmo CTF subestimaram as perdas de calor para o ar interno em mais de 60%, enquanto os ganhos de calor pela superfície foram equivalentes às medições.



**Figura 5.40 – Fluxos de calor na superfície interna da parede Sul (área = 20,8 m<sup>2</sup>), medidos e simulados segundo combinações de algoritmos distintas (dia 25/01).**

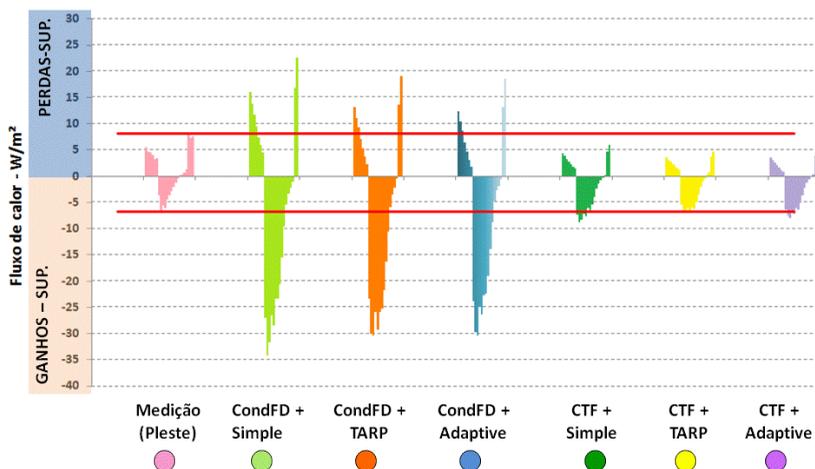
Também foram comparados os somatórios diários dos ganhos e perdas de calor pela superfície interna da parede Sul. Para tal, foram somadas as parcelas correspondentes aos ganhos de calor pela superfície em cada dia (fluxos negativos) e também as parcelas correspondentes às perdas de calor pela mesma em cada dia (fluxos positivos). Na Figura 5.41, para cada dia considerado, estão indicados sete pares de valores, correspondentes à medição e aos seis modelos simulados. Cada um destes pares representa os somatórios dos fluxos positivos e negativos contabilizados durante um período de 24 horas.

Os somatórios indicados na Figura 5.41 evidenciam que os ganhos de calor na parede Sul (fluxos negativos) são superestimados nas simulações com ambos os algoritmos CondFD e CTF. 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 + *Simple* resultou em valores superestimados em até 51%.



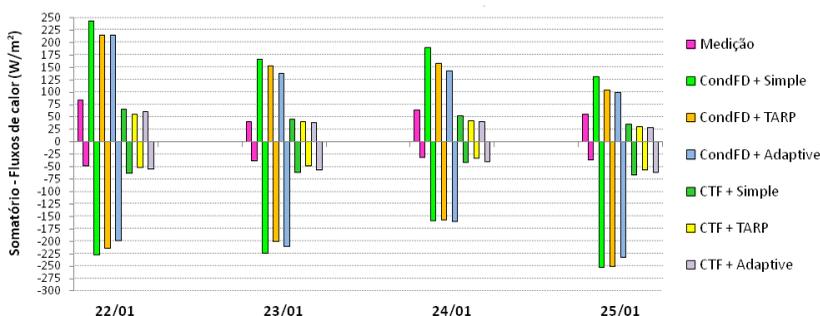
**Figura 5.41 – Somatórios diários dos fluxos de calor na parede Sul**

A Figura 5.42 ilustra o balanço térmico da parede Leste. Segundo as medições, os fluxos de calor apresentaram valor máximo igual a  $8,05 W/m^2$  e valor mínimo igual a  $-6,76 W/m^2$ . As simulações com o algoritmo CondFD superestimaram as medições, em até 2,5 vezes para as perdas de calor (fluxos positivos) e 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%.



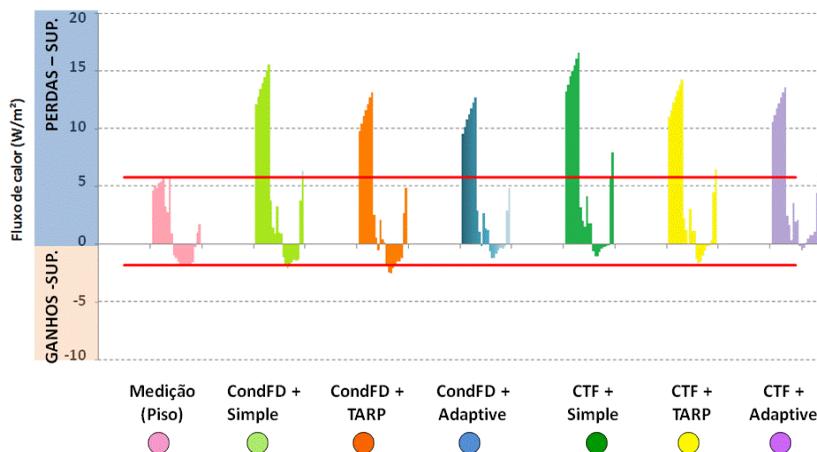
**Figura 5.42 – Fluxos de calor na superfície interna da parede Leste ( $20 m^2$ ), medidos e simulados para combinações de algoritmos distintas (dia 25/01).**

Os somatórios diários dos fluxos de calor (Figura 5.43) 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).

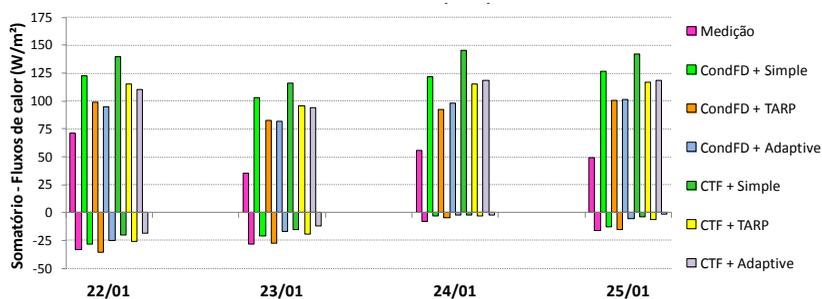


**Figura 5.43 – Somatórios diários dos fluxos de calor na parede Leste.**

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 5.44). 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 5.45) 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, visto que os resultados das simulações apresentaram desvios muito altos em relação às medições. Com relação à convecção, os algoritmos *TARP* e *Adaptive* apresentaram desvios menores do que aqueles correspondentes ao algoritmo *Simple*, porém estes desvios também foram altos, superiores ao dobro dos valores medidos.



**Figura 5.44 – Balanço térmico na superfície interna do piso da sala (dia 25/01).**



**Figura 5.45 – Somatórios diários dos fluxos de calor no piso da sala**

Os dados relativos ao balanço térmico das superfícies, obtidos a partir do monitoramento *in loco*, permitem identificar padrões de comportamento diferenciados quanto aos ganhos e perdas de calor em cada caso. Tais padrões podem ser reconhecidos ao se observar os somatórios diários dos fluxos de calor em cada superfície, onde se verificam tendências de comportamento que são mantidas em todos os dias do período analisado (22/01 a 25/01).

A parede Sul encontra-se bastante sombreada, característica capaz de minimizar os ganhos de calor solar, a sua condução através do componente e, por conseguinte, a transmissão de calor para o ambiente

interno (perdas de calor pela superfície, indicadas como fluxos positivos). Sob tais condições, as temperaturas superficiais internas tendem a ser minimizadas, favorecendo a absorção de calor do ar interno (ganhos de calor pela superfície, indicados como fluxos negativos). Desse modo, os somatórios diários dos ganhos de calor pela superfície variaram entre  $-55,66 \text{ W/m}^2$  e  $-95,01 \text{ W/m}^2$ , superando, em módulo, os somatórios das perdas de calor, que variaram entre  $41,42 \text{ W/m}^2$  e  $77,50 \text{ W/m}^2$  (vide Figura 5.41).

Na parede Leste, ocorre o inverso: a mesma apresenta-se menos sombreada do que a parede Sul, favorecendo a transmissão do calor por condução através deste componente e, por conseguinte, a elevação da sua temperatura superficial interna. Ou seja, as perdas de calor pela superfície para o ambiente interno são favorecidas (fluxos positivos). Os somatórios diários das perdas de calor na parede Leste variaram entre  $40,89 \text{ W/m}^2$  e  $84,25 \text{ W/m}^2$ , enquanto os somatórios diários dos ganhos de calor (absorção de calor pela superfície, indicadas como fluxos negativos) variaram entre  $-30,8 \text{ W/m}^2$  e  $-47,23 \text{ W/m}^2$  (vide Figura 5.43).

Por fim, no piso, destaca-se a predominância dos fluxos positivos, que correspondem à perda de calor pela superfície para o ar interno (vide Figura 5.45). Embora os dados analisados correspondam ao piso de outro ambiente, observou-se que a magnitude dos fluxos positivos registrados pelo fluxímetro instalado na sala de jantar, os quais variaram entre  $35,30 \text{ W/m}^2$  e  $71,57 \text{ W/m}^2$ , equivale às perdas de calor pelas superfícies das paredes Sul e Leste do quarto de casal. Tais resultados atestam a participação significativa do piso no balanço térmico do ambiente. Quanto aos fluxos negativos, indicativos da absorção de calor pelo piso, os valores obtidos foram mais baixos do que aqueles obtidos pelas paredes, variando entre  $-8,14 \text{ W/m}^2$  e  $-33,21 \text{ W/m}^2$ .

Quanto às simulações, os resultados do balanço térmico também permitem identificar padrões de comportamento semelhantes àqueles obtidos nas medições, quanto à predominância de ganhos ou perdas de calor em cada superfície. Entretanto, os resultados das simulações apresentaram desvios significativos em relação aos fluxos de calor medidos *in loco*, sendo que a magnitude destes desvios varia de acordo com a combinação de algoritmos de condução e convecção empregados.

Observou-se que o uso do algoritmo CTF apresentou os menores desvios dentre todos aqueles obtidos para as paredes, enquanto 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 8 modelos e os resultados foram avaliados utilizando-se os seguintes parâmetros: i) os desvios médios e erros quadráticos verificados em relação às temperaturas superficiais internas e temperatura do ar no interior do ambiente e ii) os somatórios de graus-hora de resfriamento verificados nas simulações, comparando-os aos resultados da medição.

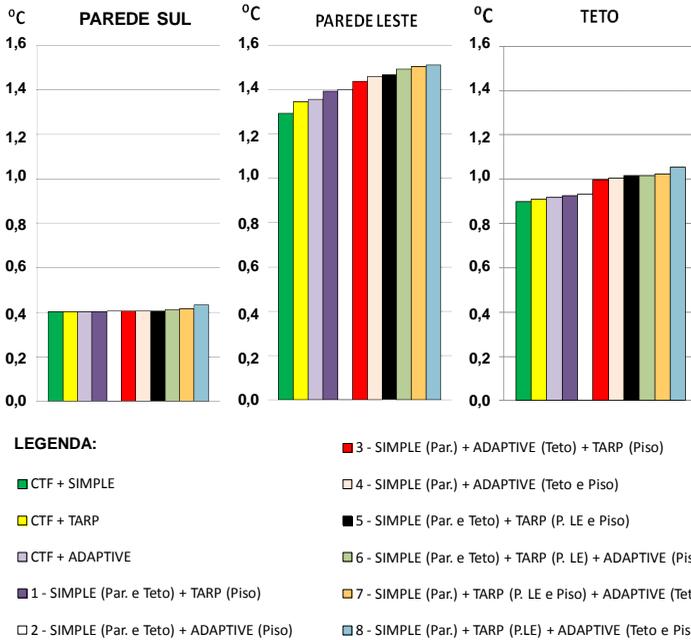
### **5.3.2 Temperaturas superficiais e do ar interno e somatório de graus-hora de resfriamento**

A comparação entre os resultados das simulações e as temperaturas superficiais e temperaturas do ar medidas *in loco* encontram-se ilustrados nas Figuras 5.46 e 5.47. Os valores indicados nos gráficos correspondem ao desvio médio calculado a partir dos dados obtidos no período de 22/01 a 25/01/2008, de acordo com a Equação 4.8 (ver item 4.2.2).

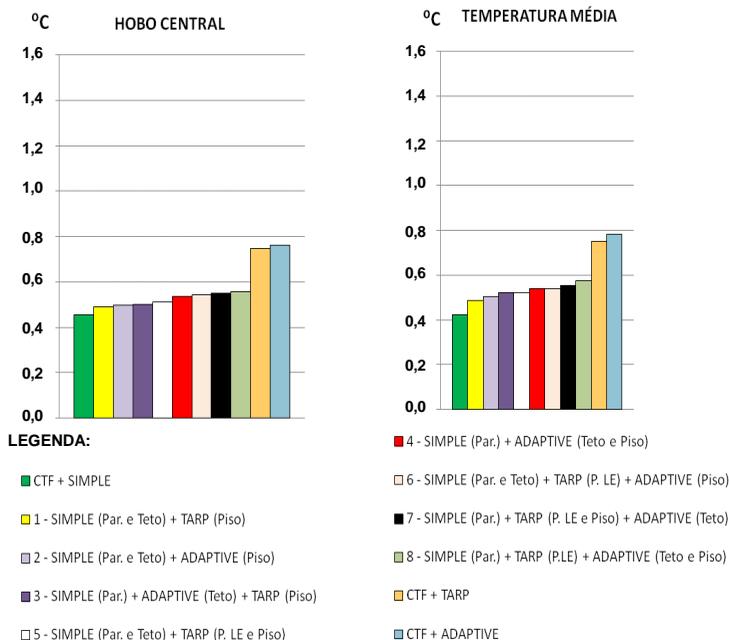
Essas simulações foram desenvolvidas com o algoritmo de condução CTF. Na Figura 5.47, são apresentados dois conjuntos de resultados: i) relativo à medição efetuada com o Hobo posicionado no centro do ambiente e ii) correspondente à temperatura média do ar interno, calculada a partir das temperaturas 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 5.46) 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 0,5 °C; 2,8 °C e 1,1°C, respectivamente, para a parede Sul, a parede Leste e o teto. No caso das temperaturas do ar, os modelos 7 e 8 apresentaram os maiores desvios dentre as novas

alternativas simuladas (0,7°C e 0,8°C), enquanto os desvios correspondentes aos demais modelos foram semelhantes e inferiores a 0,6°C. Também neste caso o modelo CTF + *Simple* apresentou os menores desvios.



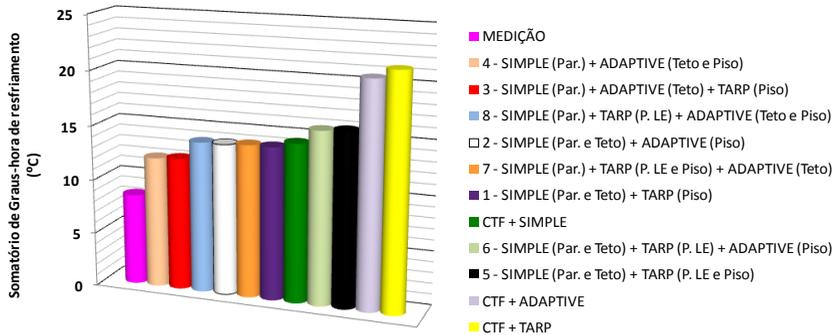
**Figura 5.46 – Desvios médios relativos às temperaturas superficiais internas (período: 22/01 a 25/01).**



**Figura 5.47 – Desvios médios relativos às temperaturas do ar interno (período: 22/01 a 25/01).**

Observando-se os somatórios de graus-hora de resfriamento, ilustrados na Figura 5.48, 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.

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), correspondente ao modelo 4, foi selecionada para as simulações do Modelo Base final, adotando-se o algoritmo CTF para o cálculo da condução.

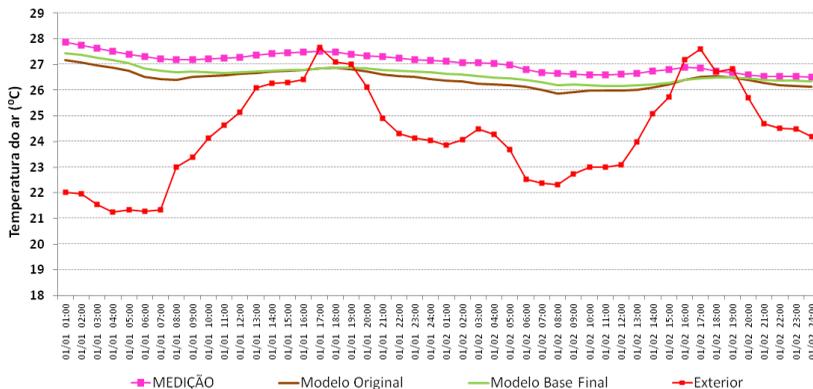


**Figura 5.48 – Somatórios de graus-hora de resfriamento, simulações com algoritmo CTF (período: 22/01 a 25/01).**

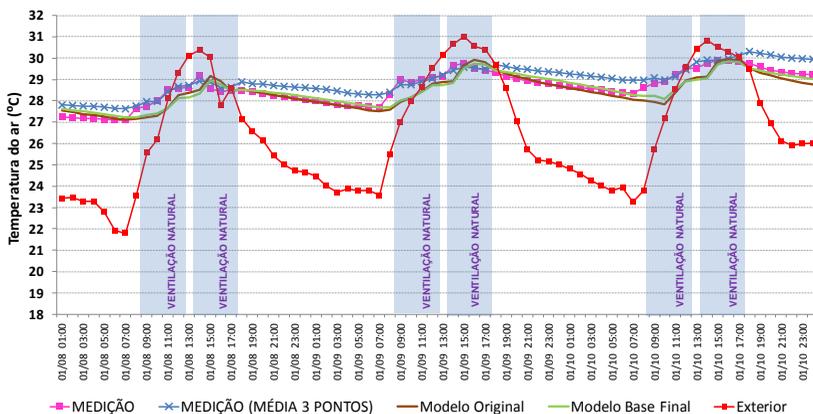
### 5.3.3 Comparação entre o modelo base inicial e o modelo base final

O Modelo Base final foi simulado para os mesmos períodos correspondentes às simulações realizadas durante a análise de sensibilidade, tendo sido submetido a diferentes condições de ventilação natural, empregando-se ou não a ventilação mecânica noturna.

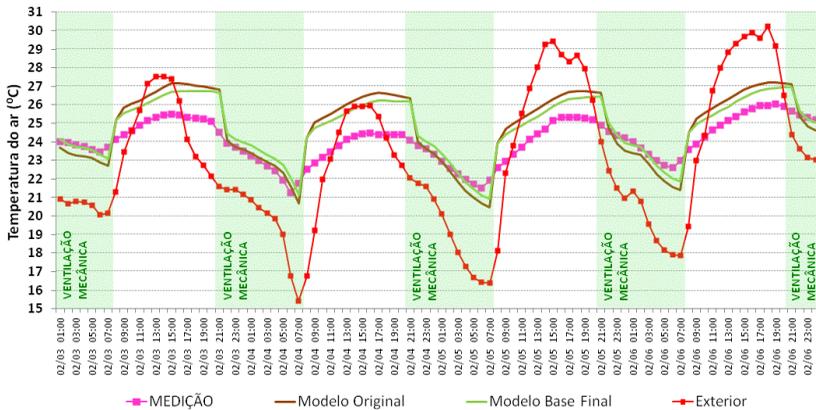
As Figuras 5.49 a 5.52 ilustram as temperaturas do ar externo e as temperaturas internas, medidas e simuladas com os modelos originais e com o Modelo Base final, nos quatro períodos de análise. Os dados de temperatura do ar interno, série “MEDIÇÃO”, presente em todos os gráficos, correspondem às medições realizadas no centro do ambiente com o sensor HOBO U12. Nas figuras 5.50 e 5.52 estão indicados também dados correspondentes à temperatura média do ar interno, série MEDIÇÃO (MÉDIA 3 PONTOS). Estes dados correspondem aos valores médios calculados a partir das temperaturas registradas em quatro pontos distintos: no centro do ambiente (sensor HOBO U12) e próximo às paredes Sul, Leste e teto (efetuadas com termopares tipo T-AWG26). O cálculo da temperatura média foi efetuado apenas para os períodos de 08/01 a 10/01 e 22/01 a 25/01, porque estes foram os únicos períodos nos quais haviam registros de temperatura obtidos próximos às paredes e ao teto.



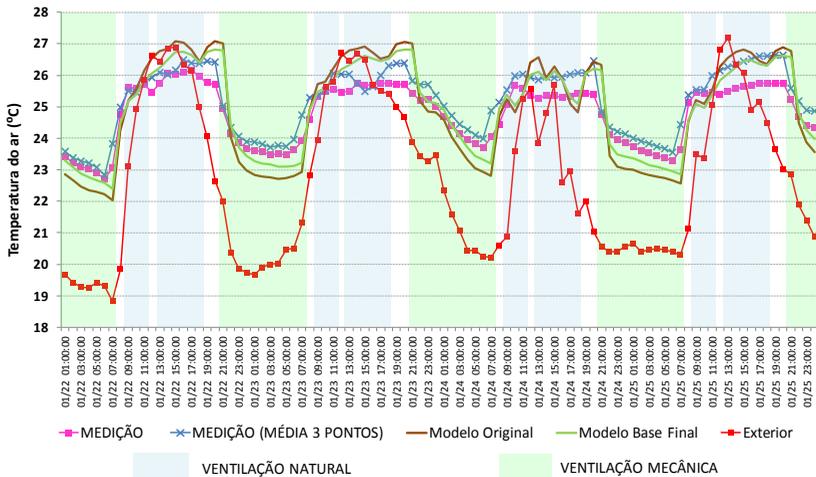
**Figura 5.49 – Temperaturas do ar medidas e simuladas: dias 01 e 02 de janeiro.**



**Figura 5.50 – Temperaturas do ar medidas e simuladas: dias 08 a 10 de janeiro.**



**Figura 5.51 – Temperaturas do ar medidas e simuladas: dias 03 a 06 de fevereiro.**



**Figura 5.52 – Temperaturas do ar medidas e simuladas: dias 22 a 25/01.**

De acordo com os gráficos ilustrados acima, observa-se que há pouca diferença quanto à variação das temperaturas obtidas pelo Modelo Original e pelo Modelo Base Final, embora as simulações deste último apresentem menores desvios em relação aos resultados das medições. Entretanto, a diferença entre os modelos se torna significativa quando os somatórios de graus-hora de resfriamento quantificados em ambos os

casos são comparados com os somatórios quantificados a partir das medições.

Na Tabela 5.6 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 os modelos originais e o Modelo Base final. Todos os dados utilizados nestas 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.

**Tabela 5.6 – Resultados das simulações: Modelos Originais x Modelo base final.**

No.	Período/ descrição	Modelos Originais			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)	
1	<b>01 e 02/01</b> Sem ventilação (natural e mecânica)	0,6	0,6	21,8	0,4	0,5	29,7	51,0
2	<b>08 a 10/01</b> Ventilação natural diurna (9h – 12h e 14h – 17h)	0,3	0,4	174,7	0,3	0,4	180,5	188,7*
3	<b>03 a 06/02</b> Ventilação mecânica (21h – 7h)	1,1	1,3	26,4	0,9	1,0	14,9	0,0
4	<b>22 a 25/01</b> 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**

\* e \*\* Valores correspondentes à temperatura média interna (medições em 4 pontos distintos): \* $\Sigma^{\circ}\text{h}$  (R) = 215,5°C e \*\*  $\Sigma^{\circ}\text{h}$  (R) = 8,4°C.

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 Base Final, levou à redução dos desvios da temperatura do ar. Nas simulações originais, os desvios variam entre 0,3°C e 1,1°C. Com o Modelo Base Final, os desvios variam entre 0,3°C e 0,9°C. Considerando-se que a resolução do sensor utilizado para a medição da temperatura do ar interno (Hobo U12) é igual a  $\pm 0,35^\circ\text{C}$ , o processo de calibração do modelo computacional é considerado bem sucedido, de modo que o Modelo Base Final representa o modelo calibrado.

Além disso, as diferenças dos somatórios de graus-hora de resfriamento das novas simulações em relação às medições foram reduzidas quando comparadas 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.

### 5.3.4 Estimativa dos coeficientes de convecção forçada

A análise do balanço térmico das superfícies internas possibilitou identificar critérios para a seleção da combinação de algoritmos de condução e convecção utilizada nas simulações do ambiente em estudo. Tal seleção foi efetuada considerando-se os desvios dos resultados das simulações em relação às medições *in loco*, sob diferentes condições de ventilação. O Modelo Base Final obteve os menores desvios, configurando-se como o modelo calibrado.

Entretanto, convém destacar que a calibração de simulações computacionais envolve parâmetros que não estão incluídos 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 no programa EnergyPlus v.6.0.

Considerando-se tais limitações, foram estimados os coeficientes de convecção forçada ( $h_{\text{FORÇADA}}$ ) a partir de dados do monitoramento *in loco* registrados no interior do ambiente. Para tal, foram efetuadas medições da velocidade do ar durante o acionamento dos insufladores, simulando as condições de aplicação da ventilação mecânica noturna. A Figura 5.53 apresenta as velocidades do ar (indicadas em vermelho), registradas nos 15 pontos de medição dispostos no ambiente.

Foram calculadas as velocidades médias correspondentes aos valores medidos nos pontos dispostos junto às paredes Sul e Leste, tendo sido obtidos os valores 0,33 m/s e 0,18 m/s, respectivamente (Figura 5.54). Considerando-se tais velocidades, sob convecção forçada, o coeficiente de convecção médio calculado para a parede Sul foi  $h_{\text{FORÇADA}} = 1,02 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ . Para a parede Leste, o valor calculado foi  $h_{\text{FORÇADA}} = 0,69 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ . A planilha utilizada para o cálculo dos coeficientes de convecção forçada encontra-se no Apêndice III, ao final deste documento.

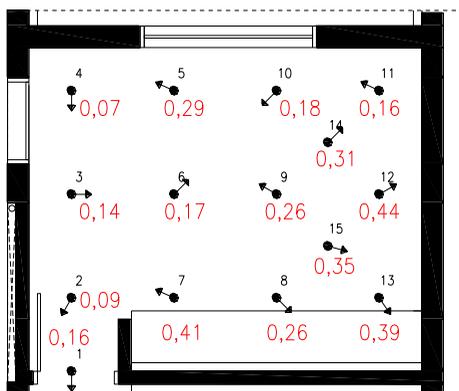


Figura 5.54 – Velocidades do ar no interior do ambiente (m/s).

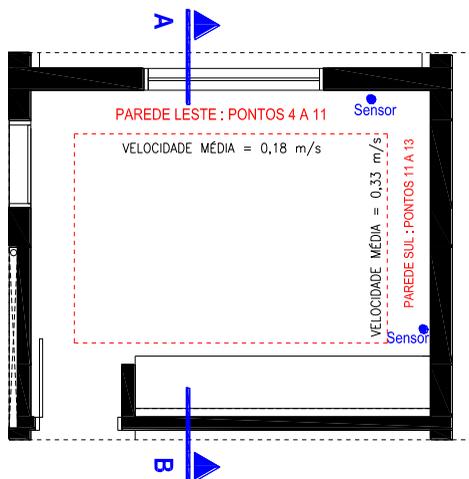
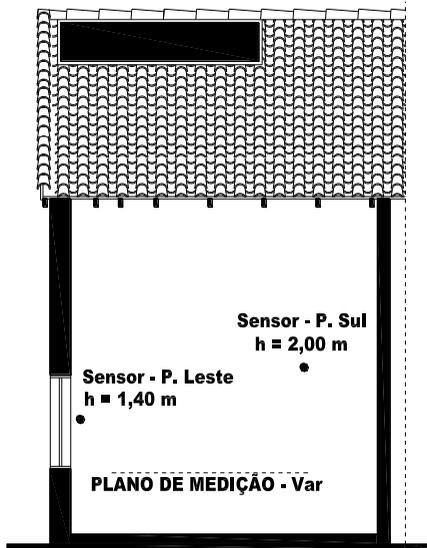


Figura 5.55 – Velocidades médias junto às paredes Sul e Leste.

Estes valores de  $h_{\text{FORÇADA}}$  foram comparados aos coeficientes calculados pelo *software* EnergyPlus, de acordo com os três algoritmos testados: *Simple*, *TARP* e *Adaptive*, em função dos diferenciais de temperatura verificados entre as paredes e o ar no interior do ambiente.

A Figura 5.56 ilustra o corte AB do quarto de casal, indicando-se a localização dos sensores responsáveis pelo registro das temperaturas das superfícies internas e do ar. De acordo com as medições *in loco*, no período de 22/01 a 25/01, durante os horários de emprego da ventilação mecânica (21h às 7h), os diferenciais de temperatura verificados na parede Sul ( $\Delta T_{\text{MEDIÇÃO}} = T_{\text{superfície}} - T_{\text{ar}}$ ) variaram entre 0,22°C e 0,34°C. Na parede Leste, os diferenciais verificados variaram entre 0,12°C e 0,69°C. De posse desses valores, os coeficientes de convecção foram calculados a partir das equações 4.11 e 4.12 (ver item 4.2.3)<sup>38</sup>, a fim de serem comparados aos coeficientes de convecção forçada calculados a partir das medições *in loco*, conforme procedimentos indicados no item 4.1 (equações 4.4, 4.5 e 4.6).



**Figura 5.56 – Corte transversal do quarto de casal e posicionamento dos sensores.**

<sup>38</sup> Não foi possível obter os coeficientes de convecção forçada diretamente das medições *in loco*, com base nos fluxos de calor, porque os registros efetuados pelos fluxímetros correspondem às trocas térmicas realizadas por convecção e radiação de forma integrada.

As Tabelas 5.7 e 5.8 indicam os coeficientes de convecção forçada estimados e os coeficientes calculados utilizando as equações algoritmos *TARP* ( $h_{TARP}$ ) e *Adaptive* ( $h_{ADAPTIVE}$ ), assim como o valor de  $h_{SIMPLE}$ . Os diferenciais de temperatura ( $\Delta T_{MEDIC\tilde{A}O}$ ) indicados nas tabelas foram estabelecidos de acordo com a variação observada durante o monitoramento, considerando-se intervalos de  $0,1^{\circ}\text{C}$ .

Embora o Modelo Base Final empregue o algoritmo *Simple* para o cálculo da convecção nas paredes, observa-se que os coeficientes de convecção calculados pelos algoritmos *TARP* e *Adaptive* apresentariam valores mais próximos daqueles estimados para a convecção forçada.

**Tabela 5.7 – Comparação entre os coeficientes de convecção calculados para a parede Sul.**

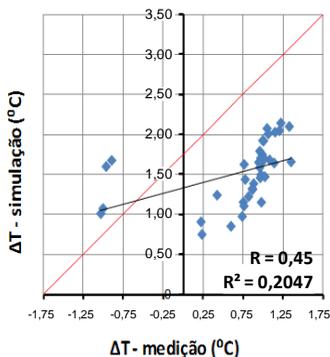
$\Delta T_{MEDIC\tilde{A}O}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	Coeficientes de convecção ( $\text{W}/\text{m}^2.\text{K}$ )				Melhor ajuste com $h_{FOR\tilde{C}ADA}$
	$h_{SIMPLE}$	$h_{TARP}$	$h_{ADAPTIVE}$	$h_{FOR\tilde{C}ADA}$ ( $\text{Var} = 0,33$ $\text{m/s}$ )	
0,2	3,076	0,766	0,962	1,02	<i>Adaptive</i>
0,3	3,076	0,877	1,094	1,02	<i>Adaptive</i>
0,4	3,076	0,965	1,198	1,02	<i>TARP</i>

**Tabela 5.8 – Comparação entre os coeficientes de convecção calculados para a parede Leste.**

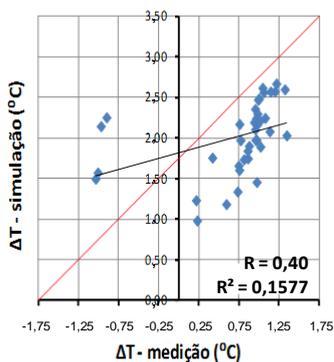
$\Delta T_{MEDIC\tilde{A}O}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	Coeficientes de convecção ( $\text{W}/\text{m}^2.\text{K}$ )					Melhor ajuste com $h_{FOR\tilde{C}ADA}$
	$h_{SIMPLE}$	$h_{TARP}$	$h_{ADAPTIVE}$ ( $H = 3,22$ $\text{m}$ )	$h_{ADAPTIVE}$ ( $H = 5,55$ $\text{m}$ )	$h_{FOR\tilde{C}ADA}$ ( $\text{Var} =$ $0,18 \text{ m/s}$ )	
0,1	3,076	0,608	0,693	0,773	0,69	<i>Adaptive</i>
0,2	3,076	0,766	0,863	0,962	0,69	<i>TARP</i>
0,4	3,076	0,965	1,075	1,198	0,69	<i>TARP</i>
0,6	3,076	1,105	1,221	1,362	0,69	<i>TARP</i>
0,7	3,076	1,163	1,282	1,430	0,69	<i>TARP</i>

Entretanto, ambos os coeficientes estimados pelos algoritmos *TARP* e *Adaptive* variam em função do gradiente  $\Delta T$ . Uma vez que há desvios na estimativa do  $\Delta T$  pelo modelo de rede, pelo fato de não ser considerada a estratificação da temperatura do ar interno, os fluxos de calor estimados a partir dos algoritmos mencionados apresentam maiores desvios do que aqueles estimados com o uso do algoritmo *Simple* (constante). Os gráficos das Figuras 5.57 e 5.58 indicam a correlação entre os gradientes de temperatura simulados para diferentes combinações de algoritmos e os valores obtidos a partir das medições *in loco*. Para a combinação de algoritmos empregada no Modelo Base Final (Figura 5.57-a e Figura 5.58-a) foram obtidos os maiores coeficientes de correlação e determinação dentre as alternativas simuladas. Entretanto, em todos os casos a correlação é baixa ( $R < 0,6$  e  $R^2 < 1$ ).

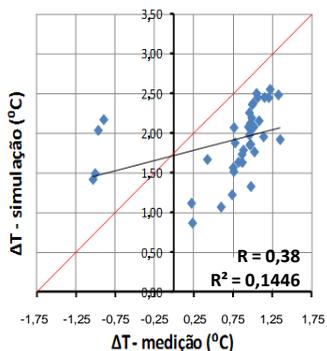
Apesar da baixa correlação entre os diferenciais de temperatura medidos *in loco* e aqueles obtidos nas simulações do Modelo Base Final, pode-se afirmar que os resultados das simulações apresentaram-se bastante sensíveis às alterações dos coeficientes de convecção das superfícies internas. Isto foi evidenciado pelas distinções nos somatórios de graus-hora de resfriamento do ambiente, apresentadas no item 5.3.2. Os resultados ora apresentados demonstram o impacto que a seleção dos algoritmos de condução e convecção produz nos resultados das simulações, ressaltando a importância da calibração para a construção de modelos computacionais mais coerentes, a serem utilizados na avaliação do desempenho térmico de edificações. Destaca-se também que, mesmo com a calibração, as simulações computacionais apresentam incertezas, de modo que seus resultados devem ser considerados com cautela quando da prescrição de metas de desempenho térmico para as edificações.



a) Modelo Base Final: *Simple* (paredes) + *Adaptive* (teto e piso).

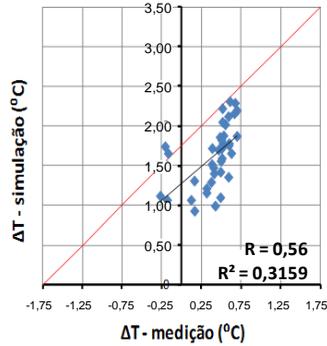


b) *TARP* (todas as superfícies).

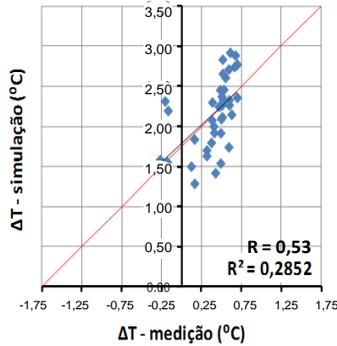


c) *Adaptive* (todas as superfícies).

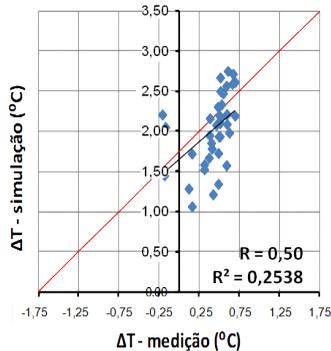
Figura 5.57 – Correlação entre os diferenciais de temperatura da parede Sul, medidos e simulados, sob o emprego da ventilação mecânica (intervalo 21h às 7h).



a) Modelo Base Final: *Simple* (paredes) + *Adaptive* (teto e piso).



b) *TARP* (todas as superfícies).



c) *Adaptive* (todas as superfícies).

**Figura 5.58 – Correlação entre os diferenciais de temperatura da parede Leste, medidos e simulados, sob o emprego da ventilação mecânica (intervalo 21h às 7h).**

#### 5.4 AVALIAÇÃO DA EFICÁCIA DA VENTILAÇÃO DA NOTURNA COMO ESTRATÉGIA DE CONDICIONAMENTO APLICÁVEL A AMBIENTES RESIDENCIAIS NO VERÃO.

Neste tópico são apresentados os resultados obtidos a partir da investigação do efeito da ventilação natural diurna e da ventilação mecânica noturna, associadas a configurações construtivas com inércia baixa e com inércia média, no desempenho térmico do quarto de casal. Para tal, foram desenvolvidas simulações computacionais compreendendo os meses de dezembro a março, com o *software* EnergyPlus v. 6.0. Estes meses foram escolhidos para análise por se tratarem dos meses mais quentes do ano.

O Modelo Base Final obtido ao final da calibração do modelo computacional da Casa Eficiente foi adaptado para o desenvolvimento das análises. As características das vedações externas, abertura e proteção solar, padrões de ventilação, de iluminação, de uso de equipamentos e de ocupação do quarto de casal foram configurados de acordo com as características estabelecidas no item 4.3, tendo sido desenvolvidas 32 simulações no total.

Os balanços térmicos internos foram caracterizados, a partir das trocas de calor por convecção entre as superfícies internas e o ar da zona, as trocas de ar internas (com os demais ambientes da edificação) e as trocas proporcionadas pela infiltração do ar externo. Foram quantificados os fluxos de calor correspondentes a todos os componentes, para quatro intervalos horários distintos: 7h às 13h; 13h às 18h; 18h às 21h e 21h às 7h. Para cada intervalo, os fluxos de calor relativos a cada componente do balanço térmico foram somados, caracterizando o papel dos mesmos quanto aos ganhos ou perdas de calor no interior do ambiente.

Também foram quantificados os somatórios de graus-hora de resfriamento e os percentuais de horas de desconforto correspondentes a cada um dos quatro intervalos mencionados, a fim de qualificar o desempenho do ambiente sob o ponto de vista do conforto térmico. Os graus-hora de resfriamento foram calculados de acordo com os valores horários da temperatura operativa obtidos nas simulações, em função de uma temperatura base igual a 26<sup>0</sup>C. Os percentuais de horas de desconforto contidos em cada intervalo foram quantificados em função dos limites de aceitabilidade da temperatura operativa de conforto. Estes limites foram calculados considerando-se a temperatura média mensal do período considerado (dezembro a março), que é igual a 23,9<sup>0</sup>C. De

acordo com a abordagem adaptativa de conforto empregada pela ASHRAE Standard 55 (2004), os limites de 90% e 80% de aceitabilidade correspondem às temperaturas operativas iguais a 27,7°C e 28,7 °C, respectivamente. Portanto, os percentuais de horas de desconforto correspondem às horas nas quais a temperatura operativa excedeu estes limites.

Com base nesses resultados, foi possível observar a influência da ventilação natural no comportamento de cada componente envolvido no balanço térmico, bem como observar alterações nesse comportamento, decorrentes do emprego da ventilação mecânica noturna.

#### **5.4.1 Impacto das estratégias de ventilação no desempenho térmico do ambiente**

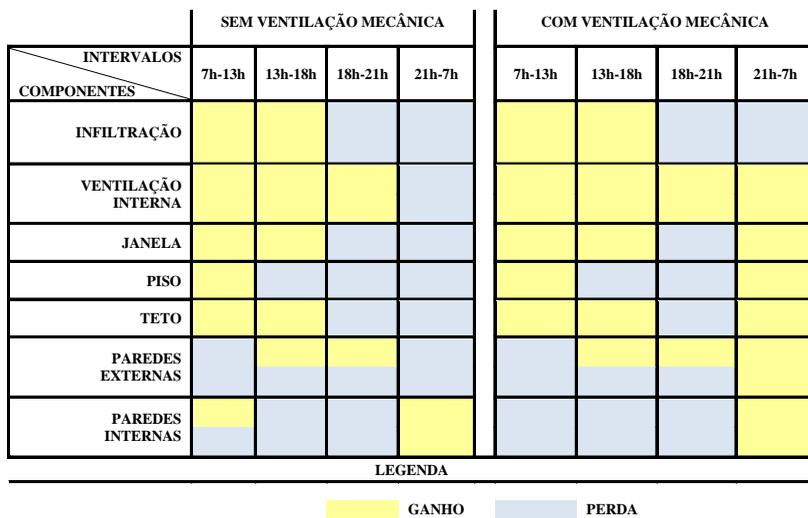
Neste tópico, os balanços térmicos obtidos nas simulações são analisados comparativamente, demonstrando-se o efeito das diferentes estratégias de ventilação empregadas no desempenho térmico do ambiente, quando este é caracterizado por inércia térmica baixa ou inércia térmica média.

As Figuras 5.59 e 5.60 ilustram de modo esquemático os balanços térmicos dos ambientes configurados com inércia baixa e inércia média, respectivamente<sup>39</sup>. São caracterizadas duas condições: sem ventilação mecânica noturna e com ventilação mecânica noturna. A ocorrência de ganhos é destacada em amarelo e as perdas de calor em azul. A cor verde indica a ocorrência de perdas através do componente quando o ambiente é ventilado no intervalo considerado. Os ganhos e perdas aqui indicados são referentes às trocas térmicas por convecção que ocorrem entre cada componente e o ar no interior do ambiente. Portanto, indicam se o componente está acrescentando calor ao ar interno durante o balanço térmico (fluxos positivos) ou absorvendo calor (fluxos negativos)<sup>40</sup>.

---

<sup>39</sup> Os esquemas indicados nas figuras 5.49 e 5.50 foram elaborados com base nos resultados de todos os modelos simulados: 16 simulações para cada configuração, totalizando-se 32 simulações. Estas figuras indicam as tendências de comportamento dos fluxos de calor para cada modelo, sendo que a análise quantitativa dos balanços térmicos referentes a cada intervalo é apresentada nos tópicos 5.4.1.1 a 5.4.1.4.

<sup>40</sup> Convém destacar que neste tópico é abordado o balanço térmico do ambiente, envolvendo unicamente as trocas de calor por convecção entre o ar e os componentes que participam deste processo: envoltória, infiltração de ar externo, trocas de ar entre ambientes e ganhos internos, advindos de pessoas, equipamentos e iluminação. A convenção adotada para designar o sinal dos fluxos de calor neste caso difere da convenção empregada no tópico 5.3 deste trabalho, a qual se refere ao balanço térmico das superfícies.



**Figura 5.59 – Balanço térmico, modelo com inércia baixa.**



**Figura 5.60 – Balanço térmico, modelo com inércia média.**

Com relação ao impacto da ventilação mecânica em ambas as configurações construtivas (inércia baixa e inércia média), destaca-se a alteração do balanço térmico no intervalo de 21h às 7h. Sem ventilação

mecânica, os componentes da envoltória são responsáveis por perdas de calor neste intervalo, ou seja, absorvem calor do ar interno. Quando a ventilação mecânica é empregada, todos os componentes da envoltória e a ventilação interna (trocas térmicas com os demais ambientes) passam a representar ganhos de calor. Isto indica que a infiltração do ar externo à noite está promovendo a remoção do calor acumulado na envoltória, visto que a mesma passa a transmitir calor para o ambiente interno. Observa-se também que o efeito da ventilação mecânica noturna afeta o balanço térmico do ambiente no intervalo seguinte (7h às 13h), principalmente no modelo com inércia média, alterando o papel dos componentes do balanço térmico, quanto à ocorrência de ganhos ou perdas de calor.

A seguir, a análise dos balanços térmicos em cada intervalo horário será abordada separadamente, buscando-se identificar a relação entre esses balanços e os somatórios de graus-hora de resfriamento e os percentuais de horas de desconforto por calor obtidos no interior do ambiente em cada caso.

#### 5.4.1.1 Balanço térmico no intervalo de 7h às 13h

A Figura 5.61 ilustra esquematicamente o papel de cada componente do balanço térmico quanto aos ganhos e perdas de calor para o ar interno no intervalo considerado, nos modelos que empregam a ventilação mecânica noturna (taxa de renovação de ar igual a 10 renovações por hora). De acordo com esses esquemas, é possível identificar particularidades do balanço térmico do modelo com inércia baixa e do modelo com inércia média.

Na Figura 5.62 estão quantificados os fluxos de calor, em kW, correspondentes a todos os componentes do balanço térmico do ambiente, sob ambas as configurações de inércia. Com relação aos componentes da envoltória, convém salientar que os fluxos de calor indicados nos gráficos são proporcionais à área de cada superfície<sup>41</sup>. No caso das paredes, os fluxos foram contabilizados separadamente para as paredes internas (incluindo a porta interna) e para as paredes externas. A área total de paredes internas é igual a 25,3 m<sup>2</sup>, enquanto as paredes

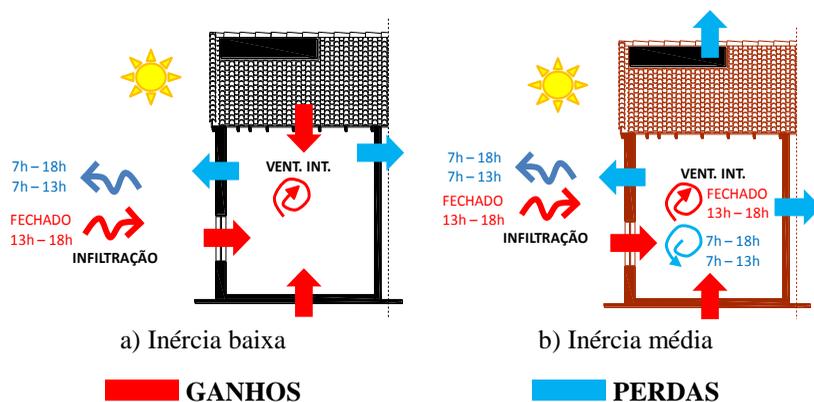
---

<sup>41</sup> Nas análises do balanço térmico ora desenvolvidas, os fluxos de calor foram quantificados em kW. Ou seja, representam os fluxos de calor correspondentes à área total das superfícies. No item 5.3.1 os ganhos e perdas de calor relacionados aos componentes da envoltória foram quantificados em W/m<sup>2</sup>, representando, pois, a densidade de fluxo de calor em cada superfície. Desse modo, não há correspondência direta entre os fluxos quantificados no item 5.3.1 para as paredes e o piso e os gráficos ilustrados nas figuras apresentadas neste capítulo.

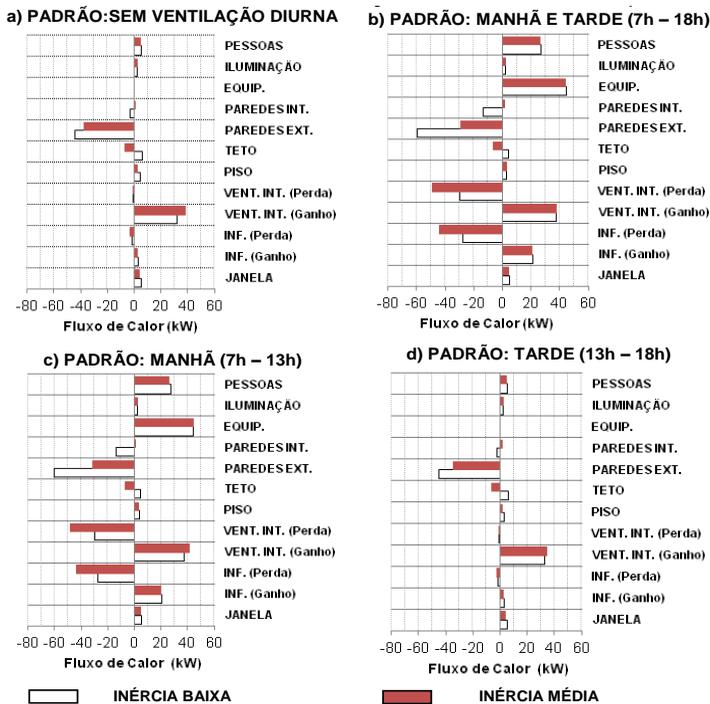
externas possuem área total igual a  $46,2 \text{ m}^2$ . A janela é o componente com a menor área superficial:  $1,4 \text{ m}^2$ , destacando-se que a mesma encontra-se sombreada por um brise externo, que assegura proteção solar total a partir das 9h da manhã. Já as áreas correspondentes ao teto e ao piso são iguais a  $19,2 \text{ m}^2$  e  $17,2 \text{ m}^2$ , respectivamente.

Outro aspecto que interfere no balanço térmico do ambiente é a diferença nos seus padrões de ocupação, assim como nos padrões de uso dos equipamentos e do sistema de iluminação. Uma vez que os ambientes foram ventilados sempre que ocupados, os fluxos de calor correspondentes à ocupação, ao uso da iluminação e dos equipamentos, relacionados com os diferentes padrões de ventilação diurna simulados, são distintos entre si.

Na Figura 5.62, há um gráfico representativo dos fluxos de calor para cada padrão de ventilação diurna aplicado: a) sem ventilação diurna; b) manhã e tarde (7h - 18h); c) manhã (7h - 13h) e d) ventilação tarde (13h - 18h). Nesses gráficos, os fluxos de calor foram contabilizados apenas para o intervalo compreendido entre as 7h e 13h (6 horas diárias), em todos os dias do período de análise, que compreende os meses de dezembro a março (121 dias). Portanto, os ganhos (fluxos positivos) e as perdas (fluxos negativos) verificados no intervalo das 7h às 13h nesses 121 dias foram somados, de modo que os valores indicados nos gráficos referem-se a períodos com duração total de 726 h.



**Figura 5.61 – Comportamento dos fluxos de calor no intervalo de 7h-13h, modelos ventilados à noite (10 renovações/h), (meses de dezembro a março).**

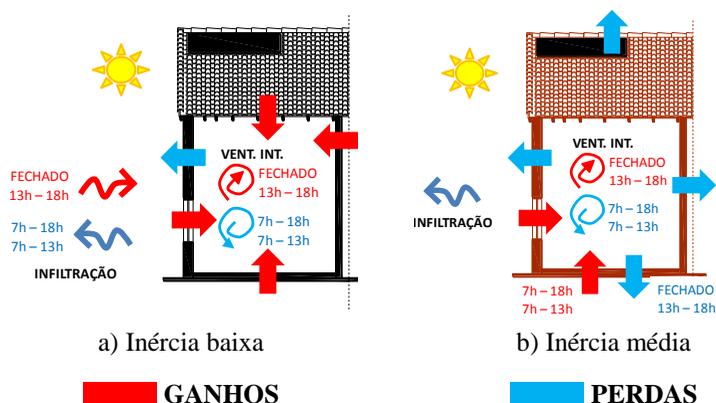


**Figura 5.62 – Balanços térmicos do ambiente no intervalo de 7h-13h, modelos ventilados à noite (10 renovações/h), sob diferentes padrões de ventilação diurna, nos meses de dezembro a março.**

Com relação aos resultados apresentados nas Figuras 5.61 e 5.62 para o modelo com inércia baixa, as trocas de ar com os demais ambientes internos (ventilação interna) são responsáveis por ganhos de calor no intervalo considerado. Nos modelos sem ventilação diurna, esses ganhos assumem uma magnitude proporcional às trocas de calor através das paredes externas. Também ocorre transmissão de calor pelo teto, piso e janela. As paredes internas e externas absorvem calor. O emprego da ventilação natural entre 7h e 13h intensifica as trocas por infiltração, favorecendo tanto os ganhos quanto as perdas de calor. Além disso, com a ventilação diurna, ocorre maior absorção de calor pelas paredes internas. No caso dos modelos que não empregam a ventilação mecânica (ver Apêndice IV-A e Figura 5.63-a), observou-se que há alteração no papel da ventilação interna. Neste caso, a ventilação interna promove perdas de calor nos modelos ventilados pela manhã e ganhos

de calor quando o ambiente é mantido sem ventilação o dia inteiro ou ventilado apenas à tarde.

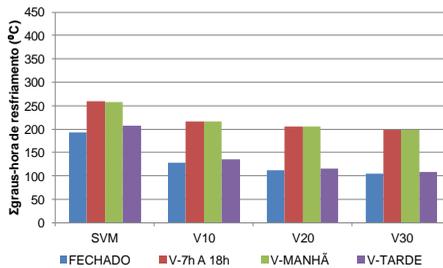
No caso dos modelos com inércia média, com exceção do teto, os demais componentes mantêm o mesmo papel quanto aos ganhos e perdas de calor neste intervalo. No caso do teto, este passa a ser responsável por perdas de calor. O papel da ventilação diurna também se mantém, promovendo perdas de calor, caso empregada nesses horários. Para os modelos que não empregam a ventilação mecânica (Figura 5.63-b), ocorrem alterações no balanço térmico quanto ao piso e a infiltração. Nesses casos, o piso passa a ser responsável por ganhos de calor quando o ambiente é ventilado pela manhã. Já a infiltração representa perda de calor sob todas as condições de ventilação diurna (ver Apêndice IV-A e Figura 5.63-b).



**Figura 5.63 – Comportamento dos fluxos de calor no intervalo de 7h-13h, modelos não ventilados à noite (meses de dezembro a março).**

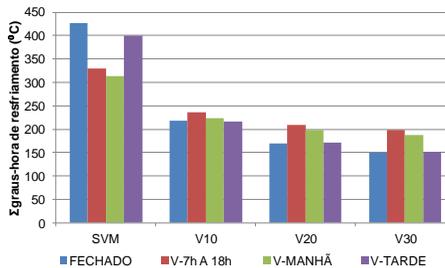
No Apêndice IV-A encontram-se os resultados dos balanços térmicos dos modelos com maiores taxas de renovação de ar proporcionadas pela ventilação mecânica noturna (20 renovações/hora e 30 renovações/hora). O aumento da vazão do insuflamento no período noturno, ao promover uma maior remoção de calor da envoltória, resulta em uma menor carga térmica a ser removida pela infiltração durante a manhã. Observou-se também que nos modelos com inércia média que são ventilados pela manhã as paredes internas passam a absorver calor. Isto indica uma redução das temperaturas superficiais em relação à temperatura do ar interno. Ou seja, nesse caso as superfícies foram resfriadas de modo mais eficiente no período noturno.

Com relação aos parâmetros de conforto, a Figura 5.64 ilustra os somatórios de graus-hora de resfriamento do ambiente no intervalo de 7h às 13h, para todas as configurações simuladas, calculados em função de uma temperatura base igual a 26°C. Os modelos com inércia média apresentam os maiores somatórios, exceto quando a ventilação mecânica é empregada com taxas de renovações maiores (20 e 30 renovações por hora) e a ventilação natural é empregada pela manhã. O emprego da ventilação pela manhã resulta em maiores somatórios, sendo que no modelo com inércia média há pouca distinção em relação aos demais padrões de ventilação diurna empregados. Destaca-se ainda a influência da ventilação mecânica no modelo com inércia média, promovendo a redução dos somatórios em mais da metade nos modelos que não foram ventilados à tarde ou mantidos fechados.



Vazões e padrões de ventilação diurna

a) Inércia baixa

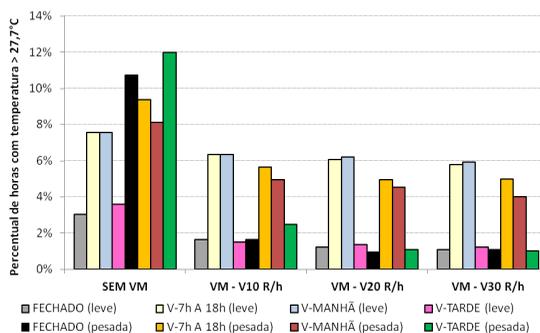


Vazões e padrões de ventilação diurna

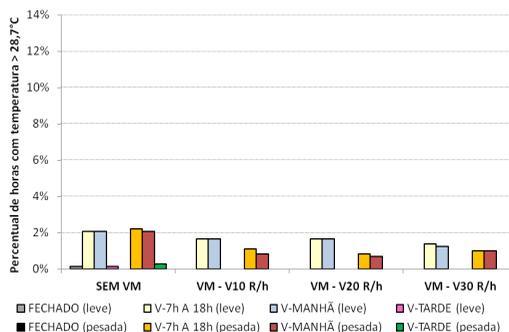
b) Inércia média

**Figura 5.64 – Somatórios de graus-hora de resfriamento,  $T_{base} = 26^{\circ}C$  (intervalo: 7h – 13h).**

Quanto aos percentuais de horas de desconforto por calor verificados no intervalo de 7h às 13h, foram baixos para os modelos com inércias baixa e média quando se considera o limite de 80% de aceitabilidade, que corresponde a temperatura operativa de conforto igual a 28,7°C. Neste caso, o percentual de horas de desconforto foi, no máximo, igual a 2% (Figura 5.65-b). Considerando-se o limite de 90% de aceitabilidade (temperatura operativa de conforto igual a 27,7°C), o modelo com inércia média apresentou até 12% de horas de desconforto para os modelos sem ventilação mecânica e até 6% nos modelos que empregavam esta estratégia. No caso do modelo com inércia baixa, estes percentuais variaram de acordo com as condições de ventilação diurna, variando entre 6% e 8% nos modelos ventilados nesses horários e entre 1% e 4% nos demais casos (Figura 5.65-a).



a) 90% de aceitabilidade



b) 80% de aceitabilidade

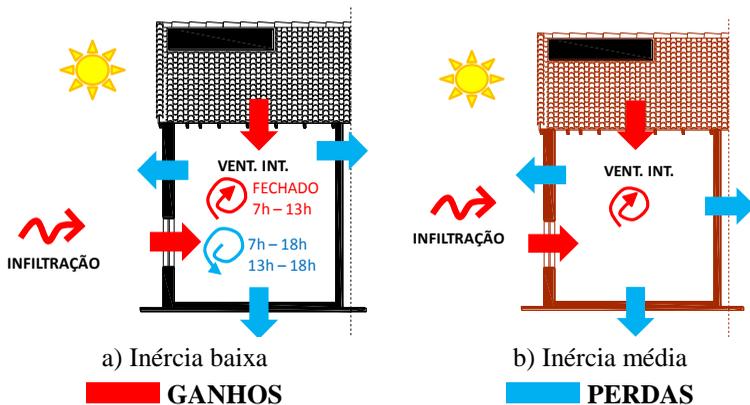
**Figura 5.65 – Percentuais de horas de desconforto verificados no intervalo de 7h às 13h.**

#### 5.4.1.2 Balanço térmico no intervalo de 13h às 18h

As Figuras 5.66 e 5.67 indicam os resultados das simulações do balanço térmico dos ambientes no intervalo das 13h às 18h.

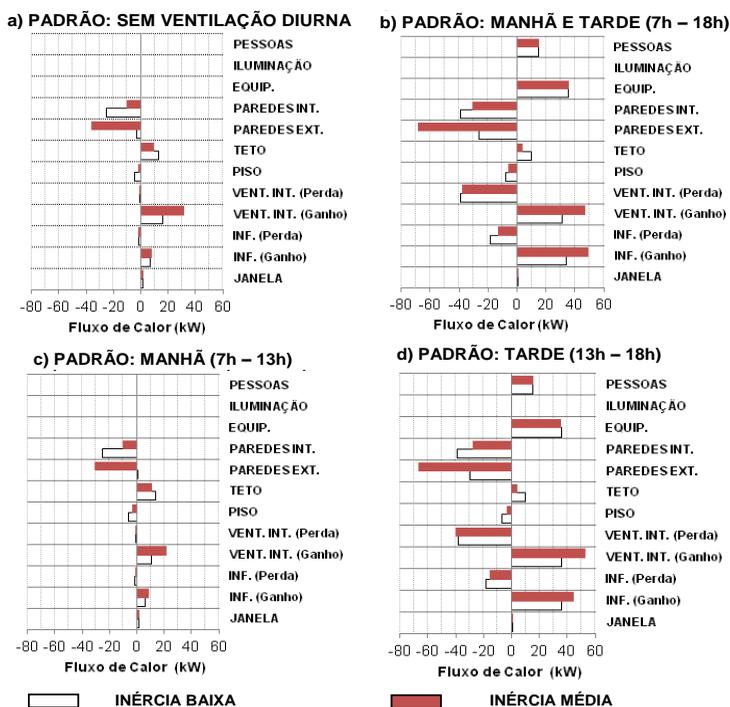
No período da tarde o balanço térmico dos modelos com inércia baixa e inércia alta é semelhante quanto ao comportamento dos fluxos de calor, distinguindo-se apenas o papel da ventilação interna (Figura 5.66). No modelo com inércia média, a ventilação interna é responsável por ganhos de calor sob todas as condições de ventilação. Já no modelo com inércia baixa, quando a ventilação natural é empregada durante a tarde, a ventilação interna se torna responsável por perdas de calor.

Neste intervalo, o piso absorve calor, assim como as paredes. As janelas representam ganhos de calor. O emprego da ventilação natural durante a tarde incrementa os ganhos de calor e, por conseguinte, as parcelas de calor absorvido pelas paredes. Observou-se também que os ganhos de calor advindos do teto sofrem uma redução quando a ventilação natural é empregada, indicando que a temperatura do ar interno se aproxima da sua temperatura superficial nessas situações. Ou seja, os modelos ventilados nesses horários apresentam maior temperatura interna.



**Figura 5.66 – Comportamento dos fluxos de calor no intervalo de 13h-18h, modelos ventilados à noite (10 renovações/h), (meses de dezembro a março).**

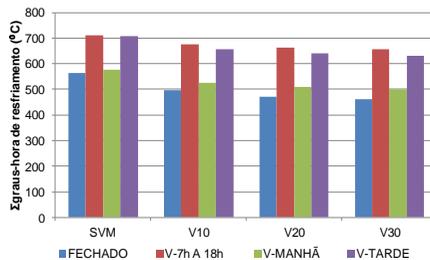
Os fluxos de calor quantificados nos gráficos da Figura 5.67, correspondentes a cada padrão de ventilação diurna, representam os somatórios de ganhos e perdas de calor, obtidos para um total de 605 h, relacionados a cada componente do balanço térmico (intervalo de 5h diárias, 121 dias de análise, compreendendo os meses de dezembro a março). Todos os resultados indicados na Figura 5.67 referem-se aos modelos que empregam ventilação mecânica noturna, com taxa de renovação de ar igual a 10 renovações/hora. Assim como no intervalo das 7h às 13h, também neste intervalo há diferenças quanto às cargas térmicas internas. Como os ambientes são ventilados sempre que ocupados, diferentes padrões de ocupação, uso de equipamentos e de iluminação estão associados aos diferentes padrões de ventilação diurna.



**Figura 5.67 – Balanços térmicos do ambiente no intervalo de 13h-18h, modelos ventilados à noite (10 renovações/h), sob diferentes padrões de ventilação diurna, nos meses de dezembro a março.**

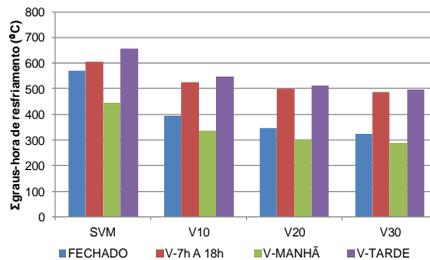
No Apêndice IV-B encontram-se os resultados dos balanços térmicos dos modelos sem ventilação mecânica e também com ventilação mecânica noturna, com taxas de renovação de ar iguais a 20 renovações/hora e 30 renovações/hora, sendo que foram mantidas as mesmas tendências observadas no balanço térmico dos modelos com taxa de renovação de ar igual a 10 renovações/hora.

A Figura 5.68 ilustra os somatórios de graus-hora de resfriamento verificados nas simulações. Observa-se que o modelo com inércia média apresenta os menores somatórios, exceto no modelo sem ventilação mecânica e sem ventilação diurna. Nos modelos com inércia baixa, o emprego da ventilação diurna durante a tarde resulta em temperaturas internas mais elevadas e, portanto, maiores somatórios (Figura 5.68-a). Isto também acontece nos modelos com inércia média, porém observa-se neste caso que o emprego da ventilação natural pela manhã resulta em somatórios menores do que os modelos que não foram ventilados durante o dia (Figura 5.68-b).



Vazões e padrões de ventilação diurna

a) Inércia baixa



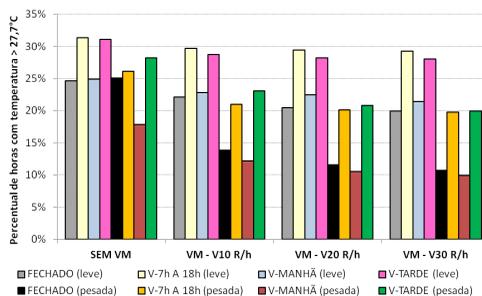
Vazões e padrões de ventilação diurna

b) Inércia média

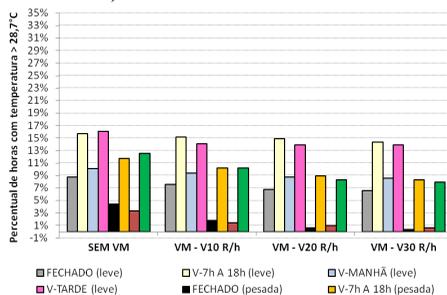
**Figura 5.68 – Somatórios de graus-hora de resfriamento,  $T_{base} = 26^{\circ}C$  (intervalo: 13h – 18h).**

Os percentuais de horas de desconforto por calor verificados no intervalo de 13h às 18h foram maiores para os modelos com inércia baixa, variando entre 20% e 31% de acordo com o limite de aceitabilidade de 90% (Figura 5.69-a). Considerando-se o limite de aceitabilidade de 80%, os percentuais de desconforto variaram entre 7% e 14% (Figura 5.69-b). Para estes modelos, os maiores percentuais de desconforto foram verificados quando o ambiente foi ventilado durante a tarde.

No caso dos modelos com inércia média, considerando-se o limite de 90% de aceitabilidade, foram verificados percentuais de desconforto variando entre 10% e 28% (Figura 5.69-a). De acordo com o limite de 80% de aceitabilidade, foram obtidos percentuais de desconforto de até 13%, sendo que os percentuais foram nulos para os modelos com ventilação mecânica e taxa de renovação igual a 30 renovações por hora. O emprego da ventilação natural apenas pela manhã resultou nos menores percentuais de desconforto para o modelo com inércia média (Figura 5.69-b).



#### a) 90% de aceitabilidade



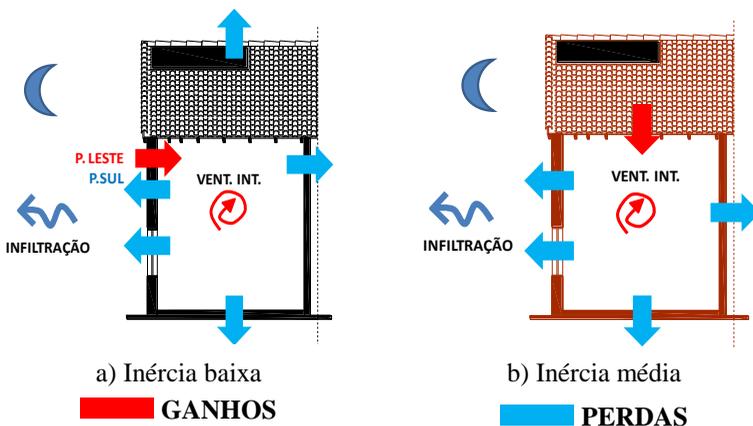
#### b) 80% de aceitabilidade

**Figura 5.69 – Percentuais de horas de desconforto verificados no intervalo de 13h às 18h.**

### 5.4.1.3 Balanço térmico no intervalo de 18h às 21h

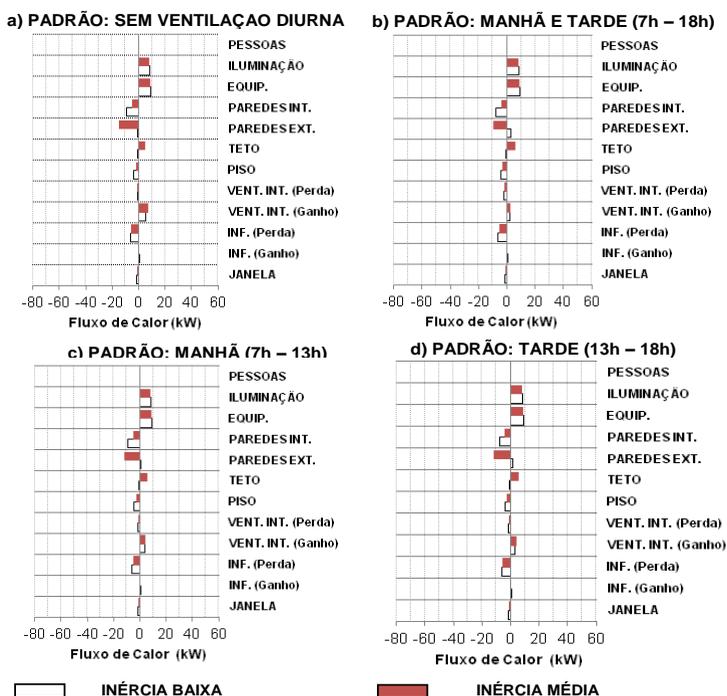
Entre 18h e 21h, nenhuma estratégia de ventilação (natural ou mecânica) é empregada no ambiente, sendo que o mesmo não é ocupado nesses horários. Entretanto, considerou-se nas simulações que a iluminação artificial estaria ativa a partir das 18h e que o computador instalado no quarto estaria ligado às 21h. Quanto ao balanço térmico, os comportamentos dos modelos sem ventilação mecânica e com o emprego desta estratégia foram semelhantes (Ver Apêndice IV-C).

A 5.70 ilustra o comportamento dos fluxos de calor correspondentes aos modelos que empregam a ventilação mecânica, cuja taxa de renovação de ar é igual a 10 renovações por hora. Observa-se que as paredes internas e o piso absorvem calor. Também são proporcionadas perdas através da janela e da infiltração, enquanto a ventilação interna é responsável por ganhos de calor. Há distinção entre os modelos com inércia baixa e média com relação ao teto e às paredes externas. No modelo com inércia baixa, o teto e as paredes Sul e Norte absorvem calor, enquanto a parede Leste transmite calor para o ambiente interno. Já no modelo com inércia média, todas as paredes externas absorvem calor neste intervalo, enquanto o teto é responsável por ganhos de calor.



**Figura 5.70 – Comportamento dos fluxos de calor no intervalo de 18h-21h, modelos ventilados à noite (10 renovações/h), (meses de dezembro a março).**

Os fluxos de calor encontram-se quantificados nos gráficos da Figura 5.71. Correspondentes a cada padrão de ventilação diurna, estes fluxos representam os somatórios de ganhos e perdas de calor, obtidos para um total de 363 h, relacionados a cada componente do balanço térmico (intervalo de 3h diárias, 121 dias de análise, compreendendo os meses de dezembro a março).

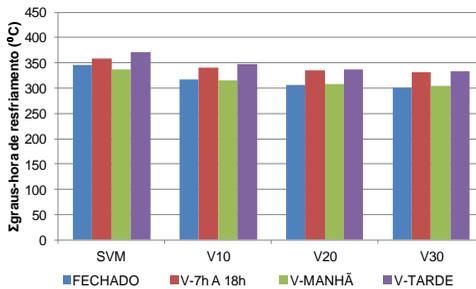


**Figura 5.71 – Balanços térmicos do ambiente no intervalo de 18h-21h, modelos ventilados à noite (10 renovações/h), sob diferentes padrões de ventilação diurna, nos meses de dezembro a março.**

No Apêndice IV-C encontram-se os resultados dos balanços térmicos dos modelos com maiores taxas de renovação de ar proporcionadas pela ventilação mecânica noturna (20 renovações/hora e 30 renovações/hora).

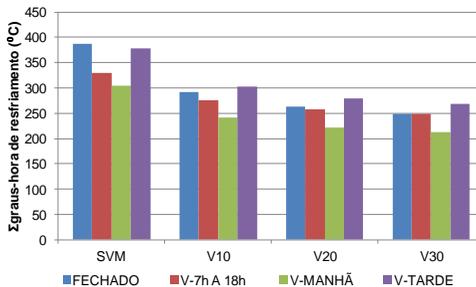
A Figura 5.72 ilustra os somatórios de graus-hora de resfriamento obtidos no intervalo entre 18h e 21h. Quando a ventilação mecânica é empregada, os modelos com inércia média apresentam os menores somatórios (Figura 5.72-b). Observa-se também que o emprego da

ventilação natural apenas pela manhã reduz os somatórios em todos os modelos. Já no modelo com inércia baixa (Figura 5.72-a), tanto os modelos ventilados apenas pela manhã quanto os modelos que permaneceram sem ventilação natural apresentaram somatórios semelhantes, inferiores àqueles obtidos sob os demais padrões de ventilação.



Vazões e padrões de ventilação diurna

a) Inércia baixa

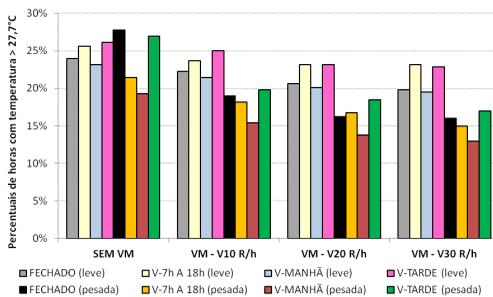


Vazões e padrões de ventilação diurna

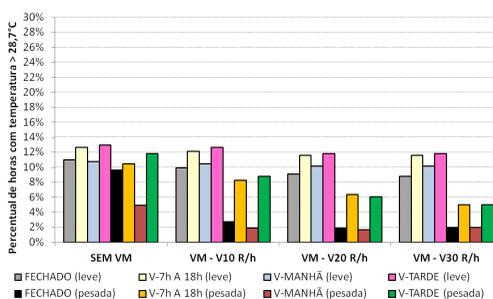
b) Inércia média

**Figura 5.72 – Somatórios de graus-hora de resfriamento,  $T_{base} = 26^{\circ}C$  (intervalo: 18h – 21h).**

Quanto aos percentuais de horas de desconforto, foram menores para os modelos com inércia média, variando entre 13% e 27% de acordo com o limite de aceitabilidade de 90% (Figura 5.73-a) e variando entre 2% e 12% para o limite de aceitabilidade de 80% (Figura 5.73-b). No caso do modelo com inércia baixa, os percentuais de horas de desconforto variaram entre 20% e 26% (90% de aceitabilidade) e entre 9% e 13% (80% de aceitabilidade).



a) 90% de aceitabilidade



b) 80% de aceitabilidade

**Figura 5.73 – Percentuais de horas de desconforto verificados no intervalo de 18h às 21h.**

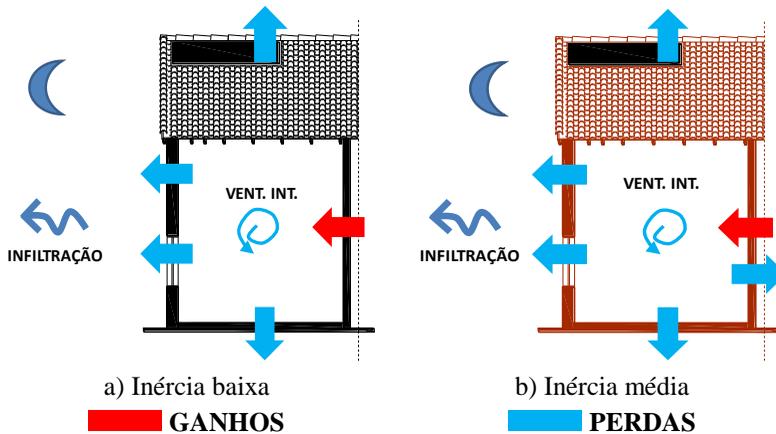
#### 5.4.1.4 Balanço térmico no intervalo de 21h às 7h

Neste intervalo verifica-se a maior distinção entre o balanço térmico dos modelos com ventilação mecânica em relação aos modelos que não empregam esta estratégia, tanto pelo comportamento de cada componente quanto pela magnitude das trocas térmicas realizadas em cada caso.

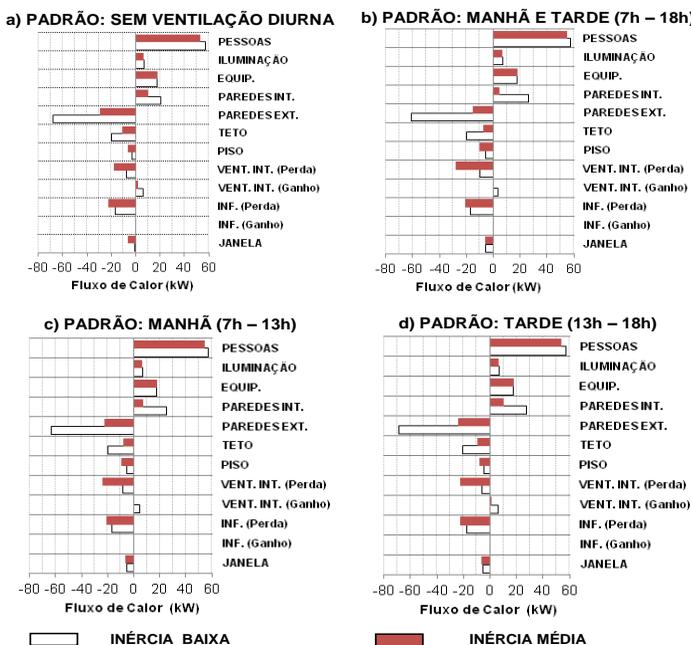
Convém salientar que durante todo o intervalo de 21h às 7h o ambiente permanece ocupado por duas pessoas, desempenhando atividades leves ou dormindo. Por apresentar uma ocupação mais intensa do que nos outros horários, o uso de equipamentos e da iluminação também é maior, resultando em uma elevação da carga térmica interna. Além disso, trata-se de um intervalo com 10h de duração, de modo que os fluxos de calor representados nas Figuras 5.75

e 5.77 a seguir foram contabilizados para um total de 1210 h (meses de dezembro a março, 121 dias).

As Figuras 5.74 e 5.75 ilustram os balanços térmicos dos modelos que não empregam a ventilação mecânica noturna. Observando o comportamento dos fluxos de calor neste intervalo, verifica-se que ambas as configurações com inércia baixa e inércia alta apresentam perdas de calor por toda a envoltória externa, o que indica a ocorrência de resfriamento desses componentes construtivos devido às perdas para o exterior. A infiltração, embora bastante reduzida, também proporciona perdas de calor. Apenas as paredes internas são responsáveis por ganhos de calor, sendo que no modelo com inércia média a parede Norte absorve calor.



**Figura 5.74 – Comportamento dos fluxos de calor no intervalo de 21h-7h, modelos não ventilados à noite, (meses de dezembro a março).**



**Figura 5.75 – Balanços térmicos do ambiente no intervalo de 21h-7h, modelos não ventilados à noite, sob diferentes padrões de ventilação diurna, nos meses de dezembro a março.**

As Figuras 5.76 e 5.77 ilustram os balanços térmicos dos modelos que empregam a ventilação mecânica noturna (10 renovações de ar por hora). Nesses modelos, a infiltração passa a ser a única responsável pelas perdas de calor, removendo todo o calor acumulado nos componentes da envoltória e alcançando uma magnitude superior a todos os outros fluxos de calor obtidos neste e nos demais horários. Observa-se também que, nos modelos com inércia média, as perdas por infiltração são maiores do que aquelas verificadas no modelo com inércia baixa, principalmente nos modelos que foram ventilados apenas à tarde ou mantidos fechados o dia inteiro. Isto significa que o modelo com inércia média apresenta uma maior quantidade de calor acumulado do que modelo com inércia baixa. Por conseguinte, os fluxos relativos aos ganhos de calor advindos da envoltória também são maiores nos modelos com inércia média. Tais perdas alcançam uma magnitude muito superior aos fluxos de calor correspondentes aos demais componentes do balanço térmico.

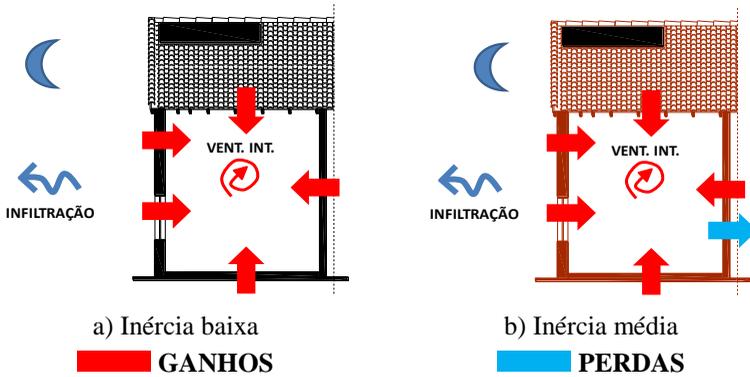


Figura 5.76 – Comportamento dos fluxos de calor no intervalo de 21h-7h, modelos ventilados à noite (10 renovações/h), (meses de dezembro a março).

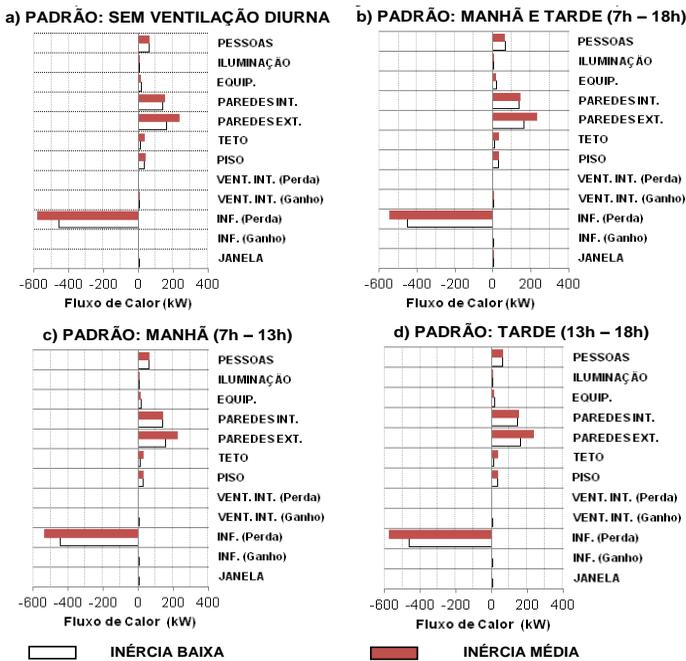
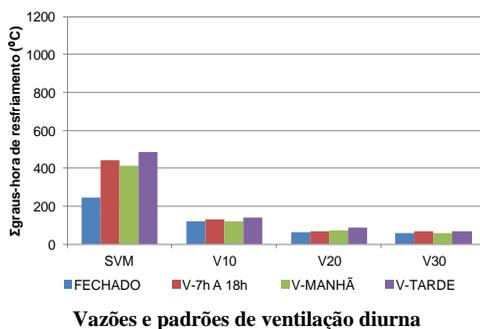


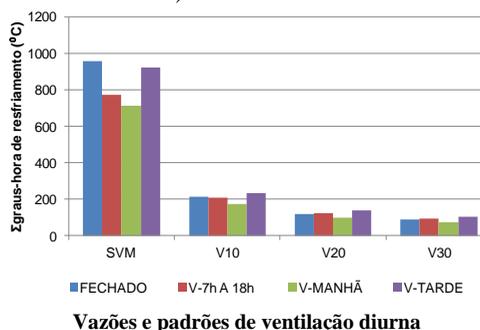
Figura 5.77 – Balanços térmicos do ambiente no intervalo de 21h-7h, modelos ventilados à noite (10 renovações/h), sob diferentes padrões de ventilação diurna, nos meses de dezembro a março.

No Apêndice IV-D encontram-se os resultados dos balanços térmicos dos modelos com maiores taxas de renovação de ar proporcionadas pela ventilação mecânica noturna (20 renovações/hora e 30 renovações/hora).

Os modelos com inércia média e sem ventilação mecânica noturna apresentam os maiores somatórios de graus-hora de resfriamento, sob qualquer padrão de ventilação natural empregado. O efeito da ventilação mecânica é mais significativo nos modelos com inércia média. Nesses casos, o emprego da referida estratégia reduziu os somatórios de graus-hora de resfriamento em até 13 vezes em relação aos somatórios obtidos no modelo sem ventilação mecânica noturna, conforme ilustrado na Figura 5.78-b. Nos modelos com inércia baixa, os somatórios dos modelos com ventilação mecânica foram até 8 vezes menores do que os resultados obtidos nos modelos que não empregam esta estratégia (Figura 5.78-a).



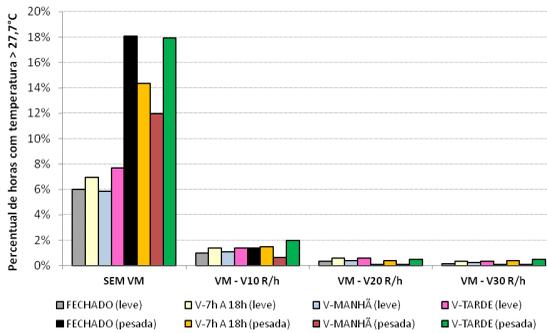
a) Inércia baixa



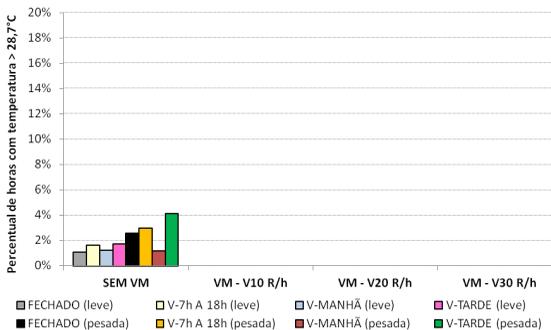
b) Inércia média

**Figura 5.78 – Somatórios de graus-hora de resfriamento,  $T_{base} = 26^{\circ}\text{C}$  (intervalo: 21h – 7h).**

Com relação aos percentuais de horas de desconforto, os valores obtidos para os modelos que empregam a ventilação mecânica noturna foram inferiores a 2%, considerando-se o limite de 90% de aceitabilidade, para ambas as configurações de vedações, leves e pesadas. Sem o emprego dessa estratégia, os percentuais de horas de desconforto variaram entre 6% e 8% para o modelo com inércia baixa e entre 12% e 18% para o modelo com inércia média (Figura 5.79-a). Para o limite de aceitabilidade de 80%, os percentuais de desconforto foram nulos nos modelos com ventilação mecânica. Nos demais, esses percentuais variaram entre 1% e 4% (Figura 5.79-b).



### 90% de aceitabilidade



### 80% de aceitabilidade

**Figura 5.79 – Percentuais de horas de desconforto verificados no intervalo de 18h às 21h.**

De acordo com os resultados obtidos para o modelo com inércia baixa, verifica-se que o padrão de ventilação diurna causa impactos semelhantes nos modelos com ventilação mecânica e sem ventilação mecânica noturna, alterando as trocas térmicas relacionadas aos componentes da envoltória, principalmente no intervalo das 13h às 18h, e afetando também as trocas por infiltração durante a noite e a madrugada (21h às 7h). No caso do modelo com inércia média, o padrão de ventilação diurna também causa impacto nas trocas de calor relacionadas aos componentes da envoltória e à infiltração em todos os horários.

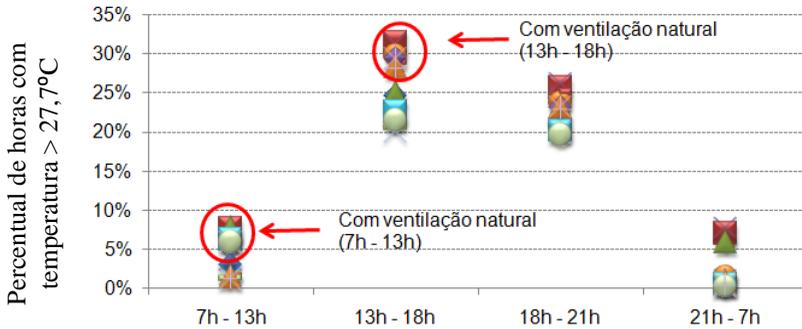
Quanto aos somatórios de graus-hora de resfriamento, o emprego da ventilação mecânica resultou na redução dos valores obtidos em todos os modelos e em todos os horários, sob todas as condições de ventilação diurna.

As análises aqui desenvolvidas indicam que um ambiente com inércia baixa, que faça uso da ventilação mecânica noturna, pode empregar a ventilação natural durante o dia sem que isto se reflita em acúmulo de calor e, por conseguinte, no aumento dos somatórios de graus-hora de resfriamento durante a noite e a madrugada (vide Figura 5.78-a). O mesmo não ocorre nos modelos sem ventilação mecânica noturna, pois nesses casos o somatório de graus-hora de resfriamento do modelo ventilado à tarde corresponde ao dobro do somatório obtido quando o ambiente foi mantido sem ventilação natural.

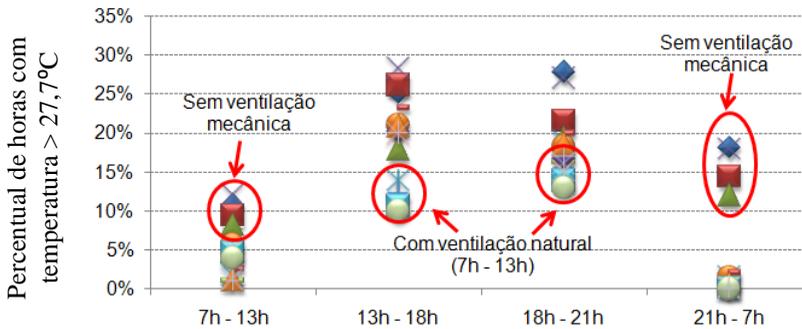
No caso do modelo com inércia média, os menores somatórios de graus-hora de resfriamento no período noturno e madrugada foram obtidos quando a ventilação natural foi empregada apenas no intervalo entre 7h e 13h (padrão V-MANHÃ), em todas as simulações. Tal resultado se repetiu nos horários compreendidos entre as 13h e 21h. Observou-se também que empregar a ventilação noturna e manter um ambiente com inércia média sem ventilação diurna só é vantajoso caso o mesmo seja ocupado apenas pela manhã, pois assim os somatórios de graus-hora de resfriamento são menores no intervalo das 7h às 13h (vide Figura 5.64-b). Para esta configuração construtiva, pode-se concluir que o uso da ventilação diurna sem a adoção de uma estratégia de resfriamento no período noturno prejudica significativamente o desempenho térmico do ambiente, principalmente no intervalo entre 21h e 7h, quando os somatórios obtidos pelo modelo sem ventilação mecânica foram até 13 vezes superiores aos somatórios obtidos com os modelos que empregavam esta estratégia.

Com relação aos percentuais de horas de desconforto obtidos para os modelos simulados, para ambos os limites de aceitabilidade da

temperatura operativa, observa-se que os modelos com inércia média apresentam percentuais menores nos horários das 13h às 21h, principalmente quando ventilados pela manhã (Figuras 5.80-b e 5.81-b). Já os modelos com inércia baixa apresentam percentuais de desconforto menores no intervalo das 21h-7h (Figuras 5.80-a e 5.81-a).

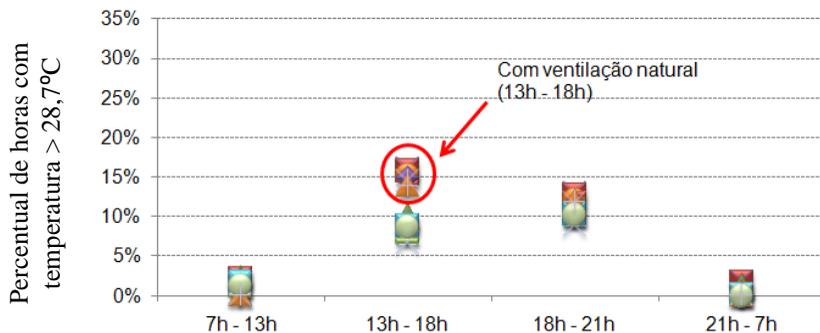


a) Inércia baixa

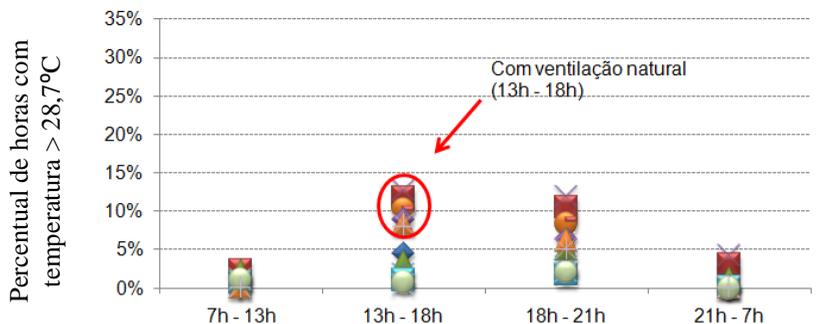


b) Inércia média

**Figura 5.80 – Percentuais de horas de desconforto obtidos nas simulações: limite de aceitabilidade igual a 90% (temperatura operativa de conforto igual a 27,7°C).**



a) Inércia baixa



b) Inércia média

**Figura 5.81 – Percentuais de horas de desconforto obtidos nas simulações: limite de aceitabilidade igual a 80% (temperatura operativa de conforto igual a 28,7°C).**

Tais resultados indicam a ocorrência de um maior amortecimento térmico nos modelos com maior inércia, visto que o percentual de horas de desconforto nas horas mais quentes do dia é menor nesses modelos. Porém, devido ao acúmulo de calor na envoltória, têm-se uma situação desfavorável durante a manhã e a madrugada.

#### 5.4.2 Síntese das análises: usar inércia baixa ou inércia média?

A Figura 5.82 possibilita comparar os somatórios de graus-hora de resfriamento, obtidos nos quatro intervalos horários, para ambas as configurações construtivas simuladas: com inércia baixa e com inércia média, considerando-se a temperatura base igual a 26°C. Visto que cada intervalo abrange um número de horas diferente, optou-se por dividir os somatórios de graus-hora pelo total de horas correspondente a cada intervalo, considerando-se os quatro meses sob análise (dezembro a março). Desse modo, obteve-se como resultado o número de graus-hora por hora (°Ch/h) de cada intervalo, considerando-se os 121 dias analisados, para todos os intervalos horários: 7h – 13h (726 horas), 13h-18h (605 horas), 18h-21h (363 horas) e 21h-7h (1210 horas).

Cada gráfico representa o número de graus-hora por hora para o mesmo intervalo horário, considerando-se ambas as configurações construtivas submetidas a todos os padrões de ventilação natural diurna e também os modelos que permaneceram fechados 24h por dia. Os resultados foram agrupados de acordo com os padrões de ventilação mecânica (taxas de renovação de ar por hora: V-10, V-20, V-30 e SVM – Sem Ventilação Mecânica) e os padrões de ventilação natural diurna (FECHADO, V-Manhã, V-Tarde e V-7h a 18h).

Observa-se que os menores números de graus-hora por hora nos intervalos de 21h às 7h e entre 7h e 13h correspondem ao modelo com inércia baixa. Quando a ventilação noturna é empregada, o modelo com inércia baixa apresenta números de graus-hora por hora que variam entre 0,05°Ch/h e 0,40°Ch/h entre 21h e 7h. Já o modelo com inércia média apresenta valores equivalentes quando as vazões são maiores (20 e 30 renovações por hora). Já os somatórios dos modelos que não empregam a ventilação mecânica atingem valores até 16 vezes maiores do que os resultados obtidos nos modelos que empregam esta estratégia, alcançando valor máximo no modelo com inércia média, com padrão fechado no período diurno (sem ventilação, 24h por dia): 0,79 °Ch/h.

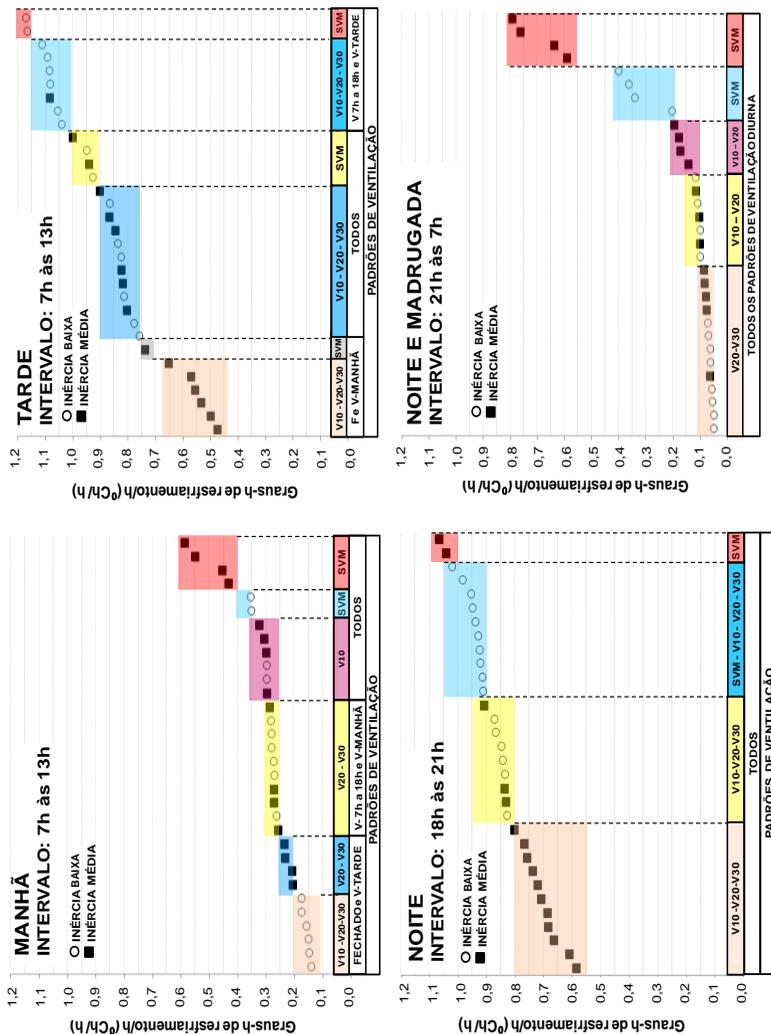


Figura 5.82 – Somatórios de graus-hora de resfriamento obtidos nas simulações.

No intervalo das 7h às 13h, os modelos que apresentam números de graus-hora por hora mais baixos são aqueles que não empregam a ventilação diurna nestes horários e empregam a ventilação mecânica noturna: variam entre  $0,14^{\circ}\text{Ch/h}$  e  $0,24^{\circ}\text{Ch/h}$ . No caso do modelo com inércia média, os resultados se enquadram em tais limites quando a ventilação mecânica promove 20 e 30 renovações por hora no período noturno. Durante a manhã, a variação total nos somatórios obtidos é menor do que durante a madrugada, sendo que o modelo com inércia média sem ventilação mecânica e com padrão fechado no período diurno também apresenta o somatório mais elevado, igual a  $0,59^{\circ}\text{Ch/h}$ .

Quando se observa os resultados para os demais intervalos (13h-18h e 18h-21h), verifica-se que os modelos com inércia média passam a apresentar números de graus-hora por hora mais baixos. Os valores obtidos entre 13h e 18h, para todos os modelos com inércia média que não empregam a ventilação diurna nesse horário, variam entre  $0,48^{\circ}\text{Ch/h}$  e  $0,74^{\circ}\text{Ch/h}$ . Ou seja, tanto os modelos que foram mantidos fechados 24h por dia (com ventilação mecânica noturna) quanto os modelos que foram ventilados apenas pela manhã (entre 7h e 13h) apresentam resultados equivalentes. Por outro lado, os maiores números de graus-hora por hora, que variaram entre  $1,08^{\circ}\text{Ch/h}$  e  $1,70^{\circ}\text{Ch/h}$ , foram obtidos pelos modelos com inércia baixa ventilados nesses horários. Dentre os modelos com inércia média, apenas o modelo ventilado à tarde e sem ventilação mecânica apresentou resultado enquadrado nessa faixa.

As mesmas configurações construtivas apresentaram desempenho semelhante no intervalo entre 18h e 21h. Compreendendo um período de duração menor, no qual não foi empregada nenhuma estratégia de ventilação, os números de graus-hora por hora variam entre  $0,59^{\circ}\text{Ch/h}$  e  $1,07^{\circ}\text{Ch/h}$ . Os valores calculados para os modelos com inércia média que empregam a ventilação mecânica foram os menores nesses horários, variando entre  $0,59^{\circ}\text{Ch/h}$  e  $0,80^{\circ}\text{Ch/h}$ , sob todas as condições de emprego da ventilação natural diurna.

Com base em tais resultados, verifica-se que uma mesma configuração construtiva pode apresentar desempenho térmico satisfatório ou insatisfatório, dependendo do período do dia e das estratégias de ventilação empregadas. Além disso, as estratégias híbridas de ventilação causam impacto sobre o desempenho térmico do ambiente não apenas nos horários em que são empregadas, mas também nos períodos subsequentes.

Desse modo, o padrão de ocupação do ambiente pode ser considerado como um condicionante do projeto arquitetônico. Ou seja, tanto a escolha do nível de inércia térmica do ambiente quanto a definição das estratégias híbridas de ventilação a serem aplicadas podem ser realizadas visando promover um melhor desempenho térmico nos horários em que o ambiente é ocupado. Desse modo, em uma mesma edificação, ambientes de ocupação noturna, tais como os dormitórios, podem apresentar um nível de inércia diferenciado em relação à cozinha, ambiente cuja ocupação é essencialmente diurna. As estratégias de ventilação também seriam específicas para cada caso.

Para o caso do ambiente em estudo, visando proporcionar condições de conforto satisfatórias para os usuários durante o verão (meses de dezembro a março), são propostas as seguintes recomendações:

- **Ambientes com ocupação matutina (7h às 13h)**

- ✓ Priorizar configurações construtivas com inércia baixa e empregar a ventilação mecânica noturna;
- ✓ Evitar o uso de configurações com inércia média, caso não seja empregada nenhuma estratégia de resfriamento no período noturno;
- ✓ Preferencialmente, não empregar a ventilação natural neste intervalo, utilizando-se outras formas para incrementar o movimento do ar interno (ex.: ventiladores de teto);
- ✓ Somente utilizar a ventilação natural neste intervalo se a ventilação mecânica for empregada com taxas de renovação iguais a 20 renovações/hora e 30 renovações/h.

- **Ambientes com ocupação vespertina (13h às 18h)**

- ✓ Priorizar configurações construtivas com inércia média e empregar a ventilação mecânica noturna (recomendação válida também para ambientes ocupados no intervalo entre 18h e 21h);
- ✓ Evitar o uso da ventilação natural neste intervalo, independente de usar a ventilação mecânica noturna, principalmente em configurações construtivas com inércia baixa<sup>42</sup>.

---

<sup>42</sup> Em todas as simulações, o ambiente foi mantido fechado no intervalo de 18h às 21h. Portanto, não foram definidas recomendações relativas ao emprego da ventilação natural, visto que a influência da mesma sobre o desempenho térmico do ambiente não foi avaliada durante estes horários.

- **Ambientes com ocupação noturna (21h às 7h)**

- ✓ Priorizar configurações construtivas com inércia baixa e empregar a ventilação mecânica, independente do padrão de ventilação diurna empregado;
- ✓ Caso a ventilação mecânica seja empregada com taxa de renovação igual a 30 renovações/h, a configuração com inércia média também pode ser utilizada, desde que a ventilação natural seja empregada apenas pela manhã (intervalo das 7h às 13h);
- ✓ Não empregar configurações com inércia média caso não seja adotada nenhuma estratégia de resfriamento no período noturno.

Visando aprofundar o conhecimento acerca da problemática da adaptação do projeto arquitetônico para promover o melhor desempenho térmico dos ambientes residenciais durante o verão na cidade de Florianópolis-SC, o presente trabalho investigou o efeito da ventilação natural e da ventilação mecânica noturna, quando combinadas com configurações construtivas diferenciadas de acordo com a inércia térmica das vedações.

Como toda estratégia de condicionamento, a incorporação da ventilação mecânica noturna requer a adaptação do projeto arquitetônico às condições climáticas, sendo que a sua eficácia é profundamente afetada por alterações nos padrões de ventilação no período diurno. Portanto, o padrão de uso dos ambientes também é fundamental para determinar a aplicabilidade da ventilação mecânica noturna, particularmente em residências.

A estratégia foi inicialmente aplicada em uma residência experimental real, a Casa Eficiente, localizada em Florianópolis-SC. Com base nos resultados do monitoramento *in loco*, concluiu-se que a ventilação mecânica noturna beneficiou o desempenho térmico do ambiente. Foram obtidas reduções de temperatura do ar, em relação ao caso base (sem ventilação mecânica noturna), incrementando as perdas de calor pela envoltória durante a madrugada. Observou-se também que a admissão da ventilação e nos horários mais quentes do dia, entre 11h e 15h, comprometeu a eficácia da estratégia, diminuindo o efeito de amortecimento das temperaturas internas.

A partir de tais resultados, buscou-se aprofundar a investigação a respeito da influência dos ganhos de calor no período diurno na eficácia da ventilação mecânica noturna, ampliando-se o escopo da análise para abranger todo o período de verão. Para tal, foram consideradas duas configurações construtivas, caracterizadas por níveis de inércia distintos e por padrões de ocupação diferenciados. Tal investigação foi viabilizada através de simulações computacionais com o *software* EnergyPlus v. 6.0.

Entretanto, a modelagem computacional inclui uma infinidade de parâmetros de simulação cuja delimitação produz grande variabilidade dos resultados. Desse modo, é fundamental a calibração do modelo computacional, realizada a partir da análise de sensibilidade do modelo

às diferentes possibilidades de inserção dos dados de entrada. Portanto, neste trabalho foi realizada a análise de sensibilidade a partir dos dados do monitoramento *in loco* da Casa Eficiente (temperatura do ar, temperaturas superficiais internas e fluxos de calor através dos componentes opacos). Em uma primeira etapa, a calibração foi realizada considerando-se parâmetros relativos às trocas de ar e especificações do equipamento responsável pela ventilação mecânica (insufladores de ar).

Na segunda etapa, a análise de sensibilidade englobou os algoritmos de condução e convecção utilizados pela ferramenta computacional, analisando-se o balanço térmico das superfícies e os somatórios de graus-hora de resfriamento de quarto de casal no verão. Observou-se uma significativa variabilidade nos resultados, dependendo da combinação de algoritmos de condução e convecção utilizados. Para a condução, os ganhos de calor simulados superestimaram as medições em até 4,5 vezes, com o algoritmo CondFD, e em até 90%, com o algoritmo CTF. Os somatórios de graus-hora de resfriamento obtidos no período de 22 a 25/01/2008 (temperatura base = 26°C) variaram entre 13,7°C e 25,2°C, em função dos coeficientes de convecção. O emprego dos algoritmos *Simple* para as paredes e o teto e *Adaptive* para o piso resultou nos menores desvios da temperatura do ar: 0,3°C a 0,9°C. A análise do balanço térmico das superfícies internas demonstrou a importância da seleção dos algoritmos para solução da condução e da convecção utilizada nas simulações do ambiente em estudo. A seleção adequada destes algoritmos foi capaz de reduzir os desvios dos resultados das simulações em relação às medições *in loco*, sob diferentes condições de ventilação.

Tendo sido definidos os parâmetros de simulação a partir dos procedimentos de calibração, partiu-se para a análise do desempenho da ventilação mecânica noturna.

Os resultados obtidos possibilitam destacar dois aspectos relevantes a respeito do papel da ventilação natural no período diurno. Em primeiro lugar, o emprego da ventilação natural causa impacto no desempenho térmico da envoltória e nas condições de conforto não apenas nos horários em que é adotada, mas ao longo de todos os períodos do dia. Isto ocorre independente do nível de inércia da configuração construtiva.

Em segundo lugar, observou-se que ambientes caracterizados por inércias diferenciadas (inércia baixa e inércia média) podem apresentar desempenho semelhante em diferentes horários, dependendo do padrão de ventilação diurna adotado. Considerando-se que a ventilação possui um papel fundamental para promover o resfriamento fisiológico em

localidades de clima quente e úmido, de modo que o movimento do ar é desejável nas horas mais quentes do dia, conclui-se que esta estratégia pode favorecer o conforto dos usuários sem prejudicar o desempenho térmico da edificação em outros períodos.

Deve-se considerar também a correspondência entre os períodos caracterizados por maior desconforto e os padrões de ocupação dos ambientes.

No caso do dormitório, ambiente com ocupação predominante à noite, o emprego de configurações construtivas com inércia média apresenta-se sempre desfavorável quando nenhuma estratégia de ventilação noturna é empregada. Nesses casos, os somatórios de graus-hora de resfriamento ultrapassam em até 290% os somatórios verificados no modelo com inércia baixa (modelo sem ventilação diurna). Por outro lado, em ambientes com ocupação vespertina, o efeito do atraso e do amortecimento térmico propiciado pela configuração com maior inércia torna-se adequado. Comparando-se os resultados de ambas as configurações construtivas, no intervalo entre 13h e 18h os modelos com inércia média apresentam somatórios de graus-hora de resfriamento até 42% menores do que aqueles obtidos pelos modelos com inércia baixa.

Com relação à ventilação mecânica noturna, seu emprego beneficiou o desempenho térmico e as condições de conforto em todos os horários, em todos os modelos simulados. Além disso, quando aplicada, esta estratégia minimiza o impacto negativo causado pela admissão da ventilação diurna, quando esta é aplicada nos horários em que a temperatura externa é mais elevada (início da tarde). Ou seja, durante a noite e a madrugada, o somatório de graus-hora de resfriamento do modelo com inércia baixa que foi ventilado entre 13h e 18h é 15% maior do que aquele obtido pelo modelo que foi mantido fechado (considerando-se uma taxa de renovação da ventilação mecânica igual a 30 renovações por hora). Já nos modelos sem ventilação mecânica, essa diferença foi de 49% (modelo ventilado à tarde em relação ao modelo fechado).

Nos modelos com inércia média, entre 21h e 7h, os somatórios de graus-hora de resfriamento verificados nos casos em que a ventilação natural foi empregada apenas pela manhã foram inferiores aos resultados obtidos com os modelos que permaneceram fechados 24h por dia. Nesses casos, os somatórios sofreram reduções de 25,7% e 19,5% quando ventilados pela manhã, respectivamente, para os modelos sem ventilação mecânica e para aqueles que empregaram esta estratégia.

Entretanto, mesmo com o emprego da ventilação mecânica, os modelos com inércia média alcançaram somatórios de graus-h de resfriamento elevados no intervalo das 21h às 7h. Quando esses somatórios são comparados àqueles obtidos pelo modelo com inércia baixa, verifica-se um acréscimo de até 93% (modelo sem ventilação diurna, ventilação mecânica com taxa de renovação igual a 20 renovações por hora). Isto indica a ocorrência de acúmulo de calor na envoltória do modelo com inércia média, o que também resultou em maiores somatórios de graus-hora de resfriamento durante a manhã. No intervalo de 7h às 13h, se o ambiente não é ventilado nestes horários, os somatórios de graus-h de resfriamento dos modelos com inércia média são 41% até 122% maiores do que os somatórios obtidos pelos modelos com inércia baixa.

Confirmou-se ainda a importância da restrição da ventilação durante a tarde, de modo que em ambientes ocupados nestes horários os usuários deveriam optar por outras possibilidades para promover o movimento do ar ao invés da ventilação natural, favorecendo a redução da temperatura e da umidade relativa do ar, a exemplo do uso de ventiladores de teto.

Convém destacar que não foi alvo de investigação a influência dos ganhos de calor transmitidos pelos elementos transparentes, de modo que a mesma configuração de esquadria foi adotada em todas as simulações. A fim de minimizar os impactos dos ganhos solares, buscou-se assegurar o sombreamento nas horas críticas. Também não foi alvo de investigação a influência da orientação da edificação, de modo que o ambiente analisado possui abertura orientada a Leste a fim de minimizar a exposição à insolação no período da tarde, assim como possibilitar a penetração dos ventos dominantes para favorecer a ventilação diurna.

Por fim, salienta-se que a ventilação mecânica noturna configura-se como uma estratégia de resfriamento que apresenta vantagens em relação a ventilação natural. A ventilação mecânica caracteriza-se por uma menor variabilidade, pois há a possibilidade de controle da vazão de insuflamento de ar. Também elimina a necessidade de manter esquadrias abertas durante a noite, garantindo a privacidade dos usuários, resguardando o ambiente de interferências externas. Além disso, quando comparada a estratégias de condicionamento ativo, a exemplo do condicionamento artificial, apresenta como vantagem um menor consumo de energia.

## 6.1 LIMITAÇÕES DO TRABALHO

Os dados relativos aos registros das temperaturas superficiais e dos fluxos de calor utilizados para a calibração do Modelo Base Final foram restritos apenas a dois pontos de medição, localizados nas paredes Sul e Leste. Estes registros pontuais foram considerados como representativos da área total de cada superfície, sendo que na prática ocorrem variações nos fluxos de calor de acordo com as condições de exposição dessas superfícies à radiação solar, e também devido à estratificação da temperatura do ar no interior do ambiente. Além disso, os dados relativos aos fluxos de calor através do teto foram descartados, pois apresentaram valores incoerentes com o comportamento térmico esperado. Portanto, não foi possível efetuar comparações entre o balanço térmico do teto verificado durante o monitoramento e o balanço calculado a partir das simulações efetuadas com o programa EnergyPlus. Outra limitação relacionada ao registro dos fluxos de calor diz respeito à quantidade de dados disponíveis, restrita ao período de 22/01 a 25/01 de 2008.

A estimativa dos coeficientes de convecção forçada a partir dos dados do monitoramento, os quais foram comparados aos coeficientes obtidos nas simulações, foi limitada aos horários nos quais a ventilação mecânica noturna foi empregada. Não foram efetuados registros de velocidade do ar no interior do ambiente nos horários em que a ventilação natural foi aplicada.

Com relação à calibração do Modelo Base Final, convém salientar que as análises referentes ao balanço térmico das superfícies se restringiram apenas a duas paredes do ambiente (Sul e Leste), pois não foram registradas temperaturas superficiais das outras paredes (Norte e parede interna), assim como as temperaturas do ar próximo às mesmas. Além disso, as análises desenvolvidas no presente trabalho não permitem identificar por que o emprego da combinação entre os algoritmos Simple (paredes) e Adaptive (teto e piso) resultou em menores desvios nos resultados das simulações. O fato de se aplicar coeficientes diferenciados para cada superfície sugere que a geometria do ambiente também influencia na seleção dos algoritmos de convecção. Portanto, a combinação de algoritmos empregada nas simulações do Modelo Base Final apresenta-se como um dado específico deste modelo e não deve ser generalizada para outras configurações arquitetônicas.

Com relação à análise da eficácia da ventilação mecânica noturna, os resultados apresentados no presente trabalho são limitados ao período de verão em Florianópolis-SC. Além disso, estes resultados e

as recomendações indicadas para o emprego de estratégias híbridas de ventilação são específicos para um ambiente residencial (quarto), analisado sob configurações construtivas representativas de dois níveis de inércia (baixa e média), as quais apresentam o mesmo volume e as mesmas características geométricas, tais como áreas de teto, paredes, piso e abertura, assim como a mesma orientação (tanto da abertura quanto das fachadas) e as mesmas condições de sombreamento, ventilação e padrões de uso e ocupação.

Por fim, convém salientar que não foi abordado neste trabalho o efeito do movimento do ar e da umidade nas condições de conforto do ambiente em estudo. Durante o monitoramento, não foram efetuados registros suficientes da velocidade do ar capazes de possibilitar o desenvolvimento de análises de conforto térmico. Além disso, a ferramenta de simulação utilizada apresenta limitações na modelagem do movimento do ar no interior das edificações, impossibilitando o cálculo das velocidades com a acurácia necessária. Com relação à umidade, embora tenham sido efetuados registros durante o monitoramento, estes dados não foram utilizados para a calibração do modelo computacional e para as simulações do balanço térmico, visto que os algoritmos que levam em consideração a umidade foram excluídos do escopo deste trabalho.

## 6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHO FUTUROS

- Ampliar o escopo da investigação, analisando-se o desempenho de configurações construtivas constituídas por componentes opacos caracterizados por inércias diferenciadas em relação aos valores aqui simulados;
- Avaliar o impacto dos ganhos de calor no período diurno sob padrões diferenciados de ventilação e ocupação dos ambientes, utilizando-se como critério o somatório de graus-hora de resfriamento e os percentuais de horas de desconforto calculados para diferentes intervalos horários;
- Ampliar a base de dados de monitoramento *in loco*, para edificações com geometrias diferenciadas, proporcionado a realização de novas simulações calibradas que subsidiem a construção de métodos preditivos do somatório de graus-hora

de resfriamento em função das características da envoltória e dos padrões de ventilação nos períodos diurno e noturno;

- Aprofundar a investigação acerca das possibilidades de obtenção de conforto térmico dentro dos limites da zona F da carta bioclimática da NBR 15220-3 (ABNT, 2005b), com base em pesquisas desenvolvidas com usuários de ambientes residenciais.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

ABREU, A. L. P. de. **Método estimativo da temperatura interna de edificações residenciais em uso**. Orientação Roberto Lamberts. Florianópolis, SC. 2004. 179 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

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.

AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE/ AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **ANSI/ASHRAE 55-2004**: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. Atlanta, 2004.

ANDRADE, S. F. de. **Estudo de estratégias bioclimáticas no clima de Florianópolis-SC**. Orientação: Roberto Lamberts. Florianópolis, SC. 1996. 147 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1996.

ARTMANN, N.; MANZ, H.; HEISELBERG, P. Climatic potential for passive cooling of buildings by night-time ventilation in Europe. **Applied Energy**. v. 84, p. 187-201, 2007.

ARTMANN, N.; MANZ, H.; HEISELBERG, P. Parameter study on performance of building cooling by night-time ventilation. **Renewable Energy**. v. 33, p. 2589-2598, 2008.

ARTMANN, N.; JENSEN, R. L.; MANZ, H.; HEISELBERG, P. Experimental investigation of heat transfer during night-time ventilation. **Energy and Buildings**. v. 42, p. 366-374, 2010.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIRCONDITIONING ENGINEERS. **2005 ASHRAE Handbook – Fundamentals**. Capítulo 8: Thermal Comfort. Atlanta, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-2**: Desempenho térmico de edificações - Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro, 2005a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-3**: Desempenho térmico de edificações - Parte 3: Zoneamento bioclimático Brasileiro e estratégias de condicionamento térmico passivo para habitações de interesse social. Rio de Janeiro, 2005b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575**: Edificações habitacionais de até cinco pavimentos – Desempenho. Rio de Janeiro, 2008.

AYNSLEY, R. M.; MELBOURNE, W.; VICKERY, B. J. **Architectural Aerodynamics**. Applied Science Publishers Ltd., London, 1977.

AYNSLEY, R. M. A resistance approach to estimating airflow through buildings with large openings due to wind. **ASHRAE Transactions**, Volume 94, Part 2, Ottawa, 1988.

BARBOSA, M. J. 1997. 274 f. **Uma metodologia para especificar e avaliar o desempenho térmico de edificações unifamiliares**. Tese de doutorado (Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção) - Depto. de Engenharia de produção e sistemas, Programa de pós-graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1997.

BATISTA, J. O.; LAMBERTS, R.; GÜTHS, S. Influências dos algoritmos de condução e convecção sobre os resultados de simulações do comportamento térmico de edificações. **Ambiente Construído**, v. 11, n. 4, p. 79-97, 2011.

BATISTA, J. O.; LAMBERTS, R.; CANDIDO, C. Desempenho das estratégias bioclimáticas de projeto: inércia térmica e ventilação natural. In: LAMBERTS, R; GHISI, E. PEREIRA, C. D.; BATISTA, J.O. (Ed.). **Casa Eficiente: Bioclimatologia e Desempenho Térmico**. Florianópolis: UFSC/LabEEE, 2010. p.33-53.

BATISTA, J. O.; LAMBERTS, R. Ventilação mecânica noturna. In: LAMBERTS, R; GHISI, E. PEREIRA, C. D.; BATISTA, J.O. (Ed.). **Casa Eficiente: Bioclimatologia e Desempenho Térmico**. Florianópolis: UFSC/LabEEE, 2010. p.55-83.

BATISTA, J. O. 2006. 161 f. **A arquitetura e seu desempenho térmico no contexto do semi-árido alagoano: estudos de caso em Santana do Ipanema – AL**. Dissertação de mestrado (Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

BECKER, R.; PACIUK, M. Inter-related effects of cooling strategies and building features on energy performance of office buildings. **Energy and Buildings**, n. 34, p. 25-31, 2002.

BERTAGNOLIO, S.; LEMORT, V.; ANDRE, P. **IEA-ECBCS Annex 53: Total Energy Use in Buildings - Analysis and evaluation methods. Simulation assisted audit & Evidence based calibration methodology**. Laboratoire de Thermo-Dynamique, Université de Liège, Belgium, 2010.

BITTENCOURT, L. ; CÂNDIDO, C. **Introdução à ventilação natural**. Maceió: EDUFAL, 2006.

BLONDEAU, P.; SPÉRANDIO, M.; ALLARD, F. Night ventilation for building cooling in summer. **Solar Energy**. V. 61, n. 5, p. 327-335, 1997.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior. Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO). **Portaria nº 372, de 17 de setembro de 2010.** Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (RTQ-C). Brasília, DF, 2010. Disponível em <<http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC3722010.pdf>>. Acesso em: 30 set 2010.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior. Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO). **Portaria nº 449, de 25 de novembro de 2010.** Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (RTQ-R). Brasília, DF, 2010. Disponível em <<http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC001627.pdf>>. Acesso em: 15 out 2011.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. **Balço Energético Nacional 2007: Ano Base 2006.** Relatório Final. Rio de Janeiro: EPE, 2007.

CÂNDIDO, C. M. **Aceitabilidade do movimento do ar e conforto térmico em climas quentes e úmidos.** 2010. 180 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

CARRILHO DA GRAÇA, G.; CHEN, Q.; GLICKSMAN, L.R.; NORFORD, L. K. Simulation of wind-driven ventilative cooling systems for an apartment building in Beijing and Shanghai. **Energy and Buildings**, n. 34, p. 1-11, 2002.

CARLO, J. C. 2008. 215 f. **Desenvolvimento de Metodologia de Avaliação da Eficiência Energética do Envolvório de Edificações Não-residenciais.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

CASALENA, A. U. UNI EM ISO 13786 – Foglio di Calcolo Excel. Disponível em: <[www.mygreenbuildings.org](http://www.mygreenbuildings.org)>. Acesso em: 19 jan 2012.

CHENG, V.; NG, E.; GIVONI, B. Effect of envelope colour and thermal mass on indoor temperatures in hot humid climate. **Solar Energy**. v. 78, p. 528-534, 2005.

CLARKE, J.A. **Energy Simulation in Building Design**. Oxford: Butterworth Heinemann, 2001.2nd Ed.

CONSTRUÇÃO E MERCADO. **Custos Unitários Pini de Edificações - Florianópolis/SC**. Disponível em: <<http://www.construcaomercado.com.br/IC/Cupe.asp?Regiao=SC>>. Acesso em: 09 set 2009.

COPE, R.; BAZIN, M. Habitação. Estado da Arte na França. In: Cidades, Ciência e Tecnologia: Anais do Seminário Cooperação Brasil-França **Anais...** Porto Alegre: ANTAC, 2003, p. 217-226.

DE DEAR, R.; BRAGER, G. S. Thermal comfort in naturally ventilated buildings: revisions to ASRHAE Standard 55. **Energy and Buildings**. v. 34, p. 549-561, 2002.

DEPARTMENT OF ENERGY – DOE. **EnergyPlus**: version 5.0. Available at: < <http://www.energyplus.gov/>> Accessed: 10 mai. 2010.

DORNELLES, K. A. **Estudo de casos sobre a inércia térmica de edificações na cidade de São Carlos, SP**. 2004. 148 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Programa de Pós-graduação em Construção Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2004.

ELETRORBRAS – Centrais Eletricas Brasileiras S.A.; PROCEL – Programa Nacional de Conservacao de Energia Eletrica. **Pesquisa de Posse de Equipamentos e Habitros de Uso (SINPHA) – Ano Base 2005 – Classe Residencial –Relatorio Brasil**. Rio de Janeiro: ELETRORBRAS/ PROCEL, 2007.

ELETROSUL. **Projeto Casa Eficiente**. Disponível em: <<http://www.eletrosul.gov.br/casaeficiente>>. Acesso em: 19 set 2010.

ENERGYPLUS. **Engineering Manual**. Disponível em: <[www.energyplus.gov](http://www.energyplus.gov)>. Acesso em: 20 abr. 2010.

EUA. U.S. Department of Energy. Building Technologies Program. **Building Energy Software Tools Directory**. Disponível em: <[http://apps1.eere.energy.gov/buildings/tools\\_directory/software.cfm/ID=287/pagename=alpha\\_list](http://apps1.eere.energy.gov/buildings/tools_directory/software.cfm/ID=287/pagename=alpha_list)>. Acesso em: 01 fev. 2011.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION – CEN. **DIN EN 15251**: Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics (English version), 2007.

FANGER, P. O.; TOFTUM, J. Extension of the PMV model to non ir-conditioned buildings in warm climates. **Energy and Buildings**, Berkley, n 34, 2002. p. 533-536.

FERNANDES, L. C.; KRÜGER, E. L. Equações preditivas para avaliação de desempenho térmico em habitações de interesse social. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 10, 2004, São Paulo. **Anais ...** São Paulo: ANTAC, 2004. 1 CD-ROM.

FINN, D. P.; CONNOLLY, D.; KENNY, P. Sensitivity analysis of a maritime located night ventilated library building. **Solar Energy**, v.81, p. 697-710, 2007.

FLORIANÓPOLIS. Lei Complementar n. 060/2000, de 28 de agosto de 2003. Institui o Código de Obras e Edificações de Florianópolis e dá outras providências. Disponível em: <<http://www.pmf.sc.gov.br>> Acesso em: 16 out. 2010.

GEROS, V.; SANTAMOURIS, M.; TSANGRASOULIS, A.; GUARRACINO, G. Experimental evaluation of night ventilation phenomena. **Energy and Buildings**. v. 29, p. 141-154, 1999.

GHIAUS, C.; ALLARD, F. Potential for free-cooling by ventilation. **Solar Energy**. v. 80, p. 402-413, 2006.

GIVONI, B. Comfort climate analysis and building design guidelines. **Energy and Buildings**, v.18, n.1, p. 11 – 23, 1992.

\_\_\_\_\_. **Passive and low energy cooling of buildings**. New York: Van Nostrand Reinhold publishing company, 1994.

\_\_\_\_\_. **Climate considerations in building and urban design**. New York: John Wiley & Sons Inc., 1997.

\_\_\_\_\_. Effectiveness of mass and night ventilation in lowering the indoor daytime temperatures. Part I: 1993 experimental periods. **Energy and Buildings**. v. 28, p. 25-32, 1998.

GOULART, S. V. G.; LAMBERTS, R.; FIRMINO, S. **Dados climáticos para projeto e avaliação energética de edificações para 14 cidades brasileiras**. Edição Núcleo de Pesquisa em Construção Civil. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 1998.

GOULART, S. V. G. **Thermal Inertia and Natural Ventilation: Optimisation of thermal storage as a cooling technique for residential buildings in Southern Brazil**. Oriented by Simos Yannas. London, 2004. 196f. Ph.D. Thesis (Architecture) - Architectural Association School of Architecture, London, 2004.

GÜTHS, S.; PHILIPPI, P.C.; GAVIOT, E.; THERY, P. **Um transdutor de fluxo de calor a gradiente tangencial**. In: CONGRESSO BRASILEIRO EM ENGENHARIA MECÂNICA, 11, 1995, Belo Horizonte. **Anais ...** Belo Horizonte: COBEM, 1995. 1 CD-ROM.

HASSID, S.; GEROS, V. Heat and Mass Transfer Phenomena in Urban Buildings. In: SANTAMOURIS, M. (Ed.). **Environmental Design of Urban Buildings: An Integrated Approach**. London: Earthscan, 2006. p.121 – 145.

HOYT, T.; ZHANG, H., ARENS, E. Draft or Breeze? Preferences for air movement in office buildings and schools from the ASHRAE database. **Center for the Built Environment**, UC Berkeley, Berkeley, California, USA. Disponível em: <<http://escholarship.org/uc/item/99q2f4cf>>. Acesso em: 26 jan 2011.

HUMPHREYS, M. A. Outdoor temperatures and confort indoors. Garston. Watford. **Building Research and Practice**. v. 6, p. 92-105. Mar/Apr. 1978.

INCROPERA, F; DEWITT, D. Transferência de Calor e Massa. Quinta Edição. LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. Rio de Janeiro, 2003.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 7730**: Moderate thermal environments: Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort, 2005.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 13786**: Thermal performance of building components: Dynamic thermal characteristics: Calculation methods, 2007.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 13370**: Thermal performance of buildings: Heat Transfer via the Ground: Calculation methods, 2007.

IRISH CONCRETE FEDERATION. **Thermal Mass & Sustainable Building. Improving Energy Performance and Occupant Comfort**. WALSH, R.; KENNY, P; BROPHY, V. (Ed.). Dublin, 2006.

KOLOKOTRONI, M.; SANTAMOURIS, M. Ventilation for Cooling. In: SANTAMOURIS, M. (Ed.). **Advances in Passive Cooling**. London: Earthscan, 2007. p.140-189.

KUBOTA, T.; CHYEE, D. T. H.; AHMAD, S. The effects of night ventilation technique on indoor thermal environment for residential buildings in hot-humid climate of Malaysia. **Energy and Buildings**. v. 41, p. 829-839, 2009.

LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES. Downloads. **Arquivo climático TRY Florianópolis.xls**. Disponível em <[www.labeee.ufsc.br/downloads](http://www.labeee.ufsc.br/downloads)>. Acesso em: 15 out 2009.

LIPING, W.; HIEN, W. N. The Impacts of Ventilation Strategies and Façade on Indoor Thermal Environment for Naturally Ventilated Residential Buildings in Singapore. **Building and Environment**, v. 42, n. 1, p. 4006-4015, 2007.

MACIAS, M.; MATEO, A.; SCHULER, M.; MITRE, E. M. Application of night cooling concept to social housing design in dry hot climate. **Energy and Buildings**. v. 38, p. 1104-1110, 2006.

MACIEL, A. A. **Centro de Demonstração em Eficiência Energética Eletrosul – CDEEE**. Florianópolis: LABEEE – Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, 2005. (Relatório técnico).

MACIEL, A. A.; ANDRADE, S. F. de; GUGEL, E. C.; BATISTA, J. O.; MARINOSKI, D. L.; LAMBERTS, R. Projeto Casa Eficiente: Demonstração de Eficiência Energética em Habitação Unifamiliar. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2006, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis, 2006. CD-ROM.

MANTELLI NETO, S. L.; BATISTA, J. O.; LAMBERTS, R. Caracterização do ambiente de pesquisas e da estação de monitoramento climático da Casa Eficiente/Florianópolis-SC. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2008, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza, 2008. CD-ROM.

MARTUCCI, R.; BASSO, A. Uma visão integrada da análise e avaliação de conjuntos habitacionais: aspectos metodológicos da pós ocupação e do desempenho tecnológico. **In: Coletânea Habitar, v. 1, Inserção Urbana e Avaliação pós-ocupação.** ABIKO, A. K.; ORNSTEIN, S. W. (Ed.). 2003, p. 269-293.

MIZGIER, M. G. O. **Estimativa de propriedades termofísicas através da análise de sinal natural com modelos de transferência de calor e umidade.** Orientação Roberto Lamberts. Florianópolis, SC. 2008. 224 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

NICOL, F. **Thermal comfort: a handbook for field studies toward an adaptative model.** London: University of East London, 1993.

NICOL, F.; ROAF, S. Progress on Passive Cooling: Adaptative Thermal Comfort and Passive Architecture. In: SANTAMOURIS, M. (Ed.). **Advances in Passive Cooling.** London: Earthscan, 2007. p.1 – 24.

NIMER, E. **Climatologia do Brasil.** Rio de Janeiro: FIBGE, 1979.

ORDENES, M.; LAMBERTS, R.; GHÜTS, S. **Transferência de calor na envolvente da edificação.** Apostila da disciplina Transferência de Calor. Florianópolis: Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, 2008.

PASSOS, I. C. da S. **Clima e arquitetura habitacional em Alagoas: estratégias bioclimáticas para as cidades de Maceió, Palmeira dos Índios e Pão de Açúcar.** Orientação: Gianna M. Barbirato. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo – Mestrado em Dinâmicas do Espaço Habitado, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2009.

PAPST, A. L. **Uso de inércia térmica no clima subtropical: estudo de caso em Florianópolis-SC.** Orientação: Roberto Lamberts. Florianópolis, SC. 1999. 180 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999.

PEDRINI, A. **Desenvolvimento de Metodologia de Calibração de Modelos para Simulações Térmica e Energética de Edificações.** Orientação: Roberto Lamberts. Florianópolis, SC. 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.** Orientação: Enedir Ghisi. Florianópolis, SC. 2009. 140 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

PEETERS, L.; BEAUSOLEIL-MORRISON, I.; NOVOSELAC, A. Internal convective heat transfer modeling: Critical review and discussion of experimentally derived correlations. **Energy and Buildings.** v. 43, p. 2227-2239, 2011.

PINTO, L. da R. **Desempenho térmico de edificações: um programa de simulação computacional utilizando o método da admitância.** Orientação: Lucila Chebel Labaki. Campinas, SP. 2002. 174 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

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, p. 1129-1143, 2003.

PFAFFEROTT, J.; HERKEL, S.; WAPLER, J. Thermal building behaviour in summer: long-term data evaluation using simplified models. **Energy and Buildings.** v. 37, p. 844-852, 2005.

RORIZ, M. **Conforto térmico em edificações: um modelo matemático e uma aplicação.** Orientação: Ualfrido Del Carlo. São Paulo, SP. 1996. 185 f. Tese (Doutorado em Arquitetura) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996.

RORIZ, M. **Bioclimatic zoning of Brazil: a proposal based on the Givoni and Mahoney methods.** In: Proceedings, PLEA 1999: Sustaining the future: Energy-Ecology. Brisbane, Australia, 1999.

RORIZ, M. Flutuações horárias dos limites de conforto térmico: uma hipótese de modelo adaptativo. In: ENCAC/COTEDI, 7. **Anais...** Curitiba: ANTAC, 2003, p. 338 - 345.

RORIZ, M. ZBBR – Classificação Bioclimática dos Municípios Brasileiros. São Carlos: RORIZ, M., 2004. Disponível em: <[www.labeee.ufsc.br/downloads](http://www.labeee.ufsc.br/downloads)>. Acesso em: 15 out 2010.

SANTAMOURIS, M; ASIMAKOPOULOS, D. **Passive cooling of buildings.** James & James Science Publishers, 1996.

SANTAMOURIS, M; MIHALAKAKOU, G.; ARGIROU, A.; ASIMAKOPOULOS, D. On the efficiency of night ventilation techniques for thermostatically controlled buildings. **Solar Energy**, v.60, n. 6, p. 479-483, 1996.

SANTAMOURIS, M. Prediction methods. In: ALLARD, F. (Ed.). **Natural Ventilation in Buildings: A Design Handbook.** London: James & James Science Publishers, 1998. p.63-158.

SANTAMOURIS, M. Passive Cooling of Buildings. In: ISES. **Advances of Solar Energy.** London: James and James Science Publishers, 2005, p. 1-57.

SANTAMOURIS, M.; SFAKIANAKI, A.; PAVLOU, K. On the efficiency of night ventilation techniques applied to residential buildings. **Energy and Buildings**, v. 42, p. 1309-1313, 2010.

SCHMID, A. L. **A Idéia de Conforto: reflexões sobre o ambiente construído.** Curitiba: Pacto Ambiental, 2005.

SEEM, J. E. **Modeling of heat transfer in buildings.** London, 2004. 196f. Ph.D. Thesis (Mechanical Engineering) – University of Wisconsin, Madison, 1987.

SHAVIV, E.; YEZIORO, A.; CAPELUTO, I. G. Thermal mass and night ventilation as passive cooling design strategy. **Renewable Energy**, n. 24, p. 445-452, 2001.

SORGATO, M. J. **Desempenho Térmico de Edificações Residenciais Unifamiliares Ventiladas Naturalmente**. Orientação: Roberto Lamberts. Florianópolis, SC. 2009. 216 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

SZOKOLAY, S. **Dilemmas of warm-humid climate house design: heavy vs. lightweight + cooling effect of air movement**. In: Architecture, City, Environment – PLEA 2000, Cambridge, UK, James & James Ltd., 2000.

SZOKOLAY, S. V. **Introduction to Architectural Science: The Basis of Sustainable Design**. 2. ed. Oxford: Architectural Press, 2008.

TNO Building Research. **Cp Generator**. Disponível em: <<http://cpgen.bouw.tno.nl/cp>>. Acesso em: 30 ago. 2010.

TOFTUM, 2004, BITENCOURT; CÂNDIDO, 2006, TYLER; ZHANG; ARENS, 2009,

TOFTUM, J. Air movement – good or bad? **Indoor Air**. v. 14, p. 40-45, 2004.

TOLEDO, A. M. 2006. 336 f. **Avaliação do desempenho da ventilação natural pela ação do vento em apartamentos: uma aplicação em Maceió/al**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

TSI INCORPORATED. **Model 8372/73 ACCUBALANCE®Plus Air Capture Hood. Operation and Service Manual**. TSI, 2002.

UNDERWOOD, C. P.; YIK, F. H. W. **Modelling Methods for Energy in Buildings**. Oxford: Blackwell, 2004.

VERSAGE, R. de S. **Equações prescritivas para o regulamento de etiquetagem de eficiência energética de edificações residenciais**. RT\_LABEEE-2011/03. Florianópolis: Labeee, 2011. 72 p. Disponível em:

<[http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/projetos/etiquetagem/RT\\_LABEEE\\_2011-03%20-%20Equacoes%20Prescritivas.pdf](http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/projetos/etiquetagem/RT_LABEEE_2011-03%20-%20Equacoes%20Prescritivas.pdf)>. Acesso em: 15 out. 2011.

WATSON, D; LABS, K. **Climatic Building Design: Energy- efficient building principles and practice**. McGraw-Hill book Company, 1983.

WESTPHAL, F. S. 2007. 147 f. **Análise de Incertezas e de Sensibilidade Aplicadas à Simulação de Desempenho Energético de Edificações Comerciais**. (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

XAVIER, A.A. de P. 2000. 247f. **Predição de conforto térmico em ambientes internos com atividades sedentárias: teoria física aplicada a estudos de campo**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.

YANG, L.; LI, Y. Cooling load reduction by using thermal mass and night ventilation. **Energy and Buildings**. v. 40, p. 2052-2058, 200.

**APÊNDICE I**

**FLUXOS DE CALOR E TEMPERATURAS SUPERFICIAIS**

**APÊNDICE II**

**BALANÇOS TÉRMICOS DAS SUPERFÍCIES INTERNAS**

**APÊNDICE III**

**ESTIMATIVA DOS COEFICIENTES DE CONVECÇÃO  
FORÇADA DURANTE O EMPREGO DA VENTILAÇÃO  
MECÂNICA NOTURNA**

**APÊNDICE IV**

**BALANÇOS TÉRMICOS DOS MODELOS COM INÉRCIA  
BAIXA E INÉRCIA MÉDIA**

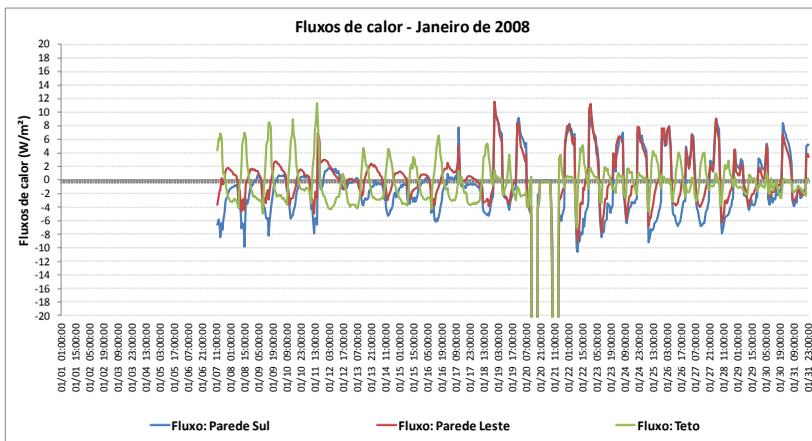
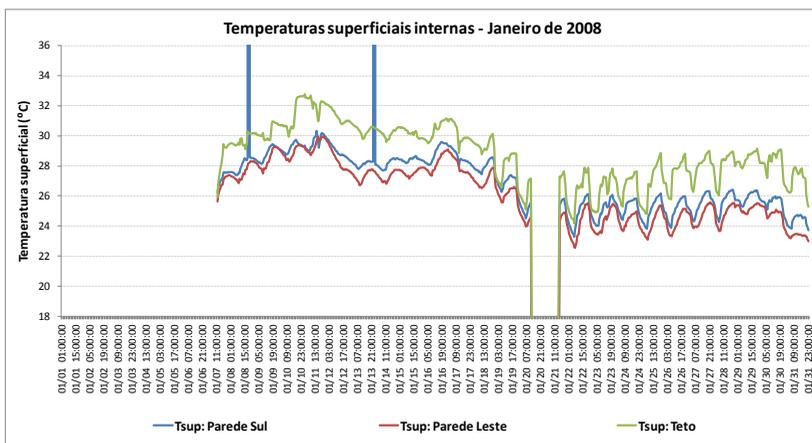


## APÊNDICE I

### FLUXOS DE CALOR E TEMPERATURAS SUPERFICIAIS

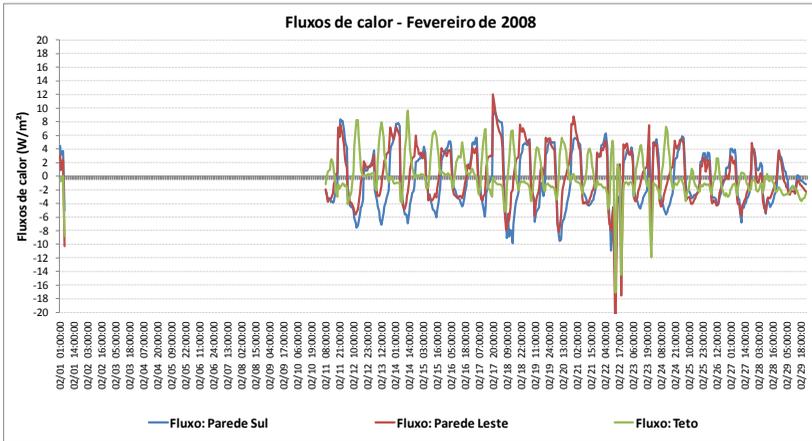
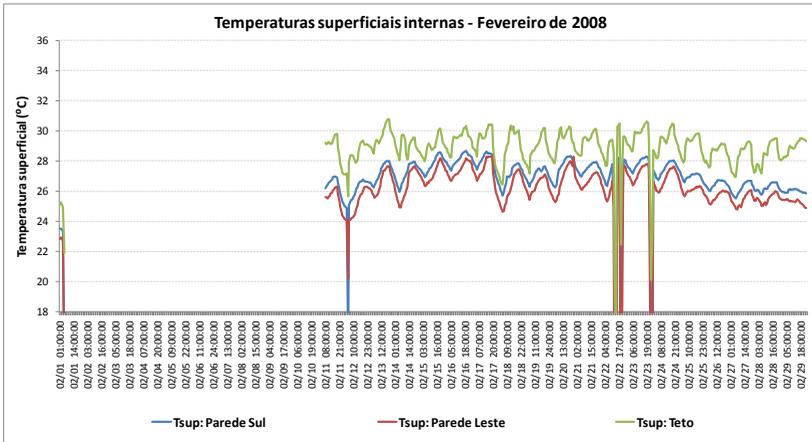
#### APÊNDICE I-A:

#### FLUXOS DE CALOR E TEMPERATURAS SUPERFICIAIS MONITORAMENTO IN LOCO – JANEIRO DE 2008

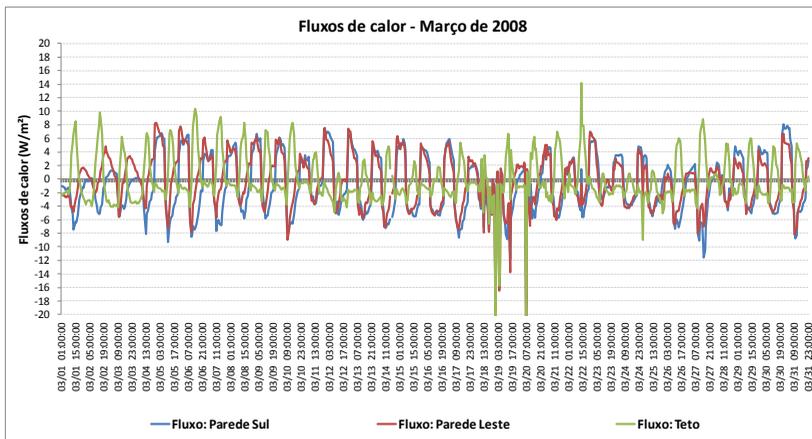
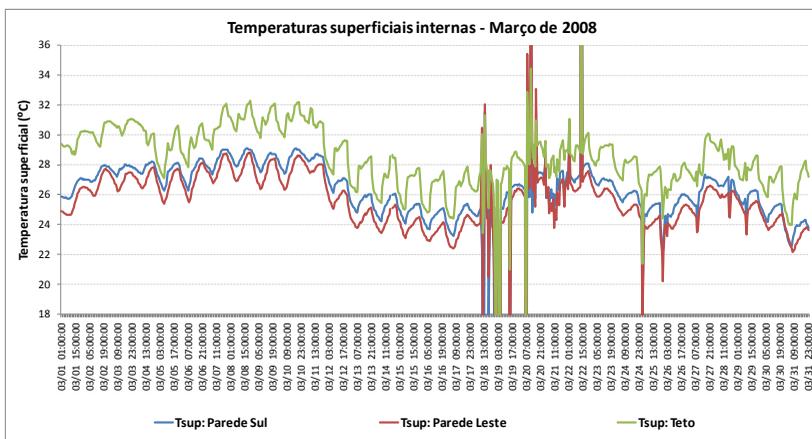


APÊNDICE I-B:

FLUXOS DE CALOR E TEMPERATURAS SUPERFICIAIS  
 MONITORAMENTO IN LOCO – FEVEREIRO DE 2008

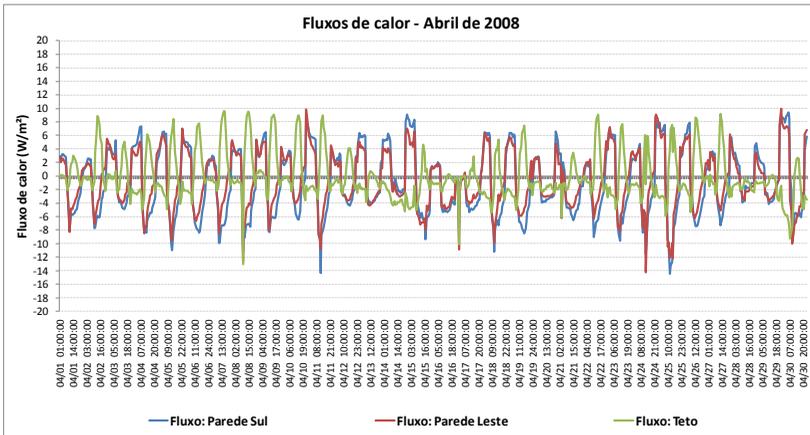
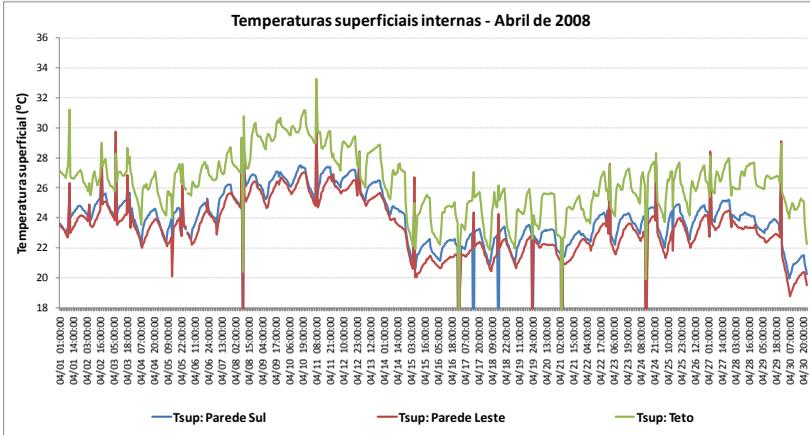


## APÊNDICE I-C:

FLUXOS DE CALOR E TEMPERATURAS SUPERFICIAIS  
MONITORAMENTO IN LOCO – MARÇO DE 2008

APÊNDICE I-D:

FLUXOS DE CALOR E TEMPERATURAS SUPERFICIAIS  
 MONITORAMENTO IN LOCO – ABRIL DE 2008



## APÊNDICE II

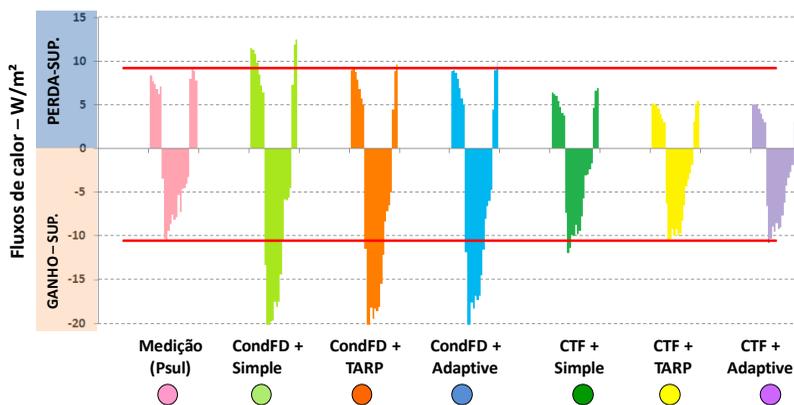
### BALANÇOS TÉRMICOS DAS SUPERFÍCIES INTERNAS:

#### APÊNDICE II-A:

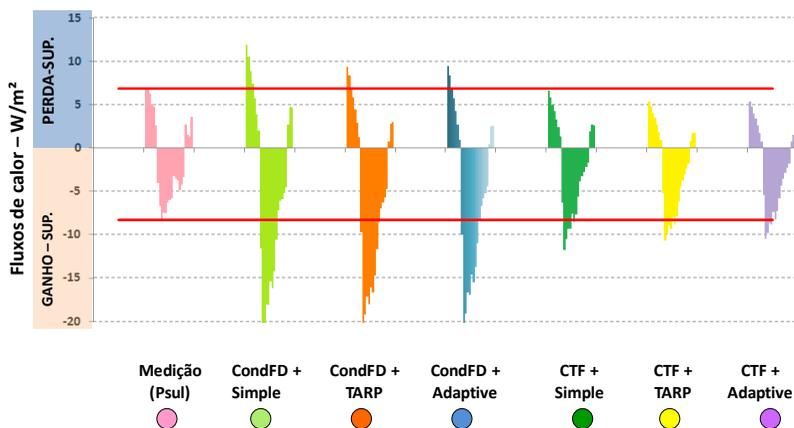
PAREDE SUL – QUARTO DE CASAL

MONITORAMENTO X SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

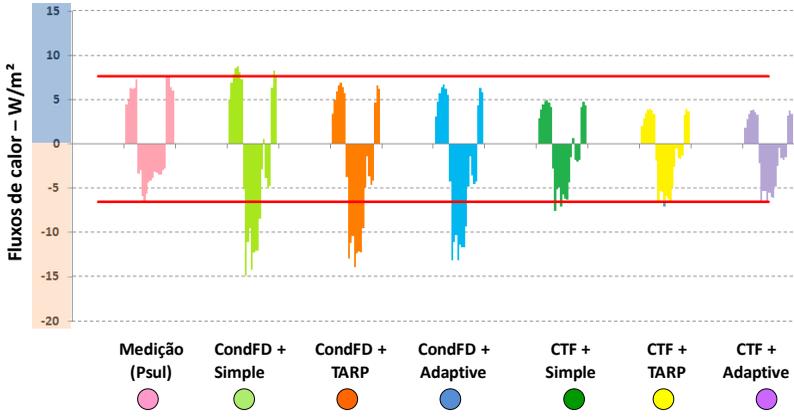
DIA 22/01/2008



DIA 23/01/2008

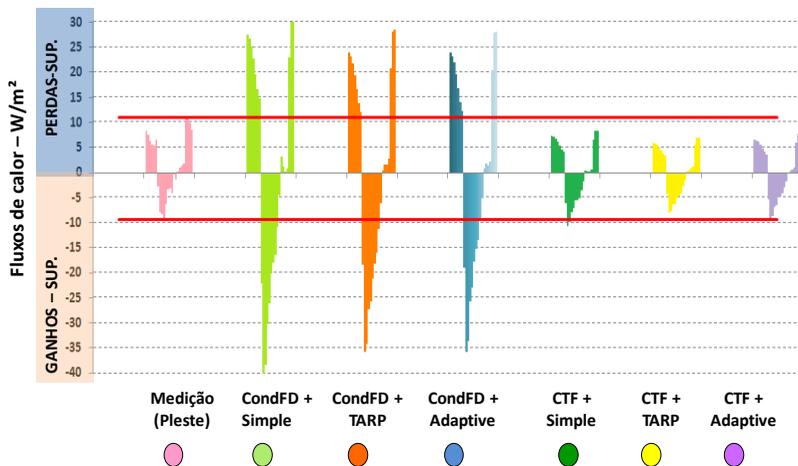


DIA 24/01/2008

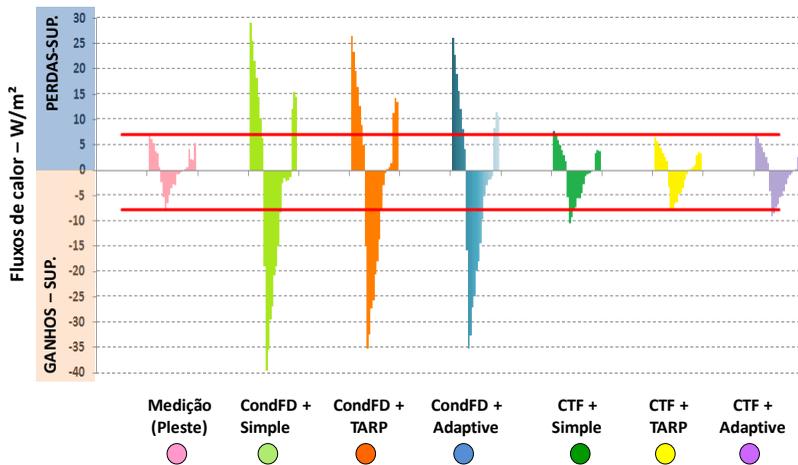


## APÊNDICE II-B: PAREDE LESTE – QUARTO DE CASAL MONITORAMENTO X SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

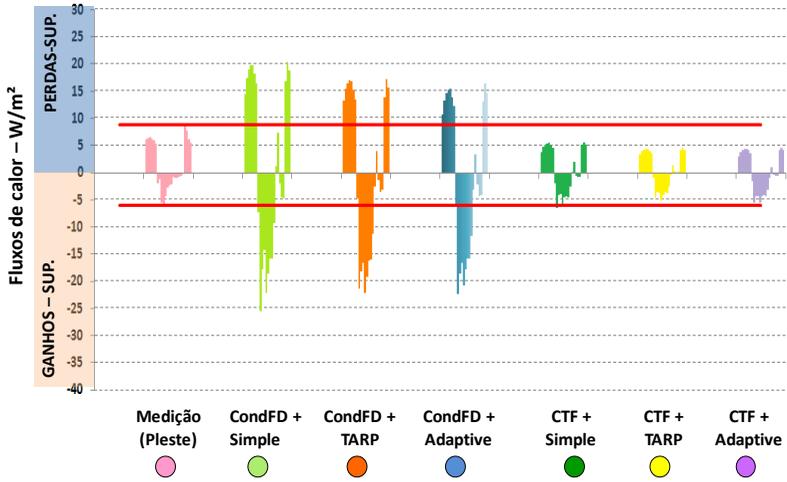
DIA 22/01/2008



DIA 23/01/2008

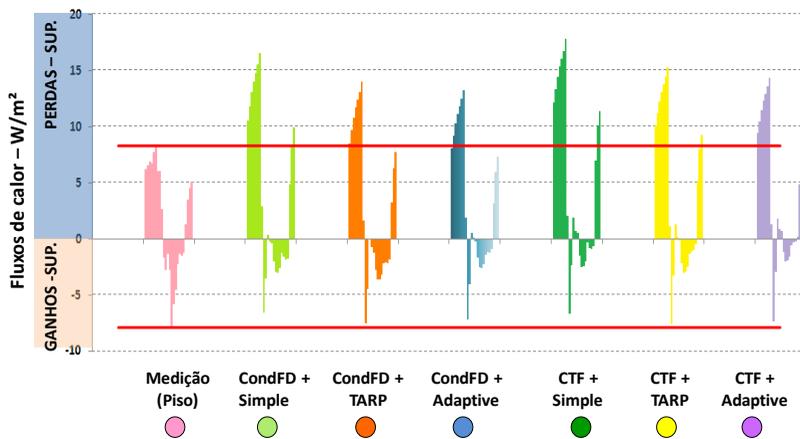


DIA 24/01/2008

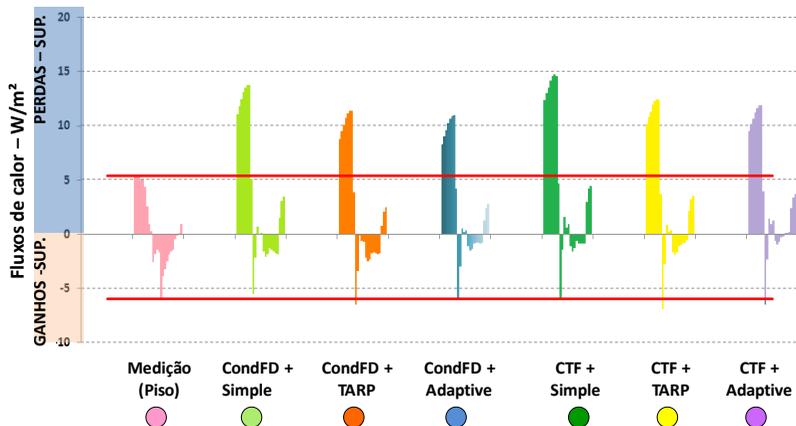


## APÊNDICE II-C: PISO – SALA DE JANTAR MONITORAMENTO X SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

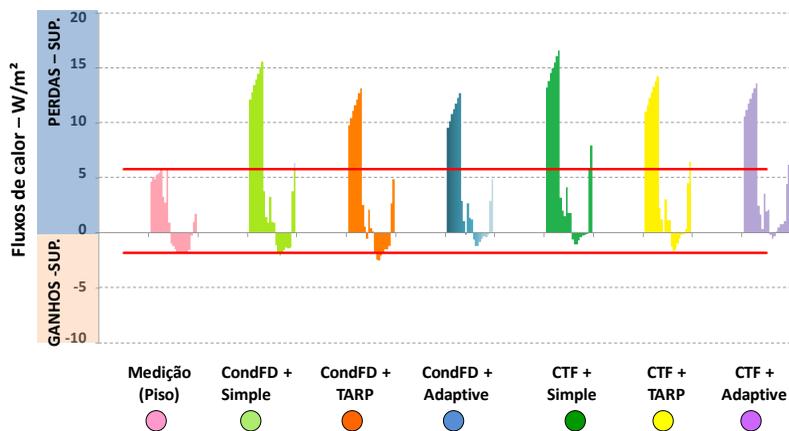
DIA 22/01/2008



DIA 23/01/2008



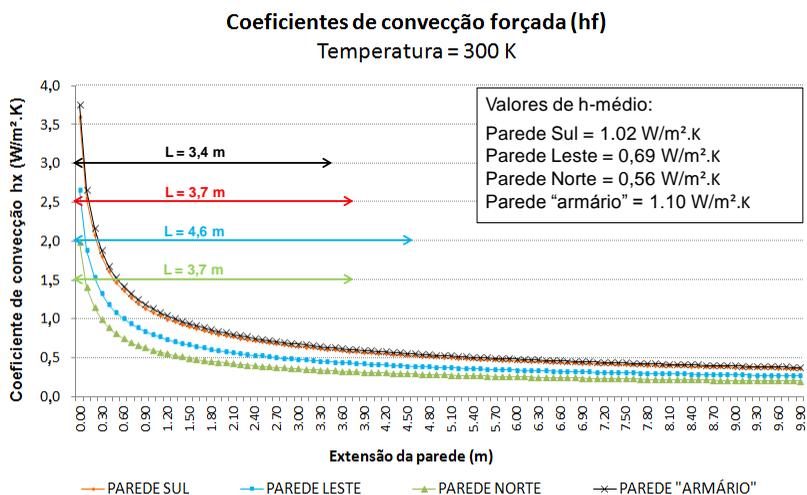
DIA 24/01/2008



## APÊNDICE III

### ESTIMATIVA DOS COEFICIENTES DE CONVECÇÃO FORÇADA DURANTE O EMPREGO DA VENTILAÇÃO MECÂNICA NOTURNA

Os valores do coeficiente de convecção forçada calculados a partir dos dados do monitoramento *in loco* da Casa Eficiente correspondem ao coeficiente médio estimado de acordo com a dimensão característica de cada parede (L). O coeficiente médio equivale à média aritmética dos coeficientes de convecção localizada ( $h_f$ ) correspondentes a cada parede, os quais foram calculados a partir das equações III.1, III.2 e III.3.



#### Parâmetros utilizados nas estimativas:

$$h_f = \frac{4,86 \cdot Vel^{0,8}}{x^{0,2}} \quad \text{Se } Re_L > 5 \cdot 10^5, \text{ fluxo turbulento} \quad \text{Equação III.1}$$

$$h_f = 1,98 \cdot \left( \frac{Vel}{x} \right)^{0,5} \quad \text{Se } Re_L < 5 \cdot 10^5, \text{ fluxo laminar} \quad \text{Equação III.2}$$

$$Re_L = \frac{\rho \cdot Vel \cdot x}{\mu} \quad \text{Equação III.3}$$

onde:

$h_f$  = Coeficiente de convecção forçada no ponto  $x$  da superfície;

Vel = Velocidade do ar próximo à superfície (m/s);

$x$  = Ponto de referência para o cálculo do coeficiente de convecção local (m);

$Re_L$  = Número de Reynolds (adimensional);

$\rho$  = Densidade do ar ( $1,1614 \text{ kg/m}^3$ );

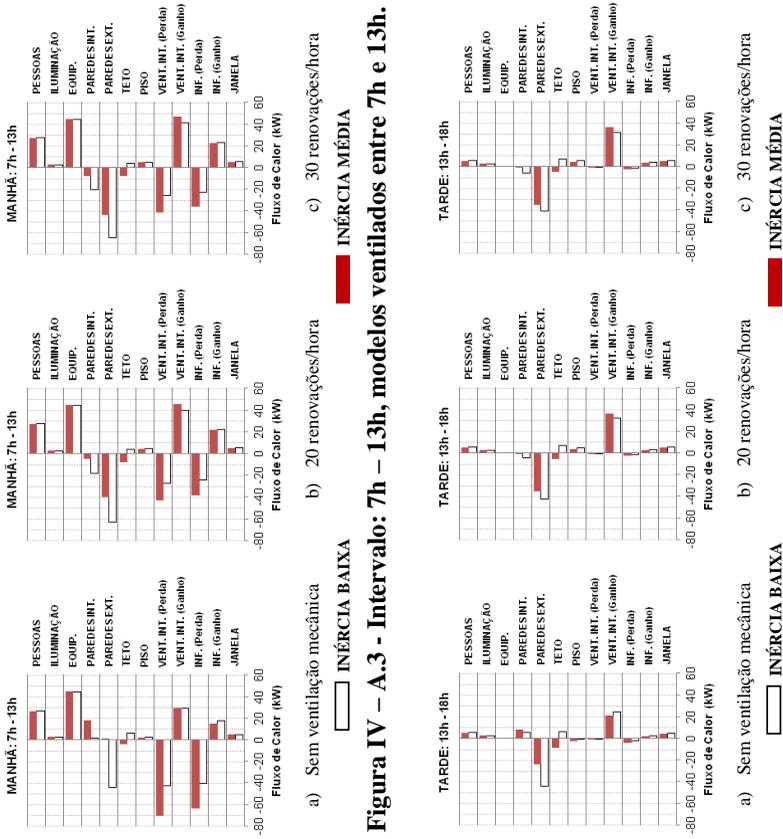
$\mu$  = Viscosidade do ar ( $1,846 \cdot 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{s/m}^2$ )

$\nu$  = Viscosidade cinemática do ar ( $1,59 \cdot 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{s/m}^2$ ).



# IV-A: BALANÇOS TÉRMICOS DOS MODELOS COM INÉRCIA BAIXA E INÉRCIA MÉDIA (Continuação)

INTERVALO: 7H ÀS 13H

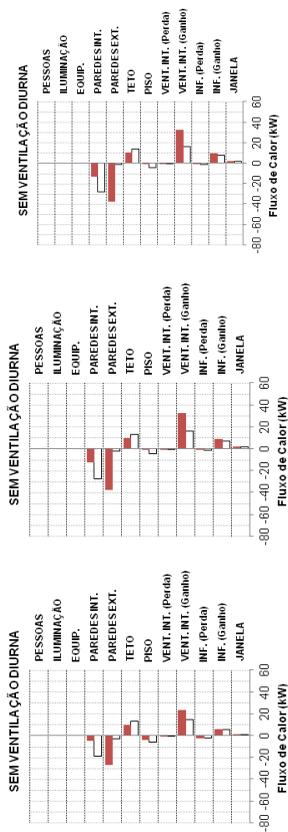


**Figura IV – A.3 - Intervalo: 7h – 13h, modelos ventilados entre 7h e 13h.**

**Figura IV – A.4 - Intervalo: 7h – 13h, modelos ventilados entre 13h e 18h.**

## IV-B: BALANÇOS TÉRMICOS DOS MODELOS COM INÉRCIA BAIXA E INÉRCIA MÉDIA

INTERVALO: 13H ÀS 18H



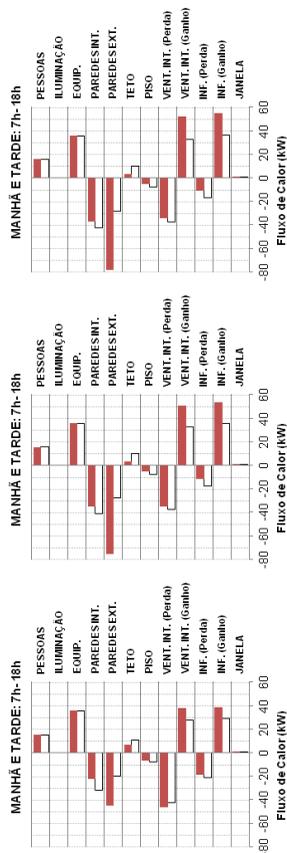
b) 20 renovações/hora

c) 30 renovações/hora

□ INÉRCIA BAIXA

■ INÉRCIA MÉDIA

**Figura IV – B.1 - Intervalo: 13h – 18h, modelos sem ventilação diurna.**



b) 20 renovações/hora

c) 30 renovações/hora

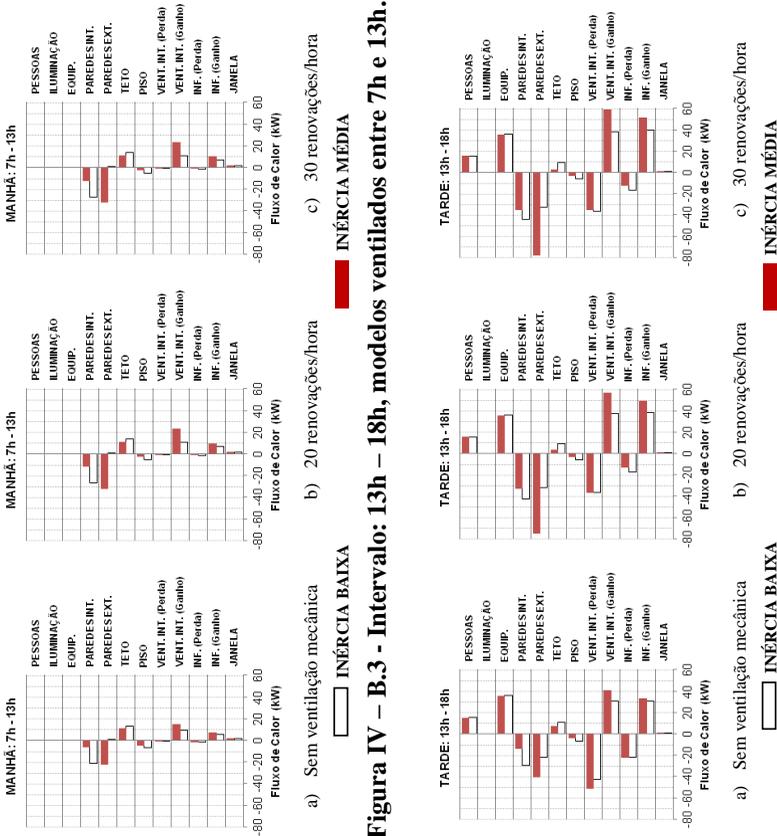
□ INÉRCIA BAIXA

■ INÉRCIA MÉDIA

**Figura IV – B.2 - Intervalo: 13h – 18h, modelos ventilados entre as 7h e 18h.**

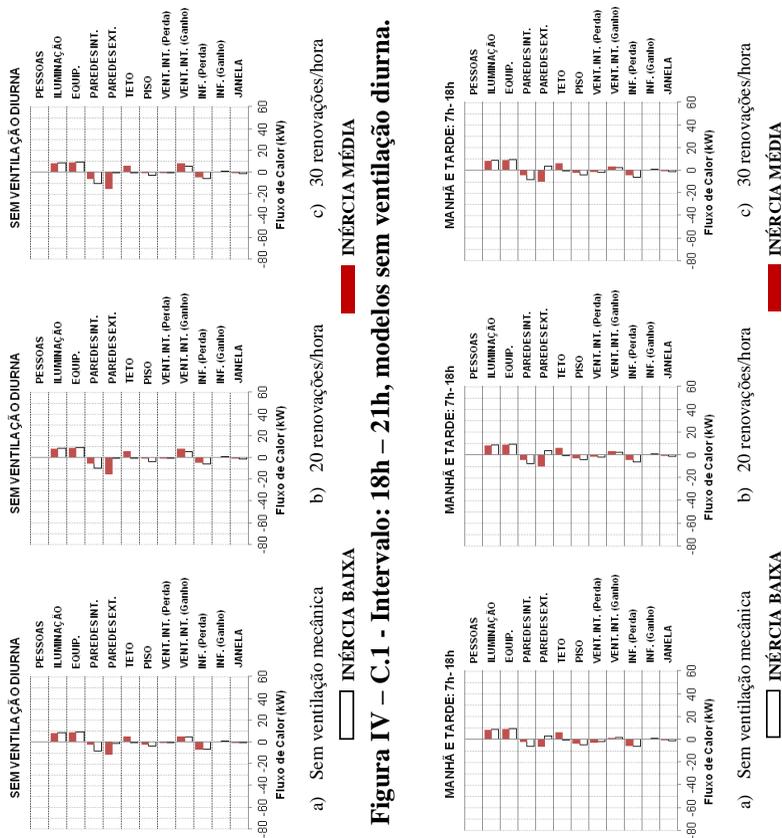
## IV-B: BALANÇOS TÉRMICOS DOS MODELOS COM INÉRCIA BAIXA E INÉRCIA MÉDIA (Continuação)

INTERVALO: 13H ÀS 18H



## IV-C: BALANÇOS TÉRMICOS DOS MODELOS COM INÉRCIA BAIXA E INÉRCIA MÉDIA

INTERVALO: 18H ÀS 21H

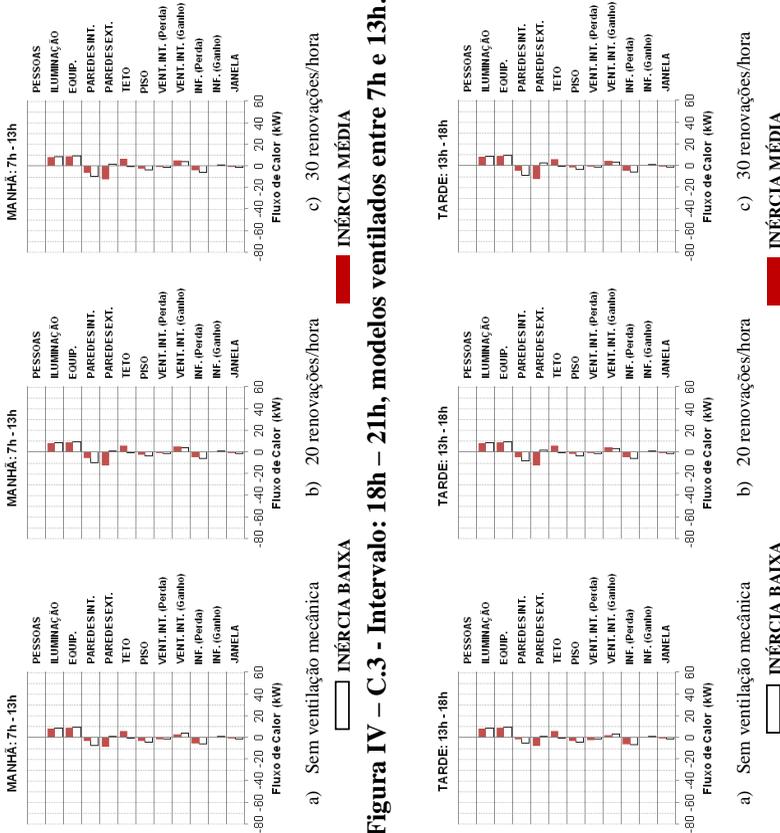


**Figura IV – C.1 - Intervalo: 18h – 21h, modelos sem ventilação diurna.**

**Figura IV – C.2 - Intervalo: 18h – 21h, modelos ventilados entre as 7h e 18h.**

# IV-C: BALANÇOS TÉRMICOS DOS MODELOS COM INÉRCIA BAIXA E INÉRCIA MÉDIA (Continuação)

INTERVALO: 18H ÀS 21H



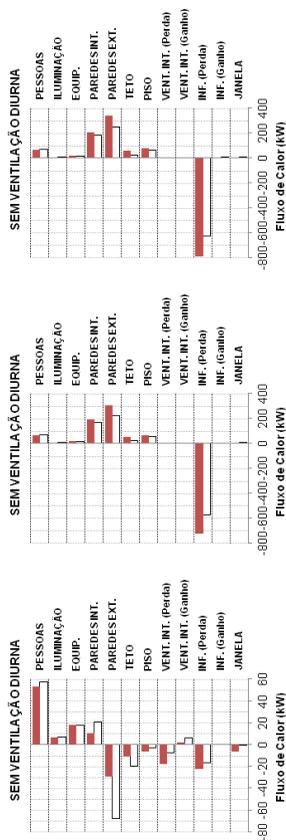
a) Sem ventilação mecânica  
 b) 20 renovações/hora  
 c) 30 renovações/hora  
 INÉRCIA BAIXA  
 INÉRCIA MÉDIA

Figura IV – C.3 - Intervalo: 18h – 21h, modelos ventilados entre 7h e 13h.

Figura IV – C.4 - Intervalo: 18h – 21h, modelos ventilados entre 13h e 18h.

## IV-D: BALANÇOS TÉRMICOS DOS MODELOS COM INÉRCIA BAIXA E INÉRCIA MÉDIA

INTERVALO: 21H ÀS 7H



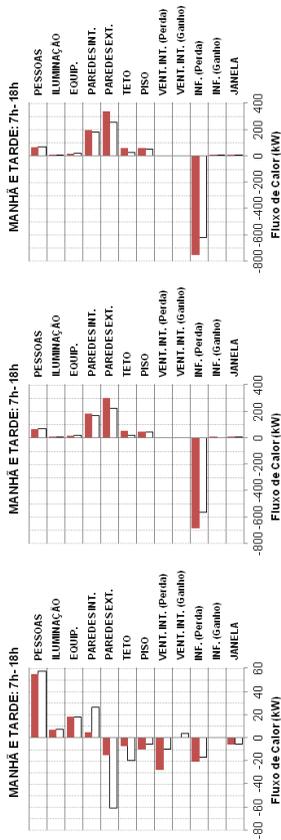
a) Sem ventilação mecânica

□ INÉRCIA BAIXA

b) 20 renovações/hora

■ INÉRCIA MÉDIA

**Figura IV - D.1 - Intervalo: 21h - 7h, modelos sem ventilação diurna.**



a) Sem ventilação mecânica

□ INÉRCIA BAIXA

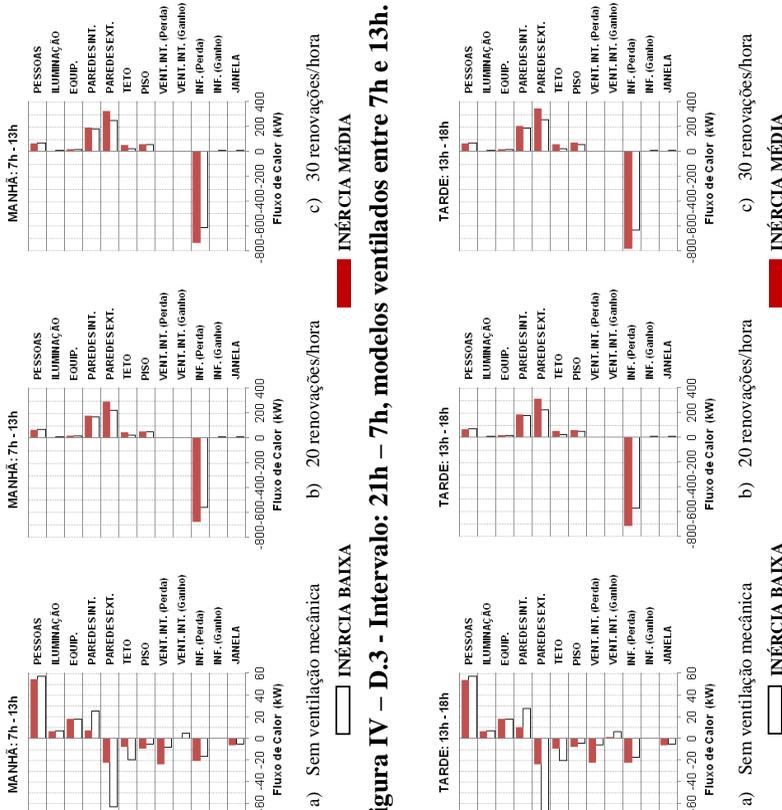
b) 20 renovações/hora

■ INÉRCIA MÉDIA

**Figura IV - D.2 - Intervalo: 21h - 7h, modelos ventilados entre as 7h e 18h.**

# IV-D: BALANÇOS TÉRMICOS DOS MODELOS COM INÉRCIA BAIXA E INÉRCIA MÉDIA (Continuação)

INTERVALO: 21H ÀS 7H



**Figura IV – D.3 - Intervalo: 21h – 7h, modelos ventilados entre 7h e 13h.**

**Figura IV – D.4 - Intervalo: 21h – 7h, modelos ventilados entre 13h e 18h.**