

**A INFLUÊNCIA DO ENVELOPE NO
DESEMPENHO TÉRMICO DE EDIFICAÇÕES
RESIDENCIAIS UNIFAMILIARES OCUPADAS
E VENTILADAS NATURALMENTE**

CLÁUDIA DONALD PEREIRA

Dissertação de Mestrado

Orientador: Prof. Enedir Ghisi, PhD

Florianópolis, 2009

CLÁUDIA DONALD PEREIRA

Universidade Federal de Santa Catarina
Departamento de Engenharia Civil
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

**A INFLUÊNCIA DO ENVELOPE NO
DESEMPENHO TÉRMICO DE EDIFICAÇÕES
RESIDENCIAIS UNIFAMILIARES OCUPADAS E
VENTILADAS NATURALMENTE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. EneDir Ghisi, PhD

Florianópolis

2009

Cláudia Donald Pereira

**A Influência do Envelope no Desempenho Térmico de Edificações
Residenciais Unifamiliares Ocupadas e Ventiladas Naturalmente**

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação.

Prof. Glicério Trichês, Dr. – Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Prof. EneDir Ghisi, *Ph.D.* – Orientador

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Aldomar Pedrini, *Ph.D.* (UFRN) – Membro

Prof. Roberto Lamberts, *Ph.D.* (UFSC) – Membro

Profa. Solange Virginia Galarça Goulart, *Ph.D.* (UFSC) – Membro

Florianópolis, 27 de fevereiro de 2009

“O coração do homem traça o seu caminho, mas o Senhor lhe dirige os passos.” (Provérbios 16:9)

AGRADECIMENTOS

A Deus, Autor e Senhor da minha vida, que me guiou e conduziu em toda essa caminhada.

À minha família, especialmente meus pais, Nehemias e Ilma, que em todo o tempo apoiaram meus sonhos e planos, oraram por mim, e estiveram sempre presentes, apesar da distância.

Ao meu amado Gabriel, que fez minha vinda a Florianópolis ter um sentido muito maior e mais especial.

À família do Gabriel, que tem sido minha família em Florianópolis.

Ao meu orientador, Eneir Ghisi, sempre presente e pronto a ajudar.

Ao professor Roberto Lamberts, que possibilitou minha participação nas pesquisas da Casa Eficiente, e me ajudou em diversos momentos.

A todos os amigos do LabEEE, que passaram por ali entre 2006 e 2008, e de alguma forma colaboraram, me oferecendo seu apoio e amizade.

Ao Miguel Pacheco, que além da sua amizade, me ofereceu sua ajuda em diversos momentos, como na tradução de alguns textos.

Aos amigos de Maringá que permaneceram presentes na minha vida, independente da distância física.

Aos amigos da Igreja Presbiteriana na Trindade, que me acolheram e oraram por mim.

Ao Lepten, que colaborou com o fornecimento dos dados climáticos.

À Eletrosul e Eletrobrás, que permitiram minha participação nos estudos com a Casa Eficiente, e financiaram minha pesquisa.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	VII
LISTA DE TABELAS	XII
RESUMO.....	XIV
ABSTRACT	XV
CAPÍTULO 1.....	1
1. INTRODUÇÃO.....	2
1.1. <i>Apresentação do Problema e Justificativa</i>	2
1.2. <i>Objetivos</i>	7
1.2.1. <i>Objetivo Geral</i>	7
1.2.2. <i>Objetivos Específicos</i>	7
1.3. <i>Estrutura do Trabalho</i>	7
CAPÍTULO 2.....	9
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	10
2.1. <i>Avaliação do Desempenho Térmico de Edificações</i>	10
2.1.1. <i>Métodos Internacionais</i>	10
2.1.2. <i>Métodos Brasileiros</i>	14
2.2. <i>Estudo do Desempenho Térmico do Envelope Sem Considerar a Ventilação Natural</i>	17
2.3. <i>Estudo do Desempenho Térmico do Envelope Considerando a Ventilação Natural</i>	22
2.4. <i>Avaliação de Desempenho Térmico Utilizando Simulação Computacional</i>	24
2.5. <i>Considerações Finais</i>	27
CAPÍTULO 3.....	28
3. MÉTODO	29
3.1. <i>Monitoramento da Edificação</i>	29
3.1.1. <i>Descrição da Edificação Monitorada</i>	29
3.1.2. <i>Períodos de Monitoramento</i>	34
3.1.3. <i>Variáveis Monitoradas</i>	34
3.2. <i>Simulação Computacional</i>	36
3.2.1. <i>Calibração do Modelo para Simulação</i>	37
3.2.1.1. <i>Descrição do Modelo Inicial Para Calibração</i>	38
3.2.1.2. <i>Ajustes no Modelo</i>	50
3.2.1.3. <i>Critérios para a Calibração</i>	53
3.2.2. <i>Definição do Modelo de Referência para as Simulações</i>	55
3.2.2.1. <i>Geometria</i>	55

3.2.2.2. Temperatura do Solo	56
3.2.2.3. Materiais.....	56
3.2.2.4. Cargas Térmicas Internas	58
3.2.2.5. Trocas de Ar.....	58
3.2.3. Variações no Modelo de Referência	58
3.2.3.1. Variação da Ventilação	58
3.2.3.2. Variação da Ocupação (Cargas Térmicas Internas)	60
3.2.3.3. Variações de Propriedades Térmicas do Envelope	62
3.2.4. Tratamento dos Dados Finais.....	65
CAPÍTULO 4.....	68
4. RESULTADOS.....	69
4.1. <i>Calibração do Modelo para Simulação</i>	69
4.1.1. Simulações Sem Ventilação	70
4.1.1.1. Resultados para o mês de Dezembro de 2007	70
4.1.1.2. Resultados para o mês de Agosto de 2007	74
4.1.2. Simulações Com Ventilação.....	77
4.1.2.1. Resultados para o mês de Janeiro de 2008.....	77
4.1.2.2. Resultados para o mês de Setembro de 2007	80
4.2. <i>Análises das Simulações de Desempenho Térmico</i>	82
4.2.1. Análises de Correlação.....	89
4.2.2. Análise das Trocas Térmicas	92
CAPÍTULO 5.....	98
5. CONCLUSÃO	99
5.1. <i>Limitações do Trabalho</i>	101
5.2. <i>Sugestões para Trabalhos Futuros</i>	101
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	103
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	104
APÊNDICES.....	108
APÊNDICE A – PLANTA E CORTES DA EDIFICAÇÃO ESTUDADA.	109
APÊNDICE B – GRÁFICOS DA CALIBRAÇÃO: MÊS DE DEZEMBRO	111
APÊNDICE C – GRÁFICOS DA CALIBRAÇÃO: MÊS DE AGOSTO	113
APÊNDICE D – GRÁFICOS DA CALIBRAÇÃO: MÊS DE JANEIRO	116
APÊNDICE E – GRÁFICOS DA CALIBRAÇÃO: MÊS DE SETEMBRO	117
APÊNDICE F – RESULTADOS DE DESEMPENHO TÉRMICO DA SALA	119

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Mapa do Brasil indicando a cidade de Florianópolis – SC.	4
Figura 1.2 – Gráfico de temperaturas médias mensais de Florianópolis, segundo as normais climatológicas de 1961 a 1990.	5
Figura 1.3 – Gráfico de temperaturas médias mensais do ano climático de referência de Florianópolis.	5
Figura 1.4 – Carta Bioclimática gerada no Analysis Bio, com dados do ano climático de referência de Florianópolis.	6
Figura 2.1 – Zonas de conforto de verão e inverno da ASHRAE.	12
Figura 2.2 – Zona de Conforto de Givoni adaptada para climas quentes.	13
Figura 2.3 – Método adaptativo – zona de conforto para edifícios naturalmente ventilados.	14
Figura 3.1 – Localização da residência monitorada na cidade de Florianópolis.	30
Figura 3.2 – Implantação da residência no pátio da Sede da Eletrosul.	31
Figura 3.3 – Planta Baixa da residência.	31
Figura 3.4 – Fotografias da residência – fachada Sul.	32
Figura 3.5 – Fotografia da residência – fachadas Norte e Oeste.	32
Figura 3.6 – Planta de cobertura da residência.	33
Figura 3.7 – Hobos U12 <i>data logger</i> - Onset Computer Corporation.	35
Figura 3.8 – Planta baixa da edificação com indicação dos pontos de medição da temperatura utilizando Hobos.	36
Figura 3.9 – Perspectivas do modelo de calibração da simulação: fachadas oeste e sul (a), e leste e norte (b).	38
Figura 3.10 – Plantas do modelo de calibração da simulação: térreo (a) e superior (b).	39
Figura 3.11 – Esquema dos dois tipos de parede do modelo de calibração: dupla (a) e simples (b).	41
Figura 3.12 – Esquema dos tipos de cobertura do modelo de calibração: telha cerâmica (a), telha metálica (b), teto jardim (c), teto jardim + laje de concreto (d).	43

Figura 3.13 – Ocupação da casa – período de monitoramento em agosto de 2007.....	45
Figura 3.14 – Ocupação da casa – período de monitoramento em setembro de 2007.....	46
Figura 3.15 – Ocupação da casa – período de monitoramento em janeiro de 2008.....	47
Figura 3.16 – Esquema das Persianas.....	49
Figura 3.17 – Perspectiva do modelo de calibração com alteração na volumetria da cobertura.....	51
Figura 3.18 – Equipamento Alta II.....	52
Figura 3.19 – Perspectiva do modelo base.....	56
Figura 3.20 – Ocupação do modelo – dias úteis e finais de semana.....	60
Figura 3.21 – Combinações de componentes do envelope, totalizando 12 variações.....	63
Figura 4.1 – Comparação entre simulação 1 (modelo inicial) e medição em dezembro/2007.....	70
Figura 4.2 – Comparação entre simulação 2 (alteração na temperatura do solo) e medição em dezembro/2007.....	71
Figura 4.3 – Comparação entre simulação 9 (alteração na infiltração de ar) e medição em dezembro/2007.....	73
Figura 4.4 – Comparação entre simulação 1 (modelo inicial) e medição em agosto/2007.....	74
Figura 4.5 – Comparação entre simulação 9 (alteração na infiltração de ar) e medição em agosto/2007.....	75
Figura 4.6 – Corte da sala: Hobos utilizados para verificação de estratificação na temperatura do ar.....	76
Figura 4.7 – Gráfico de temperaturas do ar: dias 2 a 5/11/2008.....	77
Figura 4.8 – Comparação entre simulação 9 (alteração na infiltração de ar) e medição em janeiro/2008.....	78
Figura 4.9 – Comparação entre simulação 13 (expoente da velocidade do vento = 0,5) e medição em janeiro/2008.....	80
Figura 4.10 – Comparação entre simulação 13 (expoente da velocidade do vento = 0,5) e medição em setembro/2007.....	81
Figura 4.11 – Esquema das simulações finais realizadas.....	82

Figura 4.12 – Carta bioclimática gerada no programa Analysis Bio, para	84
Figura 4.13 – Porcentagens de horas de desconforto anuais no quarto de casal relacionadas à transmitância térmica equivalente.	86
Figura 4.14 – Porcentagens de horas de desconforto anuais no quarto de casal relacionadas à capacidade térmica equivalente.	86
Figura 4.15 – Porcentagens de horas de desconforto anuais no quarto de casal relacionadas ao atraso térmico equivalente.....	86
Figura 4.16 – Porcentagens de horas de desconforto no verão no quarto de casal relacionadas à transmitância térmica equivalente.	88
Figura 4.17 – Porcentagens de horas de desconforto no verão no quarto de casal relacionadas à capacidade térmica equivalente.....	88
Figura 4.18 – Porcentagens de horas de desconforto no verão no quarto de casal relacionadas ao atraso térmico equivalente.	88
Figura 4.19 – Correlação entre a porcentagem de horas de desconforto e as propriedades térmicas da cobertura do quarto de casal: transmitância térmica (a), capacidade térmica (b), e atraso térmico (c).....	89
Figura 4.20 – Correlação entre a porcentagem de horas de desconforto e as propriedades térmicas da parede do quarto de casal: transmitância térmica (a), capacidade térmica (b), e atraso térmico (c).	90
Figura 4.21 – Correlação entre a porcentagem de horas de desconforto e as propriedades térmicas equivalentes do quarto de casal: transmitância térmica (a), capacidade térmica (b), e atraso térmico (c).....	91
Figura 4.22 – Trocas de calor do quarto de casal – Modelo Referência sem ventilação e ocupação, nos dias 3 a 9 de janeiro.	93
Figura 4.23 – Trocas de calor do quarto de casal – Modelo Referência com ventilação e ocupação, nos dias 3 a 9 de janeiro.	93
Figura 4.24 – Temperatura do ar no exterior e no quarto – Modelo Referência:	94
Figura 4.25 – Trocas de calor do quarto de casal – Variação Parede 6 sem ventilação e ocupação.	96
Figura 4.26 – Trocas de calor do quarto de casal – Variação Parede 6 com ventilação e ocupação.	96
Figura 4.27 – Temperatura do ar no exterior e no quarto – Variação Parede 6:	97

Figura A.1 – Planta baixa.	109
Figura A.2 – Corte AA.	110
Figura A.3 – Corte BB.	110
Figura B.1 – Comparação entre simulação 3 (alteração na volumetria da cobertura) e medição em dezembro/2007.	111
Figura B.2 – Comparação entre simulação 4 (resistência térmica - 10%) e medição em dezembro/2007.	111
Figura B.3 – Comparação entre simulação 5 (resistência térmica + 10%) e medição em dezembro/2007.	111
Figura B.4 – Comparação entre simulação 6 (resistência térmica + 20%) e medição em dezembro/2007.	112
Figura B.5 – Comparação entre simulação 7 (alteração na absorvância) e medição em dezembro/2007.	112
Figura B.6 – Comparação entre simulação 8 (alteração no ganho de calor por equipamentos) e medição em dezembro/2007.	112
Figura C.1 – Comparação entre simulação 2 (alteração na temperatura do solo) e medição em agosto/2007.	113
Figura C.2 – Comparação entre simulação 3 (alteração na volumetria da cobertura) e medição em agosto/2007.	113
Figura C.3 – Comparação entre simulação 4 (resistência térmica - 10%) e medição em agosto/2007.	113
Figura C.4 – Comparação entre simulação 5 (resistência térmica + 10%) e medição em agosto/2007.	114
Figura C.5 – Comparação entre simulação 6 (resistência térmica + 20%) e medição em agosto/2007.	114
Figura C.6 – Comparação entre simulação 7 (alteração na absorvância) e medição em agosto/2007.	114
Figura C.7 – Comparação entre simulação 8 (alteração no ganho de calor por equipamentos) e medição em agosto/2007.	115
Figura D.1 – Comparação entre simulação 10 (coeficiente de descarga = 0,7) e medição em janeiro/2008.	116
Figura D.2 – Comparação entre simulação 11 (coeficiente de descarga = 0,5) e medição em janeiro/2008.	116
Figura D.3 – Comparação entre simulação 12 (coeficiente de descarga =	

0,3) e medição em janeiro/2008.	116
Figura E.1 – Comparação entre simulação 9 (alteração na infiltração de ar) e medição em setembro/2007.	117
Figura E.2 – Comparação entre simulação 10 (coeficiente de descarga = 0,7) e medição em setembro/2007.	117
Figura E.3 – Comparação entre simulação 11 (coeficiente de descarga = 0,5) e medição em setembro/2007.	117
Figura E.4 – Comparação entre simulação 12 (coeficiente de descarga = 0,3) e medição em setembro/2007.	118
Figura F.1 – Porcentagens de horas de desconforto anuais na sala relacionadas à transmitância térmica equivalente.	120
Figura F.2 – Porcentagens de horas de desconforto anuais na sala relacionadas à capacidade térmica equivalente.	120
Figura F.3 – Porcentagens de horas de desconforto anuais na sala relacionadas ao atraso térmico equivalente.	121
Figura F.4 – Correlação entre a porcentagem de horas de desconforto e as propriedades térmicas da cobertura da sala: transmitância térmica (a), capacidade térmica (b), e atraso térmico (c).	121
Figura F.5 – Correlação entre a porcentagem de horas de desconforto e as propriedades térmicas da parede da sala: transmitância térmica (a), capacidade térmica (b), e atraso térmico (c).	122
Figura F.6 – Correlação entre a porcentagem de horas de desconforto e as propriedades térmicas equivalentes da sala: transmitância térmica (a), capacidade térmica (b), e atraso térmico (c).	122
Figura F.7 – Trocas de calor da sala – Modelo Referência sem ventilação e ocupação.	123
Figura F.8 – Trocas de calor da sala – Modelo Referência com ventilação e ocupação.	123
Figura F.9 – Temperatura do ar no exterior e na sala – Modelo Referência: dias 03 a 09 de janeiro (a), e dias 02 a 08 de novembro (b).	124
Figura F.10 – Temperatura do ar no exterior e na sala – Variação Parede 5: dias 03 a 09 de janeiro (a), e dias 02 a 08 de novembro (b).	124

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1– Critérios de avaliação de desempenho térmico proposto em ABNT, 2008.....	16
Tabela 3.1 – Especificações técnicas do Hobo U12.....	34
Tabela 3.2 – Temperaturas do solo para o modelo inicial de calibração.	40
Tabela 3.3 – Características dos materiais utilizados na simulação computacional.....	44
Tabela 3.4 – Atividades realizadas e calor produzido nas zonas térmicas do modelo.....	46
Tabela 3.5 – Abertura das janelas e portas externas nos períodos de monitoramento em setembro/2007 e janeiro/2008.	48
Tabela 3.6 – Abertura das persianas nos períodos de monitoramento em agosto e setembro de 2007, e janeiro de 2008.....	50
Tabela 3.7 – Valores de temperatura média do solo obtidos <i>in loco</i> [°C].....	51
Tabela 3.8 – Valores corrigidos de absorvância dos materiais.....	52
Tabela 3.9 – Simulações realizadas para a calibração e meses de análise.	54
Tabela 3.10 – Valores de temperatura média do solo [°C] para as simulações.	56
Tabela 3.11 – Características da parede do modelo base.....	57
Tabela 3.12 – Características da cobertura do modelo base.....	57
Tabela 3.13 – Abertura das janelas e portas externas nos meses de verão. ...	59
Tabela 3.14 – Abertura das janelas e portas externas nos meses de inverno..	59
Tabela 3.15 – Atividades realizadas e calor produzido nas zonas térmicas do modelo.....	61
Tabela 3.16 – Iluminação em cada zona térmica do modelo.....	61
Tabela 3.17 – Padrão de uso da iluminação – dias úteis e finais de semana...62	
Tabela 3.18 – Descrição e Propriedades Térmicas das Coberturas Simuladas.	63
Tabela 3.19 – Descrição e Propriedades Térmicas das Paredes Simuladas. ..	64
Tabela 3.20 – Características dos materiais utilizados na simulação computacional.....	65

Tabela 4.1 – Resultados das simulações comparadas às medições de dezembro/2007.....	71
Tabela 4.2 – Resultados das simulações comparadas às medições de agosto/2007.....	75
Tabela 4.3 – Resultados das simulações comparadas às medições de janeiro/2008.....	79
Tabela 4.4 – Resultados das simulações comparadas às medições de setembro/2008.....	81
Tabela 4.5 – Porcentagem de horas de conforto e desconforto anuais.....	83
Tabela 4.6 – Porcentagem de horas de conforto e desconforto do quarto de casal no Modelo de Referência para ano inteiro, verão e inverno.....	85
Tabela F.1 – Porcentagem de horas de conforto e desconforto anuais na sala.	119
Tabela F.2 – Porcentagem de horas de conforto e desconforto da sala no Modelo de Referência.	120

RESUMO

Apesar do crescente número de pesquisas a respeito da influência da especificação dos materiais construtivos da envoltória dos edifícios na manutenção de seu desempenho térmico, é reduzido o número de estudos que consideram o desempenho do envelope sob a influência da ventilação natural e da ocupação pelos usuários. O objetivo central deste trabalho é investigar a influência das propriedades térmicas do envelope no desempenho térmico de edificações residenciais unifamiliares quando estas são ocupadas e ventiladas naturalmente. O método utilizado compreende o estudo do desempenho térmico do envelope de uma edificação residencial unifamiliar, através de medições e de simulação computacional. Com a caracterização e monitoramento de uma edificação real, foi possível criar e calibrar um modelo para simulação computacional, utilizando o programa EnergyPlus. A calibração permitiu a criação de um modelo computacional com resultados de temperatura interna do ar similares ao medido na edificação real. Porém, tais resultados foram melhores para o modelo sem ventilação que para o modelo com ventilação. A partir do modelo calibrado, foram simuladas variações no envelope da edificação, utilizando materiais com diferentes propriedades térmicas. Para estas variações foram obtidos os valores de temperatura e umidade do ar interno, e verificada a porcentagem de horas de desconforto em um ano, através do programa Analysis Bio. Com isso, foi possível verificar a correlação entre as horas de desconforto e as propriedades térmicas dos componentes do envelope, a partir das quais se verificou que o envelope exerce uma influência sobre o desempenho térmico da edificação, inclusive quando esta é ocupada e ventilada naturalmente. Essa influência é mais fortemente relacionada ao valor de capacidade térmica do componente do envelope. Pode-se dizer que a transmitância térmica do componente exerce fraca influência no desempenho térmico da edificação. Ressalta-se que os resultados podem apresentar imprecisões pelo fato do programa computacional considerar ambientes homogêneos termicamente e com distribuição uniforme dos fluxos de ar.

ABSTRACT

Despite the growing number of studies about the influence of materials used in the envelope on the thermal performance of buildings, there are few studies that consider the performance of the building's envelope under the influence of natural ventilation and occupation. The main objective of this work is to investigate the influence of the thermal properties of the envelope on the thermal performance of houses when they are occupied and naturally ventilated. The method used includes the study of the thermal performance of a single-family residential building envelope's thermal properties, through both measurements and computer simulation. With the characterization and monitoring of an actual building, it was possible to create and calibrate a model for computer simulation, using the EnergyPlus computer program. By calibration it was possible to create a computer model with results of indoor air temperature similar to the measured values. However, such results were better for the model without ventilation than for the model with ventilation. From the calibrated model, several variations of the building's envelope were made, each using materials with different thermal properties. For each variation, the values for air temperature and air humidity were found and, from those values, verified the percentage of discomfort hours in a year through the Analysis Bio computer program. With the results obtained it was possible to verify the correlation between thermal discomfort hours and the envelope's thermal properties. From these correlations, it was found that there is an influence of the envelope on the thermal performance of the occupied and naturally ventilated building. This influence is more strongly related to the value of the envelope's thermal capacity. It's possible to say that the envelope's thermal transmittance exercises a weak influence on the building's thermal performance. It should also be highlighted that the results may present inaccuracies because the EnergyPlus computer program considers that the rooms are thermally homogeneous and have a perfect mix of air flow.

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO

1.1. Apresentação do Problema e Justificativa

Os primeiros anos do século XXI estão sendo cercados por uma série de discussões sobre economia de energia, geradas em grande parte pelos indícios do aquecimento global e suas desastrosas conseqüências e, mais especificamente no Brasil, pela crise energética ocorrida em 2001. Mendes et al. (2005) esclarecem que, nesse ano, o sistema elétrico brasileiro entrou em colapso devido ao efeito conjugado dos poucos investimentos em ampliação do parque gerador nos anos anteriores e da escassez de chuvas registradas em 2000.

Fruto dessas discussões, a busca por eficiência energética tem crescido e chamado a atenção de arquitetos e engenheiros. Para Lamberts et al. (2004), um edifício é considerado energeticamente mais eficiente que outro quando proporciona as mesmas condições ambientais de conforto ao seu usuário, com menor consumo de energia.

Nesse sentido, é crescente também a discussão sobre a aplicação de estratégias passivas de condicionamento, entendidas como a construção e organização de edifícios de forma que suas propriedades térmicas, e de seus componentes, contribuam para a criação de ambientes agradáveis e estáveis climaticamente (WONG; LI, 2007), evitando ou diminuindo a necessidade de equipamentos elétricos para esse fim.

Vários estudos sobre o assunto (CHENG et al., 2005; GHISI; MASSIGNANI, 2007; MANIOGLU; YILMAZ, 2006; WONG; LI, 2007; YILMAZ, 2007) procuram comprovar a hipótese de que a especificação adequada dos materiais construtivos no projeto de edifícios, e sua correta relação com fatores e elementos climáticos do local, permitem uma condição final de maior conforto e uma grande redução no consumo energético.

Dentre as diferentes estratégias passivas de condicionamento conhecidas, uma das mais estudadas é a especificação dos materiais do envelope do edifício baseada nas propriedades térmicas de interesse, conforme o clima local. Alguns pesquisadores, como Manioglu e Yilmaz (2006), consideram que o envelope do edifício é o principal determinante do clima

interno, responsável pelos fluxos de calor em seu interior e, portanto, fator determinante do seu desempenho térmico.

Apesar destas pesquisas realizadas a respeito da melhor especificação dos materiais de construção para obtenção de maior conforto térmico, verifica-se um número reduzido de estudos que levam em consideração a influência da ventilação natural e da ocupação pelos usuários no desempenho do envelope. Esta é uma questão que deve receber atenção nas pesquisas em regiões de clima tropical ou quente, especialmente no caso das edificações residenciais. No Brasil, estudos de bioclimatologia apontam o aproveitamento da ventilação natural como uma das estratégias de resfriamento, para habitações unifamiliares, mais indicadas em seu território, sendo desejável em 7 das 8 zonas bioclimáticas brasileiras (ABNT, 2005c).

Dados de Almeida et al. (2001) mostram que no setor residencial brasileiro, no ano de 1997, 3% do consumo de energia elétrica total foi destinado ao condicionamento de ar. Já a pesquisa de Ghisi et al. (2007), que considerou 12 dos 26 estados brasileiros (abrangendo 70% da população), aponta que entre os anos de 1997 e 1999, 10% do consumo de energia elétrica total do setor residencial brasileiro foi destinado ao condicionamento de ar. Dados mais recentes de ELETROBRÁS e PROCEL (2007), referentes a 2005, indicam o crescimento do consumo residencial com condicionamento de ar, alcançando 20% do total da energia elétrica consumida no setor. Esse consumo com condicionadores de ar poderia ser reduzido se houvesse um melhor aproveitamento da ventilação natural por parte desses consumidores.

Ressalta-se que, mesmo com a porcentagem de 20% do consumo residencial destinada a condicionamento de ar, grande parte das edificações residenciais brasileiras não possui condicionamento artificial, e utiliza prioritariamente a ventilação natural. A maior parte desse consumo concentra-se em um número reduzido de consumidores. Segundo ELETROBRÁS e PROCEL (2007) os aparelhos de ar condicionado estão distribuídos em apenas 10,5% dos domicílios do Brasil.

Esta dissertação estudou a influência das propriedades térmicas do envelope no desempenho térmico de uma edificação residencial sob a influência da ventilação natural e da ocupação. A pesquisa se deu através de medições em ambiente real, em uma residência na cidade de Florianópolis –

Santa Catarina, e também através de simulação computacional para o clima de Florianópolis. A cidade localiza-se na Região Sul do Brasil, conforme indicado na Figura 1.1.

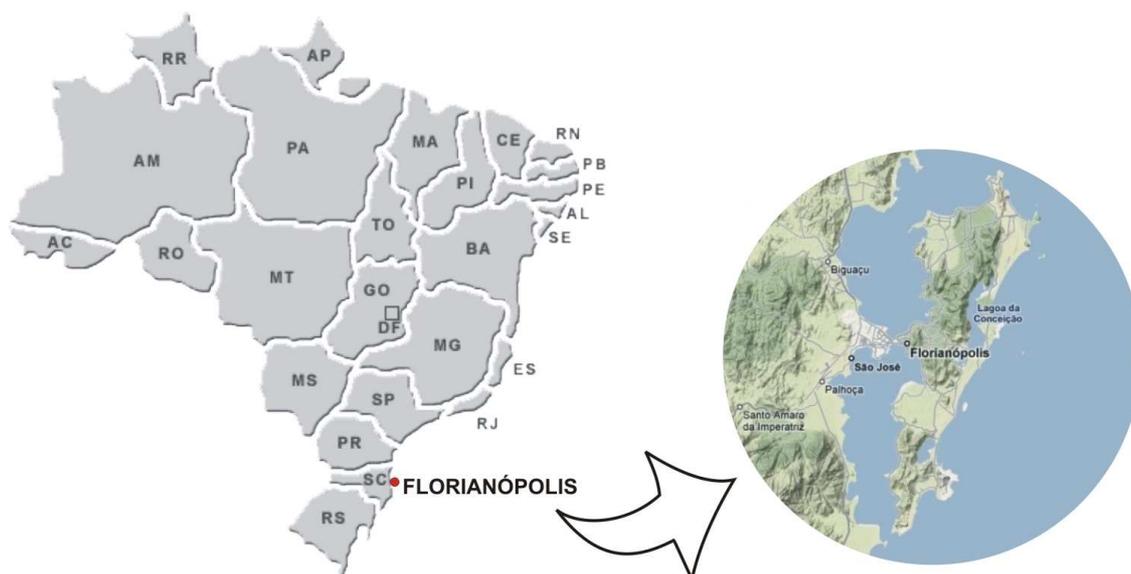


Figura 1.1 – Mapa do Brasil indicando a cidade de Florianópolis – SC.

Florianópolis, capital de Santa Catarina, localiza-se na latitude $27,7^{\circ}\text{S}$, a uma altitude de 7m, ou seja, praticamente ao nível do mar (embora podendo chegar a altitudes de cerca de 500m nos picos de alguns morros). Seu clima é classificado como mesotérmico úmido (Cfa segundo Köppen), com as estações do ano bem definidas: altas temperaturas no verão e baixas no inverno.

Os registros das Normais Climatológicas de 1961 a 1990 (BRASIL, 1992) para Florianópolis, indicam as temperaturas médias mensais variando de $16,3^{\circ}\text{C}$ em julho a $24,7^{\circ}\text{C}$ em fevereiro, conforme Figura 1.2. A média das temperaturas máximas varia de $20,4^{\circ}\text{C}$ em julho a $28,4^{\circ}\text{C}$ em fevereiro. A média das temperaturas mínimas varia de $13,3^{\circ}\text{C}$ em julho a $21,8^{\circ}\text{C}$ em fevereiro.

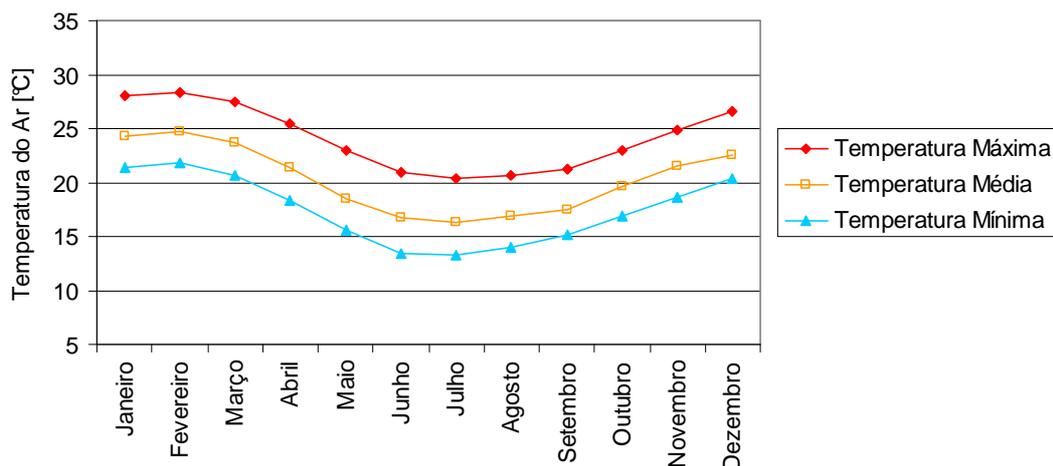


Figura 1.2 – Gráfico de temperaturas médias mensais de Florianópolis, segundo as normais climatológicas de 1961 a 1990.

Para Florianópolis, entre outras capitais brasileiras, foi definido um Ano Climático de Referência (*Test Reference Year – TRY*), através de uma metodologia aplicada por Goulart et al. (1998). Nela, analisou-se uma seqüência histórica (10 anos) de dados climáticos, escolhendo o ano mais representativo do período, sem valores extremos de temperatura. O ano climático de referência (TRY) definido por Goulart et al. (1998) para Florianópolis é 1963. A Figura 1.3 apresenta os valores de temperatura média mensal desse ano.

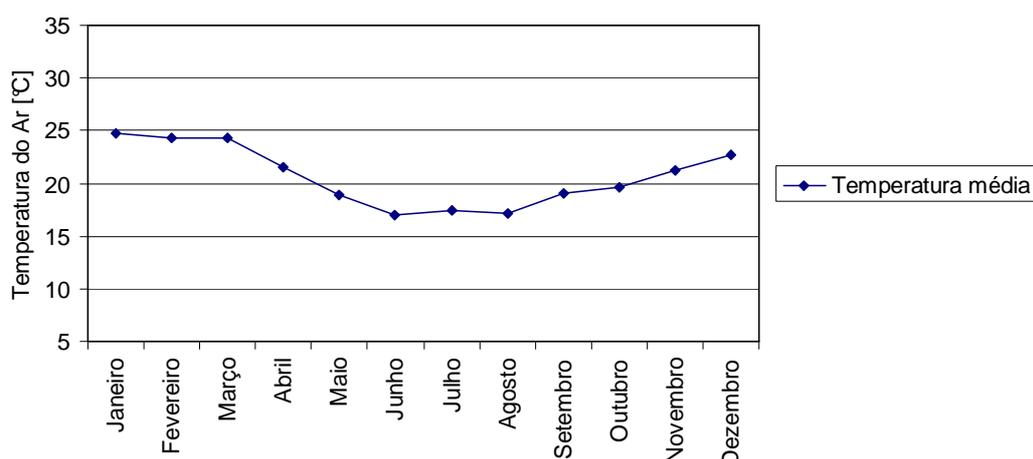


Figura 1.3 – Gráfico de temperaturas médias mensais do ano climático de referência de Florianópolis.

Com o programa computacional Analysis Bio (LabEEE, 2007), é possível analisar a porcentagem de horas de conforto e desconforto de um determinado arquivo climático, a partir dos parâmetros estabelecidos na carta bioclimática de Givoni (1992). Para isso são necessários dados horários de

temperatura do ar e umidade relativa do ar. O programa foi desenvolvido por pesquisadores do Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LabEEE) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

Inserindo os dados do ano climático de referência de Florianópolis no programa Analysis Bio, obtém-se a carta bioclimática mostrada na Figura 1.4. Verifica-se a ocorrência 21,0% de horas de conforto e 79,0% de horas de desconforto, sendo destas, 40,8% por frio e 38,2% por calor. O uso da ventilação é indicado em 35,6% das horas do ano.

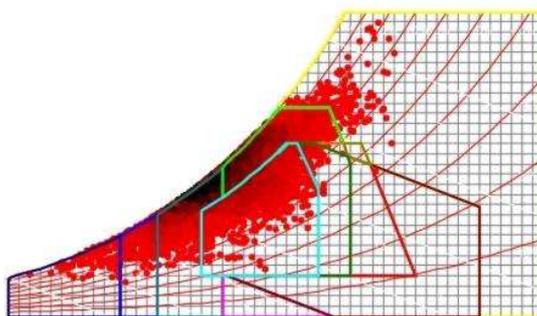


Figura 1.4 – Carta Bioclimática gerada no Analysis Bio, com dados do ano climático de referência de Florianópolis.

Na residência estudada foram realizadas medições de temperaturas do ar, que permitiram a calibração de um modelo para ser utilizado em simulações computacionais de desempenho térmico. A ferramenta utilizada para tais simulações foi o programa EnergyPlus (versão 2.2.0), capaz de calcular as trocas térmicas do edifício com o ambiente a partir da modelagem da edificação, sua geometria e materiais construtivos, sistemas de ventilação, iluminação, cargas internas, ocupação, entre outros.

Este trabalho se atém às questões diretamente ligadas ao desempenho térmico das edificações, não incluindo discussões a respeito do conforto do usuário. Entende-se aqui desempenho térmico como o comportamento térmico do edifício frente às condições climáticas externas e cargas internas.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é verificar a influência das propriedades térmicas do envelope no desempenho térmico de edificações residenciais unifamiliares, na cidade de Florianópolis, quando estas são ocupadas e ventiladas naturalmente.

1.2.2. Objetivos Específicos

Destacam-se também os objetivos específicos a serem alcançados no decorrer do trabalho:

- Monitorar a temperatura do ar em uma edificação real, para calibrar o modelo a ser utilizado nas simulações computacionais.
- Calibrar o modelo computacional representativo de uma edificação residencial na cidade de Florianópolis.
- Utilizar simulação computacional para estudar o desempenho térmico de um modelo de edificação residencial no contexto climático de Florianópolis, com e sem ocupação e ventilação natural, tendo como ferramenta o programa EnergyPlus.
- Comparar porcentagens de horas de desconforto do modelo computacional com diferentes tipos de envelope, no caso do modelo com e sem ocupação e ventilação.

1.3. Estrutura do Trabalho

Este trabalho está dividido em cinco capítulos. O primeiro capítulo apresenta uma introdução sobre o assunto, caracterizando o problema estudado e descrevendo os objetivos buscados.

No segundo capítulo inicia-se uma revisão bibliográfica referente à análise do desempenho térmico de edificações, focalizando métodos de análise utilizados por diferentes pesquisadores, em alguns lugares do mundo, incluindo o Brasil.

O terceiro capítulo apresenta a metodologia utilizada no trabalho. Inicialmente descreve-se como foi realizado o monitoramento de uma

edificação e a utilização desses dados para a calibração de um modelo computacional. Em seguida, descreve-se a realização de simulações computacionais para análises de desempenho térmico, com diferentes materiais no envelope do modelo, apresentando os programas computacionais utilizados, e o método para tratamento dos dados.

No quarto capítulo são apresentados os resultados alcançados ao longo do trabalho, mostrando inicialmente a calibração do modelo de simulação, e, em seguida, as análises de influência do envelope no desempenho térmico do modelo. São mostradas as correlações entre a porcentagem de horas de desconforto e as propriedades térmicas dos componentes do envelope e as trocas térmicas do modelo. No quinto e último capítulo apresenta-se as conclusões do trabalho, as limitações encontradas e sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo apresenta uma revisão de literatura e de normas sobre avaliação do desempenho térmico de edificações, servindo como fundamentação teórica para o desenvolvimento dos demais capítulos deste trabalho. Apresentam-se algumas normas internacionais e nacionais referentes ao assunto, e também alguns trabalhos publicados que buscaram estudar o desempenho térmico do envelope de edificações, ocupadas e ventiladas ou não. Por fim, discute-se o uso de programas computacionais de simulação termo-energética na avaliação do desempenho térmico de edificações.

2.1. Avaliação do Desempenho Térmico de Edificações

2.1.1. Métodos Internacionais

As discussões em vários países do mundo a respeito de economia de energia e melhoria do desempenho energético das edificações levam, conseqüentemente, à questão do desempenho térmico de edificações. Atualmente, vários países, como França, Estados Unidos, Canadá, Austrália, entre outros, possuem normas para conservação de energia que abrangem diretrizes para o projeto de edificações com melhor desempenho térmico. Algumas destas normas são obrigatórias e outras voluntárias.

As normas mais difundidas internacionalmente, e que serviram de base para várias outras, foram desenvolvidas pela ASHRAE – Sociedade Americana de Aquecimento, Refrigeração e Engenharia de Condicionamento de Ar – nos Estados Unidos. A norma ANSI, ASHRAE e IESNA (2001), número 90.1, tem como proposta principal estabelecer requisitos mínimos para projeto de edifícios eficientes energeticamente, porém não se aplica a edifícios residenciais de pequeno porte. Já a norma ANSI e ASHRAE (2001), número 90.2, estabelece requisitos mínimos para eficiência energética em projetos especificamente de edifícios residenciais.

Akutsu e Vittorino (1997) destacam que estas normas ASHRAE da série 90, e também as da série 100, apresentam exigências de isolamento térmico de vedações, dutos e tubulações, estanqueidade ao ar de caixilhos,

eficiência energética dos equipamentos de iluminação, bombas de água, ventiladores, chillers e caldeiras, visando o projeto de edifícios de alto desempenho energético. Tais normas ainda incentivam a realização de análises utilizando programas de simulação detalhada, em bases horárias, para anos típicos de referência.

Estes requisitos para projetos de edifícios eficientes recomendados pela ASHRAE são indicados com base na manutenção das condições mínimas de conforto térmico descritas na ASHRAE Standard 55 (ANSI; ASHRAE, 2004) e no capítulo 8 da ASHRAE Handbook – Fundamentals (ASHRAE, 2005a). Elas indicam uma zona de conforto, definida em uma escala de condições climáticas, dentro da qual 80% das pessoas consideraria o ambiente aceitável termicamente, ou seja, não sentiria desconforto térmico, nem por calor nem por frio. Assim, os edifícios deveriam ser capazes de proporcionar um ambiente interno dentro das condições indicadas na zona de conforto.

As condições de conforto estabelecidas pela ASHRAE (2005a) são para pessoas em atividade sedentária ou leve, sendo na situação de verão (calor) considerado o isolamento da vestimenta de 0,5 clo, e no inverno (frio) considerada uma vestimenta com 0,9 clo. Entendendo que a umidade e a velocidade do ar são fatores também determinantes na situação de conforto do usuário, a norma estabelece limites para essas variáveis. Para a umidade relativa do ar indica-se que o ideal é manter um valor de no máximo 60%, e para a velocidade do ar o valor máximo aceitável é 0,8 m/s. Nessas condições, os limites estabelecidos pela ASHRAE (2005a) para a zona de conforto são demarcados em uma carta psicrométrica, como mostrado na Figura 2.1, indicando as seguintes temperaturas ideais aproximadamente:

- no verão: de 23°C a 27°C;
- no inverno: de 20,5°C a 24,5°C.

Ao longo dos anos, a zona de conforto da ASHRAE já sofreu algumas alterações, porém os limites de temperatura de conforto continuam aproximadamente os mesmos desde pelo menos o início da década de noventa. A respeito dessa norma, Givoni (1992) avaliou que tais valores só seriam bem aplicados para edifícios condicionados artificialmente, e, portanto, não deveriam ser utilizados como critério de avaliação do desempenho térmico de edifícios não condicionados. Ele considera ainda que os limites máximos de

umidade e velocidade do ar determinados pela ASHRAE não são aplicáveis a locais com clima quente e úmido, já que as pessoas passariam por um processo de aclimação.

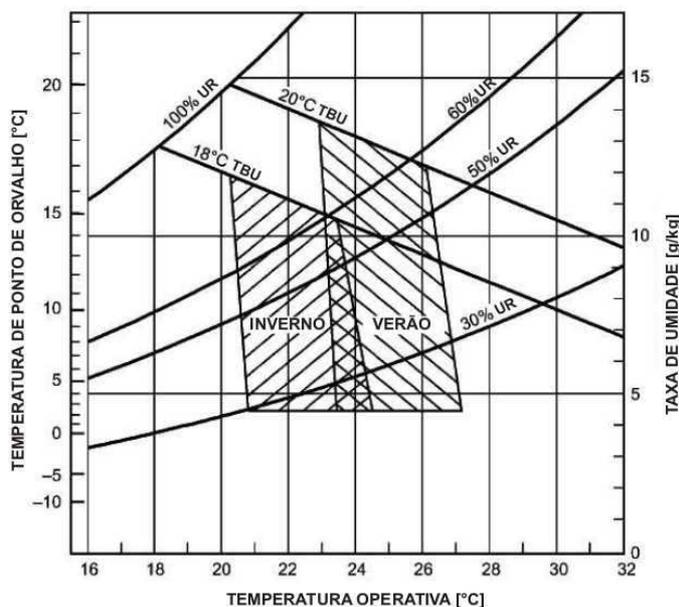


Figura 2.1 – Zonas de conforto de verão e inverno da ASHRAE.

Fonte: ASHRAE (2005a)

Segundo a ASHRAE, as pessoas não conseguem se adaptar ao clima, não sendo possível a preferência por ambientes mais frios ou mais quentes. Portanto, as mesmas condições de conforto poderiam ser aplicadas em todo o mundo, dependendo apenas da variação das vestimentas utilizadas e das atividades realizadas (ASHRAE, 2005a). Porém, Givoni (1992) defende ser razoável assumir que pessoas em países quentes em desenvolvimento, vivendo a maior parte do tempo em edifícios sem condicionamento, são aclimatadas e conseguem tolerar temperaturas mais altas e maior umidade. Segundo ele, o limite aceitável de velocidade do ar de 0,8 m/s estabelecido pela ASHRAE, pode ser aumentado no caso de edifícios residenciais naturalmente ventilados. Uma alteração na velocidade do ar de 0,1 m/s para 1,5 m/s possibilitaria um aumento de mais de 2°C na temperatura máxima de conforto.

Com base nisso, Givoni (1992) estabelece uma zona de conforto adaptada para países quentes e úmidos, também delimitada em uma carta psicrométrica, apresentada na Figura 2.2. Os valores indicados por Givoni para os limites de temperatura de conforto nesses países, e que, portanto, deveriam

ser utilizados como critério de avaliação do desempenho térmico de seus edifícios, são:

- no verão: de 20°C a 29°C;
- no inverno: de 18°C a 27°C.

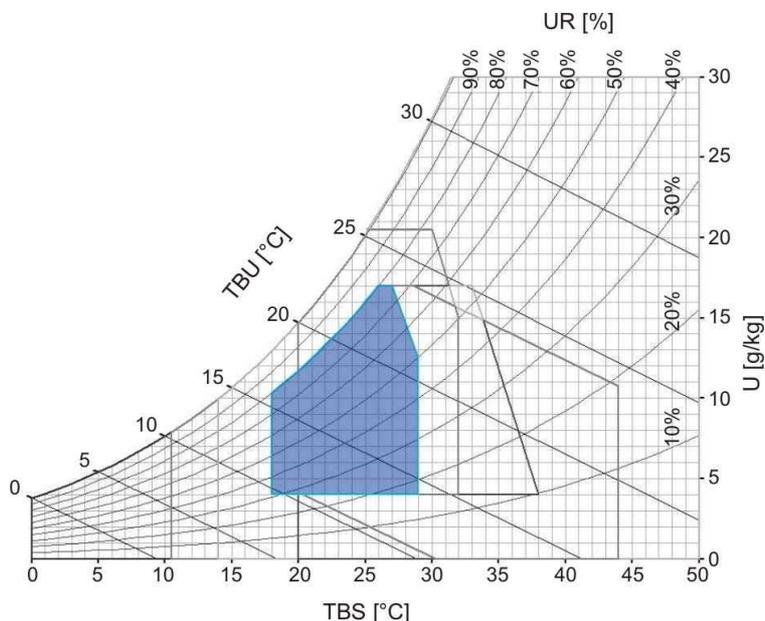


Figura 2.2 – Zona de Conforto de Givoni adaptada para climas quentes.

Fonte: Adaptado de Givoni (1992)

Essas discussões a respeito de uma possível aclimação do indivíduo a determinadas condições do ambiente levaram a ASHRAE a patrocinar um estudo sobre adaptação térmica. Esse estudo, desenvolvido por De Dear e Brager (1998; 2002), baseou-se no entendimento de uma dimensão psicológica na adaptação, importante em contextos onde a interação da pessoa com o ambiente, e suas diversas experiências térmicas, podem alterar suas expectativas e, conseqüentemente, sua sensação e satisfação térmica. Um dos contextos onde isso é verificado é em edifícios naturalmente ventilados (DE DEAR; BRAGER, 2002).

Um banco de dados foi criado pela ASHRAE com informações de edifícios e seus usuários, reunindo aproximadamente 21.000 conjuntos de dados, de cinco continentes. Esses edifícios foram separados em dois grupos: naturalmente ventilados, e com controle central de aquecimento, ventilação e sistema de condicionamento do ar (HVAC). Baseada nesse banco de dados, a pesquisa de De Dear e Brager (2002) chegou à conclusão de que o método de avaliação de conforto utilizado pela ASHRAE era adequado apenas no caso

dos edifícios com condicionamento artificial do ar (HVAC). Assim, para o caso dos edifícios naturalmente ventilados, os pesquisadores desenvolveram um novo método, chamado de adaptativo, com novos limites para uma zona de conforto.

O método adaptativo foi incluído na ASHRAE Standard 55 (ANSI; ASHRAE, 2004) com o nome de Método Opcional para Determinação das Condições Térmicas Aceitáveis em Espaços Naturalmente Condicionados. Nele não há limitações para os valores de umidade e velocidade do ar. A faixa de temperatura de conforto é relacionada apenas com o valor da média mensal de temperatura externa do ar, e chega a variar de 17°C a 31°C, conforme a Figura 2.3.

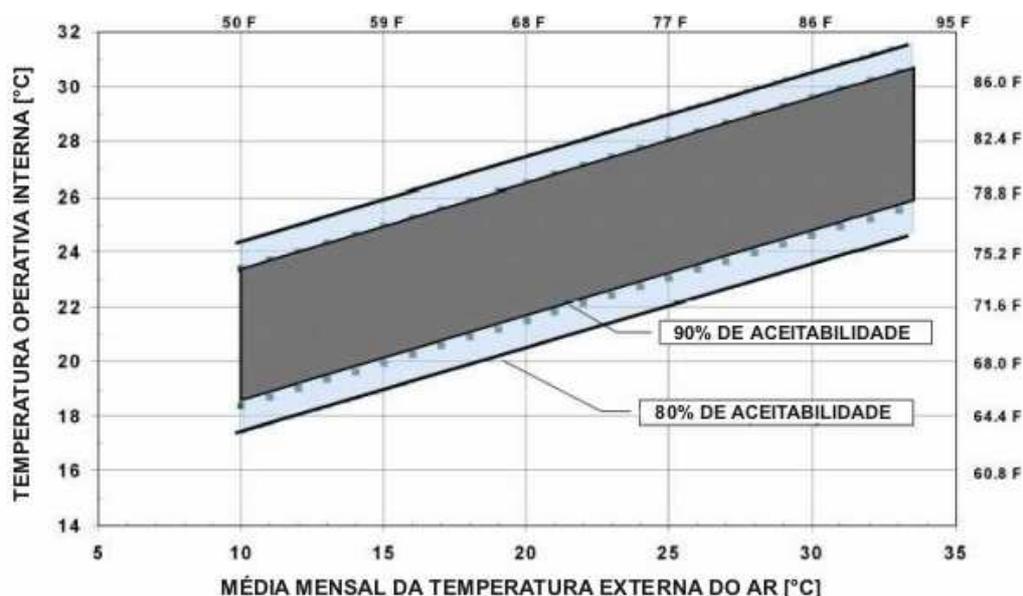


Figura 2.3 – Método adaptativo – zona de conforto para edifícios naturalmente ventilados.

Fonte: ASHRAE (2004) e De Dear e Brager (2002)

2.1.2. Métodos Brasileiros

Desde a década de 1980, vários pesquisadores brasileiros têm discutido o desenvolvimento e a implantação de um método de avaliação do desempenho térmico de edificações para o Brasil. Na década de 1990, Akutsu e Vittorino (1997) apontavam que os métodos tradicionais de avaliação, baseados em análises de situações em regime permanente de trocas térmicas e que fixam valores limites para a resistência térmica da envoltória, são próprios de países de clima temperado ou frio (países onde as condições climáticas apresentam características que permitem uma grande simplificação

dos modelos matemáticos). Para eles, no Brasil, seria preciso adotar novos procedimentos, levando em conta o caráter dinâmico das trocas térmicas que ocorrem nas edificações.

Akutsu e Vittorino (1997) entendem que, nos países de clima quente, a ventilação e a radiação solar exercem grande influência no desempenho térmico das edificações, principalmente das não condicionadas, e, portanto, estes elementos devem receber maior atenção nos métodos de avaliação do desempenho. Eles indicam que, nesses casos, o parâmetro de avaliação não deveria ser o consumo de energia e sim o conforto térmico dos ocupantes, tendo como variáveis de análise a temperatura, velocidade e umidade do ar e a temperatura radiante média do ambiente.

Uma das normas em vigor no Brasil, referente a este assunto, é a NBR 15220, sobre desempenho térmico de edificações (ABNT, 2005a). Ela possui cinco partes que descrevem a respeito de métodos de cálculo e de medição de propriedades térmicas dos componentes construtivos das edificações, definem um zoneamento bioclimático brasileiro e indicam diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Existe ainda a NBR 15575, em vigor desde 2008, chamada de Edificações habitacionais de até cinco pavimentos – Desempenho (ABNT, 2008), que, principalmente em sua Parte 1, estabelece requisitos mínimos de desempenho térmico, entre outros fatores. Além destas normas, outros métodos de avaliação de desempenho térmico de edificações foram estudados por pesquisadores brasileiros. Destaca-se aqui a proposta da tese de doutorado de Barbosa (1997), revisada por Barbosa et al. (2003). Dentre os métodos desenvolvidos no Brasil, pode-se identificar dois tipos básicos de avaliação de desempenho térmico de edificações residenciais: avaliação por prescrição e por desempenho.

A Parte 3 da NBR 15220 – Desempenho térmico de edificações (ABNT, 2005c) apresenta recomendações quanto ao desempenho térmico de habitações unifamiliares de interesse social aplicáveis na fase de projeto. A partir dela, é possível realizar uma avaliação por prescrição, verificando-se o cumprimento de determinados limites estabelecidos para as propriedades térmicas dos componentes construtivos, e de algumas recomendações de estratégias de condicionamento térmico passivo (ventilação cruzada, resfriamento evaporativo, massa térmica, etc.). Tais recomendações são

especificadas segundo um Zoneamento Bioclimático Brasileiro e uma Carta Bioclimática adaptada, estabelecidos pela norma. Nesse método, as paredes e coberturas são caracterizadas termicamente a partir dos valores de resistência térmica dos seus componentes.

A NBR 15575 – Edificações habitacionais de até cinco pavimentos – Desempenho (ABNT, 2008), e também o método proposto por Barbosa (1997), utilizam um sistema de avaliação por desempenho.

O NBR 15575 (ABNT, 2008), além de reafirmar as indicações da NBR 15220, utiliza como critério de avaliação de desempenho térmico a determinação de valores limites de temperatura do ar no interior da edificação, para verão e inverno. Estes limites variam em uma escala de classificação do desempenho em mínimo (M), intermediário (I) e superior (S), e também variam segundo as zonas bioclimáticas. As temperaturas máximas estabelecidas para o verão e mínimas para o inverno são apresentadas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1– Critérios de avaliação de desempenho térmico proposto em ABNT, 2008.

VERÃO	Nível de desempenho	Critério	
		Zonas bioclimáticas 1 a 7	Zona bioclimática 8
	M	$T_{i,max} \leq T_{e,max}$	
	I	$T_{i,max} \leq (T_{e,max} - 2^{\circ}\text{C})$	$T_{i,max} \leq (T_{e,max} - 1^{\circ}\text{C})$
	S	$T_{i,max} \leq (T_{e,max} - 4^{\circ}\text{C})$	$T_{i,max} \leq (T_{e,max} - 2^{\circ}\text{C})$ e $T_{i,min} \leq (T_{e,min} + 1^{\circ}\text{C})$
INVERNO	Nível de desempenho	Critério	
		Zonas bioclimáticas 1 a 5	Zonas bioclimáticas 6 a 8
	M	$T_{i,min} \geq (T_{e,min} + 3^{\circ}\text{C})$	Dispensa verificação
	I	$T_{i,min} \geq (T_{e,min} + 5^{\circ}\text{C})$	
S	$T_{i,min} \geq (T_{e,min} + 7^{\circ}\text{C})$		
$T_{i,max}$ é o valor máximo diário da temperatura do ar no interior da edificação [°C]; $T_{e,max}$ é o valor máximo diário da temperatura do ar exterior à edificação [°C]; $T_{i,min}$ é o valor mínimo diário da temperatura do ar no interior da edificação [°C]; $T_{e,min}$ é o valor mínimo diário da temperatura do ar exterior à edificação [°C]; NOTA – Zonas bioclimáticas de acordo com a ABNT - NBR 15220/3.			

É relevante verificar que os valores máximos de temperatura do ar são considerados, em todos os casos nesse projeto de norma, sem a presença de fontes internas de calor (ocupantes, lâmpadas, outros equipamentos em geral), o que afasta esta verificação do caso real, de uma edificação ocupada e em uso. Não há comentários sobre ventilação natural, nem limites de temperatura diferenciados para edifícios naturalmente ventilados ou com condicionamento

artificial.

No método de Barbosa (1997), a avaliação é realizada com a simulação de qualquer sistema construtivo, comparando-se as horas de desconforto anual, quantificadas após a simulação, com um limite aceitável de horas de desconforto anual estabelecido para o local ou região. As horas de desconforto são calculadas com base na zona de conforto térmico delimitada por Givoni (1992), para países de clima quente e em desenvolvimento, que recomenda temperaturas internas variando de 18°C a 29°C. O parâmetro adotado como critério de avaliação é o total de horas por ano em que as temperaturas internas obtidas por simulação ou monitoramento apresentam-se fora dos limites de temperatura da zona de conforto de Givoni (BARBOSA et al., 2003).

Na proposta de Barbosa (1997) seria considerada com desempenho térmico satisfatório a edificação que não ultrapassasse 1.000 horas de desconforto anuais em seu interior. Já na proposta mais recente de Barbosa et al. (2003), sugere-se que uma edificação seja considerada com bom desempenho térmico quando apresentar um máximo de 20% de horas anuais de desconforto, que equivale a 1.752 horas ao ano.

2.2. Estudo do Desempenho Térmico do Envelope Sem Considerar a Ventilação Natural

Vários pesquisadores destacam a importância do uso de estratégias passivas de condicionamento, sendo a especificação do envelope do edifício uma das mais citadas e estudadas. Manioglu e Yilmaz (2006), por exemplo, afirmam que o envelope do edifício é o parâmetro mais importante no condicionamento passivo. Eles consideram que a envoltória do edifício é o principal determinante do clima interno, responsável pelos fluxos de calor em seu interior, e, portanto, fator determinante do seu desempenho térmico.

Yilmaz (2007) reafirma esta ideia dizendo que dentre todos os parâmetros que afetam o conforto térmico e a conservação de energia nas edificações, entre eles a orientação do edifício, distância entre edifícios, forma do edifício e propriedades termo-físicas do envelope do edifício, este último parâmetro é o mais importante. Isto porque o envelope é o responsável por

separar o ambiente externo do interno.

Porém, verifica-se nestas pesquisas, e em outras pesquisas sobre o assunto (CHENG et al., 2005; GHISI; MASSIGNANI, 2007; KRÜGER, 2003; WONG; LI, 2007), que o envelope é analisado sem considerar as influências de usuários e da ventilação natural, e, portanto, sem verificar as possíveis alterações que estes fatores causariam no desempenho do envelope.

Em artigo sobre desempenho térmico de edificações na Turquia, Yilmaz (2007) descreve a simulação de um ambiente de um edifício residencial, com duas alternativas de tipos de parede, comparando seu desempenho em duas situações climáticas existentes no país, nomeadas como clima temperado-úmido e clima quente-seco. O ambiente analisado localiza-se em um andar intermediário do edifício, e então assume-se que não haja fluxos de calor através do piso e do teto. Na descrição destas simulações, o pesquisador não cita a inclusão de ventilação ou de usuários, e nenhuma das conclusões apresentadas destaca a influência destes fatores.

No artigo de Manioglu e Yilmaz (2006) analisa-se também o desempenho térmico do envelope de uma edificação na Turquia através da simulação computacional. O edifício simulado é de uma escola primária, na cidade de Istambul, que possui clima temperado-úmido. Os autores consideram que, em alguns casos, não é possível manter o conforto térmico apenas com o condicionamento passivo, sendo necessário o condicionamento artificial em um período específico do ano.

A pesquisa procura, então, a combinação entre características do envelope e período de operação do sistema artificial de condicionamento que propiciem maior economia e eficiência energética. Nas variações de características do envelope, Manioglu e Yilmaz (2006) estudaram apenas diferentes opções para as paredes externas (cinco casos), mantendo sempre o mesmo detalhe de piso e cobertura. Estas simulações consideraram o ganho de calor por cargas internas de iluminação e usuários, porém não foi considerado o efeito das paredes internas e do piso, e excluiu-se totalmente o uso da ventilação natural.

Wong e Li (2007) pesquisaram a aplicação de estratégias passivas de condicionamento em edifícios residenciais em Cingapura, que possui clima quente e úmido. Em tal pesquisa, uma das investigações foi a respeito da

influência da fachada do edifício (materiais e construção) em seu desempenho. Utilizando o programa de simulação chamado *Thermal Analysis Software* (TAS), eles modelaram um edifício residencial e variaram a espessura das paredes leste e oeste. Com isso, os pesquisadores observaram que as paredes com maior espessura proporcionaram um maior atraso térmico e resultaram em uma diminuição de 6,9 a 9,7% na carga para resfriamento do ambiente. Concluíram, assim, que estava comprovada a eficiência da otimização da fachada. Porém, nestas simulações, Wong e Li (2007) não adotaram valores de ganhos internos de calor, ou seja, foi desconsiderada a existência de equipamentos e usuários; e, apesar de destacarem que o estudo era a respeito de edifícios naturalmente ventilados, não há informações sobre o uso da ventilação natural nessas simulações computacionais.

A pesquisa apresentada por Cheng et al. (2005) estuda a influência da cor e da massa térmica do envelope no desempenho térmico de edificações. Ela foi conduzida na cidade de Hong Kong, China, que possui clima quente e úmido. Os autores reconhecem que o efeito da cor do envelope no desempenho térmico do edifício depende de vários parâmetros, como a composição da parede, a orientação solar e os diferentes modos de ventilação. Porém, em seus experimentos, analisam a influência apenas dos dois primeiros parâmetros citados.

Os experimentos de Cheng et al. (2005) foram realizados com o monitoramento de protótipos construídos e colocados na cobertura de um edifício, sendo dois protótipos pequenos (1,0m x 1,0m x 1,0m) e idênticos, para estudo do efeito da cor, e um outro, maior (1,5m x 1,5m x 1,5m), com quatro espaços internos, para estudo do efeito da orientação. Os dois protótipos menores foram pintados, um com cor clara (absortividade = 0,25) e o outro com cor escura (absortividade = 0,80). Além disso, em um dos experimentos, esses protótipos tiveram a massa térmica de seu envelope aumentada, pela colocação de uma camada de tijolos de concreto na face interna das paredes.

Dessa forma, Cheng et al. (2005) analisaram o efeito da cor no caso das paredes leves e das paredes com maior massa térmica, e também o efeito da variação da massa térmica em diferentes orientações solares. Os resultados indicaram que a influência da cor do envelope no desempenho dos protótipos variou de acordo com a radiação solar global e com a massa térmica do

envelope. Quanto maiores os valores de radiação e quanto menor a massa térmica, maior foi a influência da cor no desempenho do protótipo. Uma das conclusões destes pesquisadores foi que o uso de envelopes com cores claras é uma das formas mais simples, efetivas e econômicas de reduzir a temperatura interna das edificações em climas quentes e úmidos. Em todos estes estudos, os protótipos permaneceram fechados, sem influência da ventilação em seu interior. Portanto, as conclusões obtidas são mais significativas para o caso de edificações sem ventilação natural.

No Brasil, Ghisi e Massignani (2007) desenvolveram pesquisa a respeito do desempenho térmico de um edifício residencial na cidade de Florianópolis, com clima quente e úmido. Foram comparados os desempenhos térmicos de oito quartos, em diferentes andares e diferentes orientações, em um edifício ainda desocupado. Como os quartos apresentavam paredes de diferentes espessuras, algumas propriedades térmicas destas paredes (transmitância térmica, capacidade térmica, atraso térmico) foram calculadas para permitir uma melhor comparação entre eles. Os valores de temperatura do ar e umidade relativa do ar foram monitorados e registrados por equipamentos *data loggers*, e os quartos foram analisados a partir destes valores.

A principal conclusão destes pesquisadores foi que o desempenho térmico da edificação residencial em Florianópolis durante o verão, pode ser melhorado se os valores de transmitância térmica dos componentes da fachada, bem como a área de fachada, forem diminuídos. Quanto menor a área de fachada e a transmitância do envelope, melhor o desempenho térmico do edifício no verão. Para o inverno, o desempenho térmico é melhorado quanto maiores os valores de capacidade térmica e atraso térmico. Porém, por tratar-se de um edifício desocupado, as medições de Ghisi e Massignani (2007) não sofreram influência de cargas térmicas internas (de usuários, iluminação e equipamentos) ou de qualquer tipo de ventilação. Sendo assim, as conclusões obtidas nesta pesquisa não devem ser estendidas aos casos de edifícios ocupados e ventilados.

Também no Brasil, Krüger (2003) realizou uma avaliação de desempenho térmico de um protótipo habitacional. Trata-se de um protótipo de aproximadamente 15m² de área interna, construído com um material alternativo chamado bloco ISOPET, um compósito que reaproveita isopor e garrafas

plásticas. Foram monitoradas a temperatura e a umidade relativa do ar, internas e externas, através de aparelhos *data loggers*, em um período de verão e um de inverno.

Krüger (2003) esclarece que durante todo o tempo de monitoramento (nos dois períodos), o protótipo permaneceu com as janelas sombreadas e sem qualquer tipo de ventilação. Seus resultados indicam que o envelope propiciou um amortecimento nos valores de pico de temperatura do ar, tanto mínimos como máximos. A partir de uma avaliação do desempenho térmico do protótipo, utilizando o método de somatória de graus-dia, o autor afirma que houve uma diminuição no desconforto em relação ao ambiente externo. Porém, com essa pesquisa, não é possível saber qual seria o desempenho do protótipo em uma situação real, com ventilação e ocupação de usuários.

Dornelles e Roriz (2005) realizaram pesquisa sobre a influência da inércia térmica da envoltória de edificações na variação de suas temperaturas internas, para a cidade de São Carlos, que possui clima quente e úmido no verão, e frio e seco no inverno. Para isso, foram monitorados três ambientes, de três edificações, com diferentes características construtivas, utilizando aparelhos do tipo hobo, que registraram valores de temperatura do ar. As medições ocorreram sempre com os ambientes fechados e sem ocupação. Cada um dos ambientes apresentava diferente valor de inércia térmica, sendo um com média, um com alta e o outro com baixa inércia térmica.

As edificações estudadas por Dornelles e Roriz (2005) foram monitoradas em diferentes dias, e por isso, para serem avaliadas comparativamente, calculou-se uma relação entre temperatura interna e externa, chamada Fator de Variação da Temperatura Interna (FTIh). A partir deste dado, estimaram-se as temperaturas que ocorreriam internamente se todos os ambientes estivessem submetidos ao mesmo clima externo, em um dia típico de verão e um de inverno. Nesses dias foram calculados graus-hora de desconforto por frio e calor, comparando os três ambientes.

Os resultados apresentados por Dornelles e Roriz (2005) demonstram que, nesses casos estudados, o melhor desempenho foi obtido pelo ambiente com média inércia térmica. O ambiente com alta inércia obteve o melhor desempenho no verão, porém o pior no inverno. Os autores acreditam que, nos meses frios, o desempenho de edificações com alta inércia térmica poderia ser

melhorado combinando-o com aquecimento solar passivo e ventilação seletiva. Porém, não foram realizados experimentos para verificação disto, e portanto, não há informações sobre como a ventilação poderia ter alterado tais resultados.

2.3. Estudo do Desempenho Térmico do Envelope Considerando a Ventilação Natural

Verifica-se que faltam informações sobre o desempenho térmico do envelope de edificações sob a influência da ventilação natural e da ocupação dos usuários. Essa é uma importante discussão, principalmente no caso do Brasil, já que grande parte dos edifícios, especialmente os residenciais, não possui condicionamento artificial, e utiliza prioritariamente a ventilação natural.

Esta influência pode ser percebida na pesquisa de Liping e Hien (2007), realizada em edifícios habitacionais em Singapura (clima quente e úmido). Os pesquisadores entendem que o projeto de fachadas considerando as propriedades térmicas dos materiais de construção, tamanho das aberturas, proteções solares, orientação solar e estratégias de ventilação, pode proporcionar um melhor conforto térmico com um mínimo consumo energético. Eles ressaltam que muitas pesquisas investigam o impacto da fachada no consumo de energia em edifícios com ventilação artificial, mas que ainda é deficiente o estudo da fachada em edifícios naturalmente ventilados.

Nesse estudo, Liping e Hien (2007) investigam quatro estratégias de ventilação, combinadas com diferentes opções de materiais de construção no envelope, para edifícios naturalmente ventilados em Singapura, através do programa de simulação *Thermal Analysis Software* (TAS). As estratégias de ventilação avaliadas foram: ventilação diurna, ventilação noturna, ventilação diurna e noturna, e sem ventilação. Quanto ao envelope do edifício, foram testadas 14 opções de materiais de vedação, com diferentes valores de condutância térmica¹ (W/m²K) e inércia térmica (horas).

¹ Taxa de fluxo de calor através de uma unidade de área de material, de uma das faces do material até a outra, para uma unidade de diferença de temperatura entre as duas faces, em condição de estado de equilíbrio. É igual ao inverso da resistência térmica de superfície a superfície do material.

Alguns dos principais resultados do estudo de Liping e Hien (2007), são que as propriedades dos materiais do envelope não geram impactos importantes no desempenho térmico do edifício quando estes são ventilados naturalmente, principalmente nos casos da ventilação diurna e da ventilação constante diurna e noturna. A condutância térmica do envelope possui influência considerável no desempenho do edifício apenas quando este não é ventilado, e a massa térmica do envelope é mais importante para o caso da ventilação noturna.

Outras verificações interessantes podem ser realizadas a partir da pesquisa de Özdeniz e Hançer (2005), que compara o desempenho térmico de 14 tipos de cobertura, verificando sua adequação para climas quentes. A pesquisa ocorreu na cidade de Gazimağusa, no Chipre, em coberturas com dimensões de aproximadamente 2m X 2m. Através de equipamentos *data loggers*, foram medidos e registrados os valores de temperaturas superficiais internas, temperaturas do ar, e umidades relativas do ar, durante o período de um ano. Estas medições ocorreram com as edificações em duas situações: condicionada artificialmente durante todo o ano, e não condicionada. Nesse segundo caso, as edificações eram naturalmente ventiladas durante o verão.

Com estes dados, Özdeniz e Hançer (2005) calcularam as horas de conforto térmico durante o ano monitorado (quando o PMV calculado ficava entre -0,5 e +0,5), para cada tipo de cobertura, nas duas situações de condicionamento. Os resultados demonstraram que quando a edificação era condicionada artificialmente, o tipo de cobertura exercia influência considerável no conforto. Nessa situação, dependendo da cobertura, as horas de conforto variaram de 73% do total de horas do ano no pior caso, até 91% no melhor caso, propiciando uma diferença de 18%. Já na situação em que a edificação não possuía condicionamento artificial, as horas de conforto variaram de 9% das horas do ano no pior caso, até 11% no melhor caso, ou seja, uma diferença de apenas 2%. Entre outras coisas, os autores concluíram que em edifícios sem condicionamento do ar, é pequena a diferença entre os desempenhos de diferentes coberturas.

No Brasil, recentemente, Matos (2007) realizou pesquisa com o objetivo de simular a ventilação natural para um modelo de residência unifamiliar, e verificar seu desempenho térmico para diferentes tipos de

envelope. As simulações foram realizadas para a cidade de Florianópolis – SC. Modelou-se um caso base e então foram estudadas diferentes opções de área de abertura de ventilação e iluminação, sombreamento de aberturas, orientação da edificação, valores de absorvância e transmitância das paredes e cobertura, e estratégias de ventilação. A maior parte dessas variações não foi simulada de forma combinada, e sim individualmente. Seis tipos de parede e quatro tipos de cobertura foram simulados a partir do caso base, que possuía ventilação diurna, sendo as janelas abertas entre 7h e 22h no verão e primavera, 7h e 18h no outono, e fechadas no inverno. As análises mostradas são para um quarto e para a sala da residência, com base em quantidade de graus-hora de desconforto.

Os resultados de Matos (2007) indicaram que as transmitâncias do envelope tiveram maior influência nas situações de maior desconforto, que eram o inverno para o quarto, e o verão para a sala. Nas outras situações (verão para o quarto, e inverno para a sala), as alterações praticamente não influenciaram o desempenho térmico do cômodo.

2.4. Avaliação de Desempenho Térmico Utilizando Simulação Computacional

As diversas ferramentas computacionais de simulação são importantes instrumentos para verificação e análise de edifícios em relação ao seu comportamento tanto energético quanto térmico, acústico e de iluminação, entre outros. Segundo Mendes et al. (2005), através dos programas de simulação é possível avaliar o desempenho térmico e energético de edificações para diferentes alternativas de projeto, sejam elas opções do desenho arquitetônico, componentes construtivos, sistemas de iluminação ou sistemas de condicionamento de ar.

Vários países, nas últimas décadas, têm realizado pesquisas na área e desenvolvido diferentes programas na busca por edifícios mais eficientes. O Departamento de Energia dos Estados Unidos tem disponível na Internet (DOE, 2007a) uma lista com 344 programas de simulação de edificações, para análises de eficiência energética, energias renováveis e sustentabilidade em edifícios.

O programa francês COMFIE (Calcul d'Ouvrages Multizones Fixé à une Interface Experte), por exemplo, utilizado por Krüger e Givoni (2004), é capaz de realizar simulações horárias de edifícios, estimando consumo energético e variações de temperatura. Outro programa, chamado TAS (Thermal Analysis Software), utilizado por Wong e Li (2006) e por Liping e Hien (2007), também realiza simulações térmicas e energéticas de edifícios, a fim de otimizar seu desempenho ambiental, energético e de conforto.

Um dos programas de simulação de edificações mais utilizados no mundo é o EnergyPlus, desenvolvido pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos. Ele foi desenvolvido para estimar trocas térmicas, índices de iluminação e consumo energético de edifícios, a partir da modelagem física do edifício e seus sistemas de ventilação, iluminação, aquecimento e resfriamento. Além disso, as versões mais recentes do programa incluem inovações nas simulações, como a possibilidade de adicionar ventilação natural, usos de água, sistemas fotovoltaicos, índices de conforto térmico, entre outros (DOE, 2007b).

O EnergyPlus realiza simulações para o clima do local de interesse do usuário, a partir de um arquivo climático com dados horários. Ele calcula temperaturas internas e trocas de calor em edifícios não condicionados artificialmente, ou, no caso de edifícios com condicionamento artificial, calcula cargas de aquecimento e resfriamento necessárias para manter a temperatura em uma faixa de conforto, verificando também o consumo de energia resultante. O programa permite a análise das cargas térmicas provenientes dos componentes construtivos, de equipamentos existentes no ambiente, do sistema de iluminação, de usuários e das trocas de ar.

No Brasil, ainda são poucos os profissionais de engenharia e arquitetura que utilizam tais programas como ferramenta de trabalho. As principais causas disto são a complexidade dos programas e a conseqüente dificuldade e demora no aprendizado pelos usuários. Westphal e Lamberts (2005) destacam que a complexidade dos fenômenos envolvendo o comportamento térmico de edifícios implica em uma grande quantidade de dados de entrada nas simulações, o que requer conhecimentos multidisciplinares dos usuários.

As principais dificuldades na modelagem das simulações costumam

ocorrer na definição dos padrões de uso e das trocas de ar da edificação. Estes padrões de uso dizem respeito à inclusão de pessoas no modelo, uso de iluminação e equipamentos, e ainda ao padrão de abertura de janelas, portas e persianas. O problema encontra-se no momento de estimar o tempo e horários de uso, ao longo do dia, semana e meses do ano. A inclusão desses fatores é de grande importância, principalmente tratando-se de edificações residenciais, pois eles influenciam diretamente nas trocas de calor do edifício. A sua desconsideração, afasta a simulação da situação real de uma residência.

Com relação às trocas de ar, a simulação pode incluir infiltração e ventilação. A infiltração trata dos fluxos de ar que penetram no edifício sem a intenção do usuário, geralmente através de frestas ou de rápidas aberturas e fechamentos de portas externas. A ventilação, que pode ser natural ou artificial, trata dos fluxos de ar provocados intencionalmente pela abertura de janelas e portas (ventilação natural), ou pelo acionamento de equipamentos mecânicos como ventiladores e exaustores (ventilação artificial). A dificuldade na definição desses parâmetros tem provocado a sua desconsideração em muitas simulações, ou ainda a adoção de valores constantes para todo o ano.

Mesmo com tais dificuldades, as simulações têm sido de grande valia para análises termo-energéticas de edificações. Com base em uma pesquisa sobre desempenho térmico de diferentes coberturas utilizando a simulação computacional, Batista et al. (2005) concluíram que programas como o EnergyPlus são ferramentas valiosas para o projetista, exigindo, contudo, um conhecimento aprofundado a respeito das diversas variáveis envolvidas no balanço térmico de uma edificação. Isso é necessário para assegurar a correta interpretação dos dados das simulações, auxiliando em sua posterior aplicação no projeto de edificações energeticamente eficientes e capazes de garantir a satisfação dos seus usuários.

Grings e Beyer (2003) realizaram um estudo verificando a confiabilidade de dados do comportamento térmico de uma edificação, obtidos através de simulação computacional. O trabalho comparou valores de temperatura do ar e de carga térmica, obtidos em medições no ambiente real, com valores obtidos por simulação computacional, pelo programa EnergyPlus. A maior dificuldade relatada pelos pesquisadores foi a determinação da taxa de infiltração do ar. Ao final do estudo, eles consideraram que houve uma boa

correlação entre os valores medidos e simulados.

2.5. Considerações Finais

Esta revisão bibliográfica procurou apresentar informações referentes à análise do desempenho térmico de edificações, de forma a embasar o presente trabalho. Foram apresentados métodos de análise utilizados por diferentes pesquisadores, em alguns lugares do mundo, incluindo o Brasil.

Grande parte dos trabalhos utiliza como principal critério, para análise do desempenho térmico, o número de horas de desconforto ou o número de graus-hora de desconforto, calculado a partir do total de horas por ano em que as temperaturas internas do ambiente estudado apresentam-se fora de limites de temperatura determinados como confortáveis. Existem, entretanto, divergências quanto à determinação de quais seriam tais limites de temperatura de conforto. Estudos recentes indicam que edificações em climas quentes e/ou naturalmente ventiladas devem utilizar diferentes limites de conforto em relação àquelas em climas frios ou com condicionamento artificial.

As pesquisas descritas demonstram também um crescente interesse em entender o papel do envelope no desempenho térmico das edificações, mas percebe-se um pequeno número de trabalhos que estuda as edificações ventiladas naturalmente, inclusive no Brasil. Os resultados obtidos nas pesquisas que não incluíram a ventilação natural, apontam o envelope como um importante fator na determinação do desempenho térmico da edificação. Modificações nas características da envoltória provocaram alterações consideráveis no desempenho do edifício. Já nas pesquisas que incluíam a ventilação natural, modificações no envelope provocaram pequenas, ou quase nenhuma, alterações no desempenho térmico da edificação.

As pesquisas utilizando simulação computacional indicam que essa é uma importante ferramenta para análises de desempenho térmico, contanto que o pesquisador tenha o domínio do programa. Porém deve-se destacar que as ferramentas computacionais têm limitações, como por exemplo na determinação da velocidade interna do ar.

CAPÍTULO 3

3. MÉTODO

O método aqui proposto compreende o estudo do desempenho térmico do envelope de uma edificação residencial unifamiliar, tanto através do estudo em campo, quanto da simulação computacional. Ele consiste, portanto, de duas etapas principais:

1. Estudo e monitoramento de uma edificação real, através da caracterização dos materiais e componentes do seu envelope, e de medições de temperaturas do ar. Este monitoramento ocorreu em quatro períodos do ano, e os valores obtidos nessas medições foram utilizados para calibrar um modelo base de simulação computacional.

2. Utilização de simulação computacional para analisar o desempenho térmico do modelo da edificação com diferentes variações de propriedades térmicas no envelope, verificando a influência do envelope no desempenho. Nas simulações, a edificação foi modelada com e sem ventilação natural e usuários.

3.1. Monitoramento da Edificação

3.1.1. Descrição da Edificação Monitorada

A edificação estudada e monitorada é uma residência unifamiliar construída na cidade de Florianópolis, em uma parceria entre a Eletrosul, a Eletrobrás e o Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LabEEE) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Denominada como “Casa Eficiente”, sua construção foi resultado de uma pesquisa a respeito de tecnologias e estratégias para obtenção de eficiência energética e conforto ambiental em edificações residenciais. Seu objetivo é a disseminação dos conceitos de eficiência energética, adequação climática e uso racional da água, não só para a comunidade acadêmica, mas também para os profissionais que atuam no mercado da construção civil. O projeto arquitetônico foi desenvolvido pelas arquitetas Alexandra Albuquerque Maciel e Suely Ferraz de Andrade.

Essa casa funciona em regimes quinzenais alternados para realização de pesquisas (como um laboratório de estudo) e para visita pública

(divulgação das estratégias e tecnologias incorporadas ao seu projeto). Ela foi escolhida para este estudo pois, nos períodos em que fica destinada à pesquisa, há a possibilidade de controle total da ocupação e manipulação das aberturas. Além disso, foi escolhida por possuir aberturas em fachadas opostas, favorecendo a ventilação cruzada, que é fator importante nesta pesquisa. A residência está localizada no bairro Pantanal (Figura 3.1), no pátio da sede da Eletrosul, ao lado do campus da UFSC, conforme a indicação da Figura 3.2. Trata-se de uma região predominantemente residencial e com pouca verticalização.



Figura 3.1 – Localização da residência monitorada na cidade de Florianópolis.

Esta residência possui 124 m² de área, e foi projetada e construída com a intenção de proporcionar o máximo de conforto aos seus usuários, com o mínimo de consumo energético, buscando alcançar um bom desempenho térmico. Para isso, um estudo bioclimático foi realizado por seus projetistas, permitindo a utilização de algumas estratégias de projeto, como:

- Orientação da edificação definida a partir de estudos de insolação, permitindo o aproveitamento da radiação solar para aquecimento no inverno, e com o sombreamento necessário das fachadas nos períodos onde esse ganho de calor é indesejado (Figura 3.3);
- Aproveitamento da ventilação natural para resfriamento, graças ao

favorecimento da ventilação cruzada, mas evitando ventos indesejados de velocidade muito elevada, através de dispositivos redutores de vento (Figura 3.4);

- Inércia e isolamento térmico nas paredes, esquadrias e coberturas (Figura 3.5).

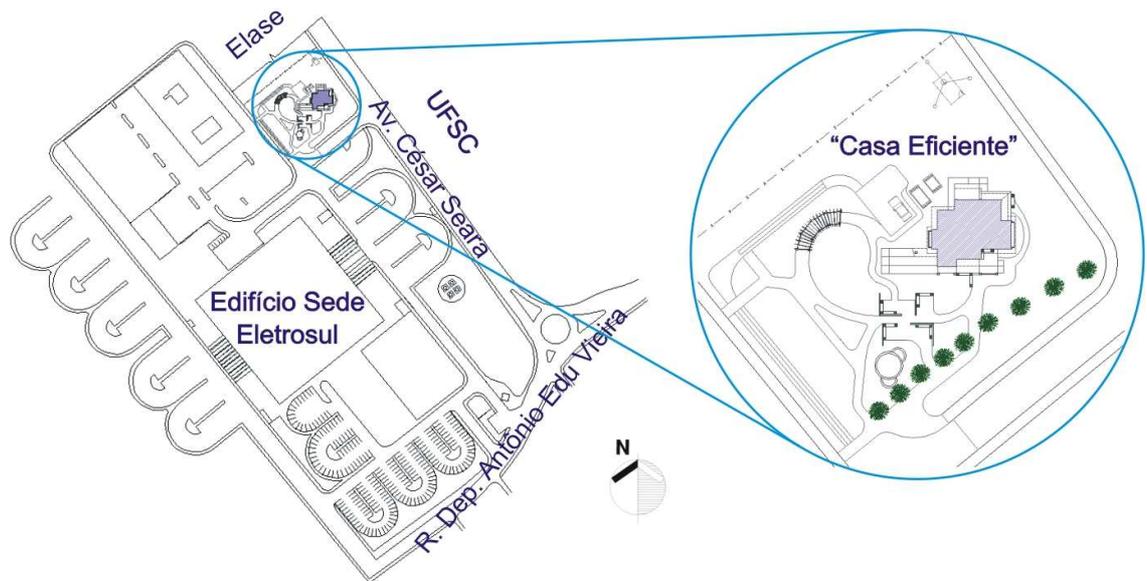


Figura 3.2 – Implantação da residência no pátio da Sede da Eletrosul.

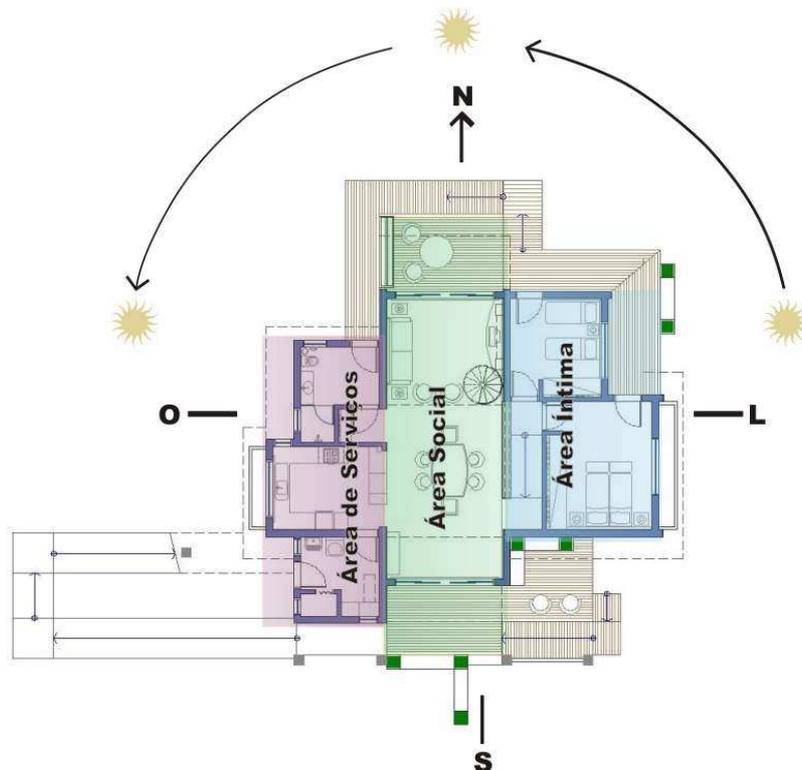


Figura 3.3 – Planta Baixa da residência.



Figura 3.4 – Fotografias da residência – fachada Sul.

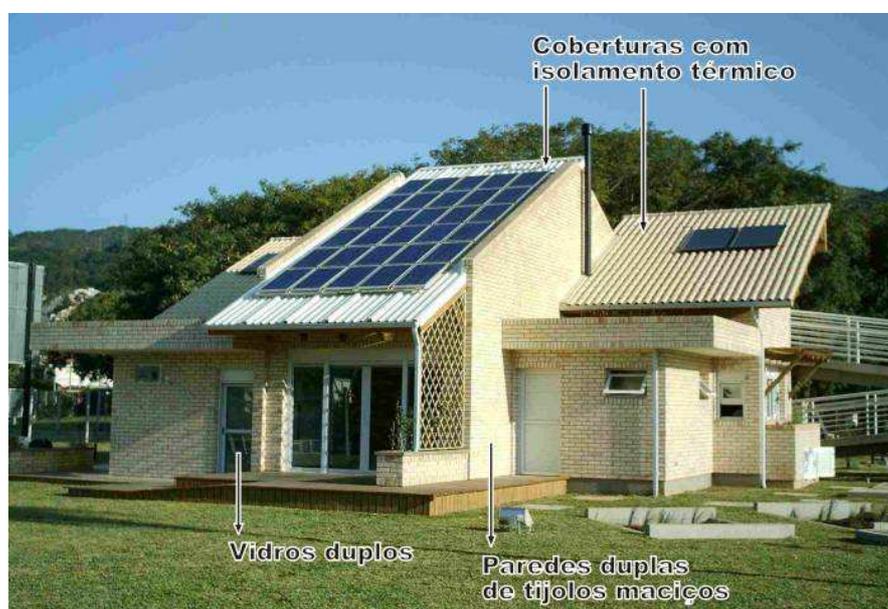


Figura 3.5 – Fotografia da residência – fachadas Norte e Oeste.

Os cortes e a planta baixa mais detalhada da edificação, com indicação de ambientes e áreas internas, podem ser visualizados no Apêndice A. Quanto ao envelope, a residência possui paredes duplas, de tijolos cerâmicos maciços, com camada de manta de lã de rocha no interior, fazendo o isolamento térmico. Apenas algumas paredes internas da residência não são duplas, possuindo uma camada de tijolos cerâmicos maciços. O uso de inércia térmica e isolamento térmico busca reduzir ganhos de calor nos períodos quentes, e perdas nos períodos de frio.

Houve também uma preocupação especial com a cobertura, já que ela é um elemento essencial nas trocas de calor de edificações térreas. Na cobertura desta residência são utilizadas três diferentes soluções (Figura 3.6):

1. Telha cerâmica clara, camada interna de manta de lã de rocha e isolamento refletivo, e forro de madeira: sobre o quarto de casal, corredor e cozinha;

2. Telha metálica, camada interna de manta de lã de rocha, e forro de madeira: sobre as salas de jantar e estar (em uma das águas do telhado está instalado o painel fotovoltaico);

3. Laje horizontal, coberta total ou parcialmente por área ajardinada – “teto-jardim”: sobre o quarto de solteiro, banheiro e área de serviços.

Estas camadas de isolamento refletivo proporcionam uma redução dos ganhos térmicos diurnos e das perdas noturnas. Todos os telhados (com exceção do teto-jardim) possuem inclinação de 27°. O forro de madeira existente em alguns cômodos possui a mesma inclinação do telhado.

As esquadrias das portas externas e de todas as janelas da casa são de PVC, com vidros duplos, para garantir seu isolamento térmico. Elas possuem (com exceção da porta na área de serviço) persianas externas também de PVC, na cor branca, para permitir o sombreamento quando desejado e a ventilação noturna.

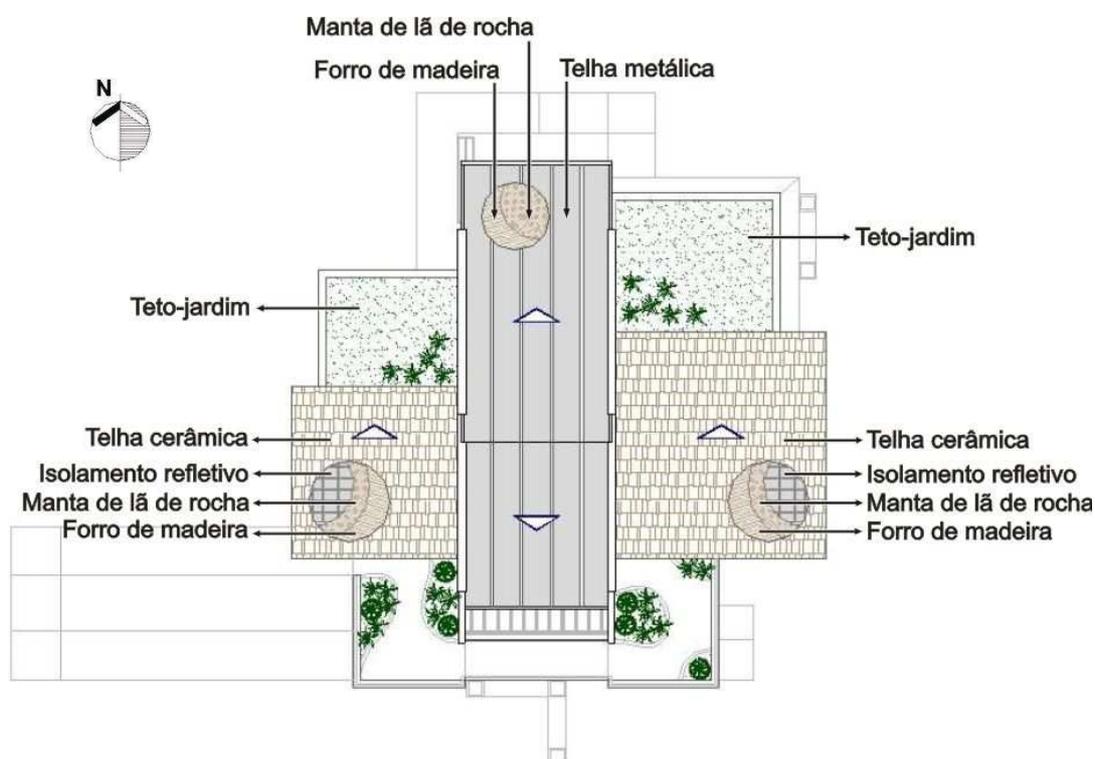


Figura 3.6 – Planta de cobertura da residência.

3.1.2. Períodos de Monitoramento

Foram utilizados, neste trabalho, dados de monitoramento da edificação em quatro períodos. Dois deles ocorreram durante o inverno, nos dias 15 a 21 de agosto de 2007 e 11 a 17 de setembro de 2007. Os outros dois ocorreram no verão, nos dias 24 a 30 de dezembro de 2007 e 07 a 13 de janeiro de 2008. Cada um dos períodos de monitoramento teve duração de sete dias. Esta limitação dos dias de monitoramento se deveu ao fato desta casa funcionar tanto como laboratório de estudo e pesquisas, quanto como ambiente para visitação e divulgação de tecnologias, restringindo a possibilidade de manipulação das aberturas e o controle da ocupação da casa para as medições.

Durante os períodos de agosto e dezembro a casa permaneceu com janelas e portas externas fechadas, sem ventilação, nas 24 horas do dia, todos os dias. Nos períodos de setembro e janeiro a casa foi monitorada aberta, com ventilação natural, em horários determinados do dia. Apenas no período de dezembro ela foi monitorada sem usuários.

3.1.3. Variáveis Monitoradas

Nos quatro períodos de medição, foram utilizados equipamentos Hobos *data loggers*, Marca Onset Computer Corporation, modelo Hobo U12 (Figura 3.7). Eles são utilizados para medir e armazenar dados de temperatura do ar e umidade relativa do ar. Suas especificações técnicas estão indicadas na Tabela 3.1. Os valores armazenados foram transferidos para computador através do programa HOBOWare (Software for HOBOW U-Series Data Loggers & Devices), versão 2, para Windows.

Tabela 3.1 – Especificações técnicas do Hobo U12.

Resolução	Temperatura: 0,03°C (a 25°C) Umidade relativa: 0,03%
Temperatura de operação	De -20°C a 70°C
Faixa de medição	Temperatura: de -20°C a 70°C Umidade: 5% a 95%
Precisão	Temperatura: $\pm 0,35^\circ\text{C}$, para temperatura de 0°C a 50 °C Umidade relativa: $\pm 2,5\%$, para umidade de 10% a 90%



Figura 3.7 – Hobos U12 *data logger* - Onset Computer Corporation.

Com os Hobos, foram obtidos dados de temperatura do ar (bulbo seco) e umidade relativa do ar, no interior dos ambientes da casa. Eles foram programados para registrar os dados de 5 em 5 minutos, e, para que fossem posteriormente utilizados em comparações com dados de simulação computacional, foram calculadas médias horárias a partir de seus valores.

Foram utilizados seis Hobos, instalados nos seguintes cômodos da residência: quarto de casal, quarto de solteiro, sala de jantar, sala de estar, cozinha e banheiro. Eles foram posicionados aproximadamente no centro do cômodo, nos pontos indicados na Figura 3.8, a 1,80 metros do piso. A altura de medição indicada pela ISO 7726 (ISO, 1996) é de 1,10 metros acima do piso, para captar as trocas térmicas de indivíduos em pé, porém esse posicionamento do equipamento poderia provocar incômodos aos visitantes e pesquisadores da casa e, portanto, não foi adotado.

Os dados obtidos nos quatro períodos de monitoramento da residência não foram utilizados diretamente para a análise do seu desempenho. Eles serviram como base para calibração do modelo computacional.

As variáveis ambientais externas foram obtidas pela estação meteorológica do Laboratório de Engenharia de Processos de Conversão e Tecnologia de Energia (LEPTEN) do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC. Essa estação está localizada a aproximadamente 550 metros da edificação estudada, e registra dados de temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade e direção do vento, pressão atmosférica e radiação solar global, direta e difusa.

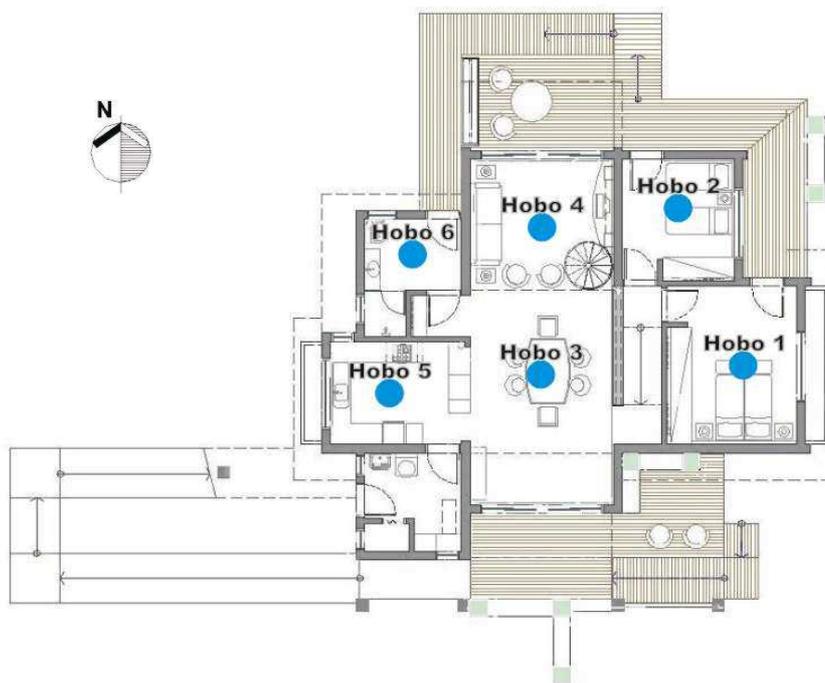


Figura 3.8 – Planta baixa da edificação com indicação dos pontos de medição da temperatura utilizando Hobos.

3.2. Simulação Computacional

Conforme apresentado na revisão bibliográfica, diversas pesquisas indicam a simulação computacional como uma ferramenta eficaz para análises de desempenho térmico. Nesta pesquisa, optou-se pela utilização de simulações pela possibilidade de estudar um determinado modelo de edificação, variando os tipos de materiais construtivos e sua ocupação e ventilação.

O programa escolhido foi o EnergyPlus (versão 2.2.0), por ser um dos mais utilizados no mundo atualmente, e ter atestada, por pesquisas, a confiabilidade do seu algoritmo no que diz respeito ao comportamento térmico de edificações. Algumas características consideradas na escolha desse programa foram sua possibilidade de simular a partir de um arquivo climático com dados horários, de inserir cargas térmicas de equipamentos e usuários e de adicionar ventilação natural.

O arquivo climático de Florianópolis utilizado nas análises finais de desempenho térmico deste trabalho é baseado no Ano Climático de Referência (*Test Reference Year – TRY*) da cidade. Este ano de referência foi definido por Goulart et al. (1998), e está disponível em <<http://www.labee.ufsc.br>>. O

arquivo climático usado na calibração do modelo, descrita a seguir, foi criado a partir de dados meteorológicos medidos nos quatro períodos de monitoramento da edificação.

3.2.1. Calibração do Modelo para Simulação

Pedrini (1997) afirma que as diversas variáveis que compõem um modelo, quantificadas sob a influência de inúmeros fatores, tornam tal modelo passível de inúmeras combinações para um mesmo caso. Essa variabilidade implica em diferentes graus de fidelidade do modelo para com o caso real, gerando imprecisões nos resultados.

Segundo Westphal e Lamberts (2005), para que um programa computacional apresente resultados confiáveis, é essencial que o modelo de simulação seja corretamente calibrado. Ou seja, o modelo virtual do edifício analisado deve representar com certa fidelidade o comportamento térmico e energético desse edifício. Os métodos de calibração de modelos computacionais consistem basicamente de ajustes e correções dos valores de suas variáveis, baseados na comparação entre resultados obtidos por simulação e dados de edificações reais (Pedrini, 1997).

Para este estudo, foi inicialmente realizada uma calibração, modelando-se uma edificação semelhante à monitorada, e comparando os valores obtidos por medição e por simulação. Com este procedimento pretendeu-se verificar a qualidade dos dados obtidos através da simulação, por sua proximidade com os dados medidos. Sendo assim, definiu-se um modelo inicial para calibração, com as características descritas a seguir.

As simulações para calibração não utilizaram o arquivo climático baseado no ano climático de referência (TRY) da cidade. Nelas foi utilizado um arquivo com dados climáticos da cidade de Florianópolis, medidos na estação meteorológica do LEPTEN – UFSC durante os meses definidos para monitoramento da edificação (agosto, setembro e dezembro de 2007, e janeiro de 2008). Portanto, a calibração foi simulada apenas para quatro semanas, sendo cada semana em um dos meses indicados anteriormente.

3.2.1.1. Descrição do Modelo Inicial Para Calibração

Pedrini (1997) define que a simulação do comportamento de uma edificação se inicia na representação do objeto de estudo, como um modelo. O modelo é uma abstração da realidade, compilado segundo a linguagem do programa computacional.

Para a simulação de edificações no programa computacional EnergyPlus, é necessária a definição de **zonas térmicas** do modelo. Aqui, a residência foi modelada com nove zonas térmicas, cada uma representando os seguintes ambientes: área de serviços, cozinha, banheiro, salas, corredor, quarto de casal, quarto de solteiro, área das caixas d'água (em cima da cozinha) e área do boiler (em cima do corredor). A Figura 3.9 mostra duas perspectivas desse modelo, e a Figura 3.10 mostra as plantas com suas dimensões.

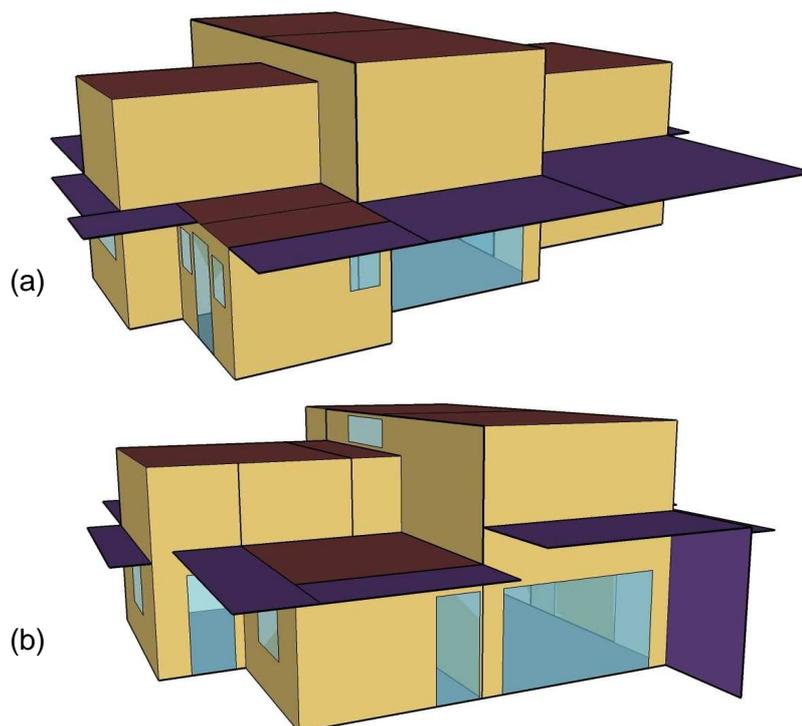


Figura 3.9 – Perspectivas do modelo de calibração da simulação: fachadas oeste e sul (a), e leste e norte (b).

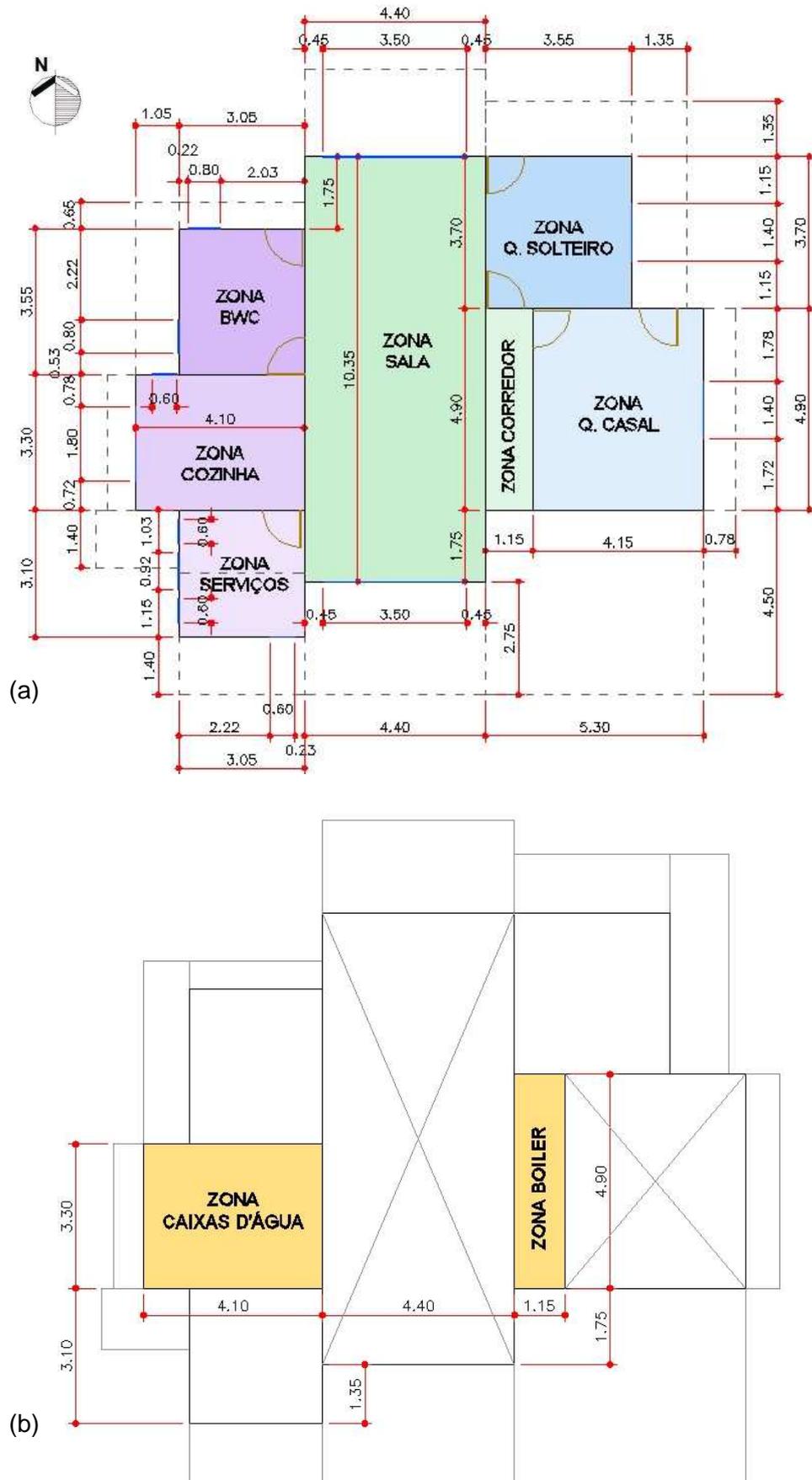


Figura 3.10 – Plantas do modelo de calibração da simulação: térreo (a) e superior (b).

As **aberturas** (portas e janelas) foram modeladas conforme o existente na casa. Também foram incluídas no modelo as proteções solares existentes nas diversas fachadas da residência. A principal diferença em relação à edificação real está na geometria das coberturas, modeladas de forma simplificada, sem as inclinações. As alturas desses planos de cobertura foram calculadas de forma a proporcionar o mesmo volume interno dos ambientes reais.

Uma importante informação para a simulação de edificações térreas, especialmente as residenciais, é a **temperatura do solo**. Isso porque as trocas de calor entre piso e solo são determinantes no resultado final das trocas de calor do ambiente. Para as temperaturas do solo desta primeira simulação, foram utilizados os valores existentes no arquivo climático (TRY) de Florianópolis, que dizem respeito ao ano de referência da cidade. Esses valores são apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Temperaturas do solo para o modelo inicial de calibração.

Mês	Temperatura média do solo [°C]
Janeiro	22,75
Agosto	17,48
Setembro	17,16
Dezembro	21,01

Quanto aos **materiais**, foram definidos dois tipos de paredes: duplas e simples. As paredes duplas são adotadas em todas as paredes externas e na maior parte das internas do modelo. Elas possuem três camadas: tijolo, manta de lã de rocha e tijolo. O tijolo é cerâmico, maciço e aparente (sem reboco), com espessura de 10 cm; a manta de lã de rocha possui 2,5 cm de espessura. A parede simples é adotada no caso de apenas uma parede interna do modelo, e possui três camadas: reboco, tijolo e reboco. O reboco, interno e externo, é de argamassa com espessura de 2,5 cm; o tijolo é cerâmico maciço, com 10 cm de espessura. Esquemas desses dois tipos de parede são mostrados na

Figura 3.11. O piso de toda a casa foi modelado com uma camada de concreto, com 10 cm de espessura. Não foi considerado o revestimento cerâmico existente no piso.

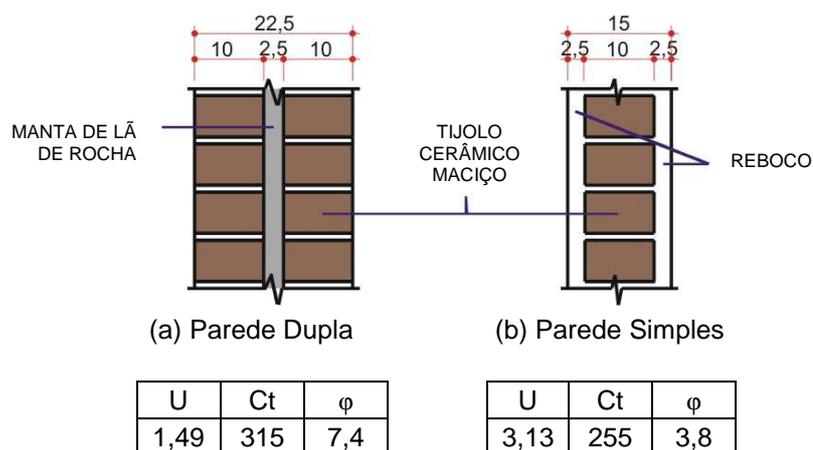


Figura 3.11 – Esquema dos dois tipos de parede do modelo de calibração: dupla (a) e simples (b).

Nota: U = Transmitância térmica [$W/m^2.K$]; Ct = Capacidade térmica [$kJ/m^2.K$]; ϕ = Atraso térmico [horas].

Diferentes tipos de cobertura foram criados para o modelo de calibração, conforme o existente na residência estudada. As zonas foram simuladas com as opções de coberturas descritas a seguir. Um esquema de cada uma delas é mostrado na Figura 3.12.

- Cozinha e corredor: Por possuírem outra zona acima delas (área das caixas d'água e área do boiler), sua cobertura é apenas uma laje horizontal de concreto, com 10 cm de espessura.

- Quarto de casal, área das caixas d'água (em cima da cozinha) e área do boiler (em cima do corredor): Sua cobertura possui seis camadas, sendo elas de telha cerâmica, câmara de ar, polietileno aluminizado, câmara de ar, manta de lã de rocha e forro de madeira. A telha cerâmica possui 1,0 cm de espessura. A primeira câmara de ar é do tipo não ventilada com superfície de baixa emissividade e espessura maior que 5,0 cm, de acordo com o indicado pela norma NBR 15220 (ABNT, 2005b). O polietileno aluminizado possui 5 mm. A segunda câmara de ar é do tipo não ventilada com superfície de alta emissividade e espessura maior que 5,0 cm. A manta de lã de rocha é a mesma utilizada no interior das paredes. O forro de madeira possui 1,5 cm de espessura.

- Salas: Sua cobertura possui quatro camadas, sendo elas de telha metálica, câmara de ar, manta de lã de rocha, e forro de madeira. A telha metálica é de aço zincado, possui pintura branca e 1,0 mm de espessura. A câmara de ar, modelada de acordo com a norma NBR 15220 (ABNT, 2005b), é

do tipo não ventilada, com superfície de alta emissividade e espessura de 3,0 cm. A manta de lã de rocha e o forro de madeira possuem as características já descritas na cobertura do quarto de casal. Além disso, metade da área da cobertura da sala (a parte mais ao norte) possui mais duas camadas acima da telha: outra câmara de ar e vidro opaco representando o painel fotovoltaico. Essa câmara de ar possui superfície de alta emissividade e espessura maior que 5,0 cm.

- Banheiro e Quarto de Solteiro: Sua cobertura possui três camadas, sendo uma cobertura ajardinada sobre uma laje horizontal, com isolamento térmico entre elas. Esta cobertura ajardinada foi modelada como um material específico do programa EnergyPlus, denominada EcoRoof, onde são descritas as características da vegetação utilizada e do tipo de solo. O isolamento é de poliestireno extrudado, com 2,0 cm de espessura. A laje horizontal é de concreto, com 10 cm de espessura.

- Área de Serviços: Essa zona possui dois tipos de cobertura. Isso porque esse cômodo, na residência estudada, apresenta uma cobertura com laje horizontal, apenas parcialmente coberta por jardim. Assim, para a simulação, sua cobertura foi modelada uma parte apenas com uma camada de laje de concreto, e outra parte com três camadas, sendo uma laje de concreto, isolamento térmico e uma cobertura ajardinada. As propriedades desses materiais são as mesmas utilizadas na cobertura do banheiro e quarto de solteiro.

As janelas e portas externas possuem duas camadas de vidro incolor de 3,0 mm de espessura, com uma camada de ar de 12 mm no interior. As propriedades do vidro foram obtidas nos modelos de vidro do próprio programa EnergyPlus. Apenas a porta externa do banheiro não é de vidro, e sim de PVC, com 1,0 cm de espessura. As demais portas da casa (portas internas) são de madeira com pintura branca, tendo 3,0 cm de espessura.

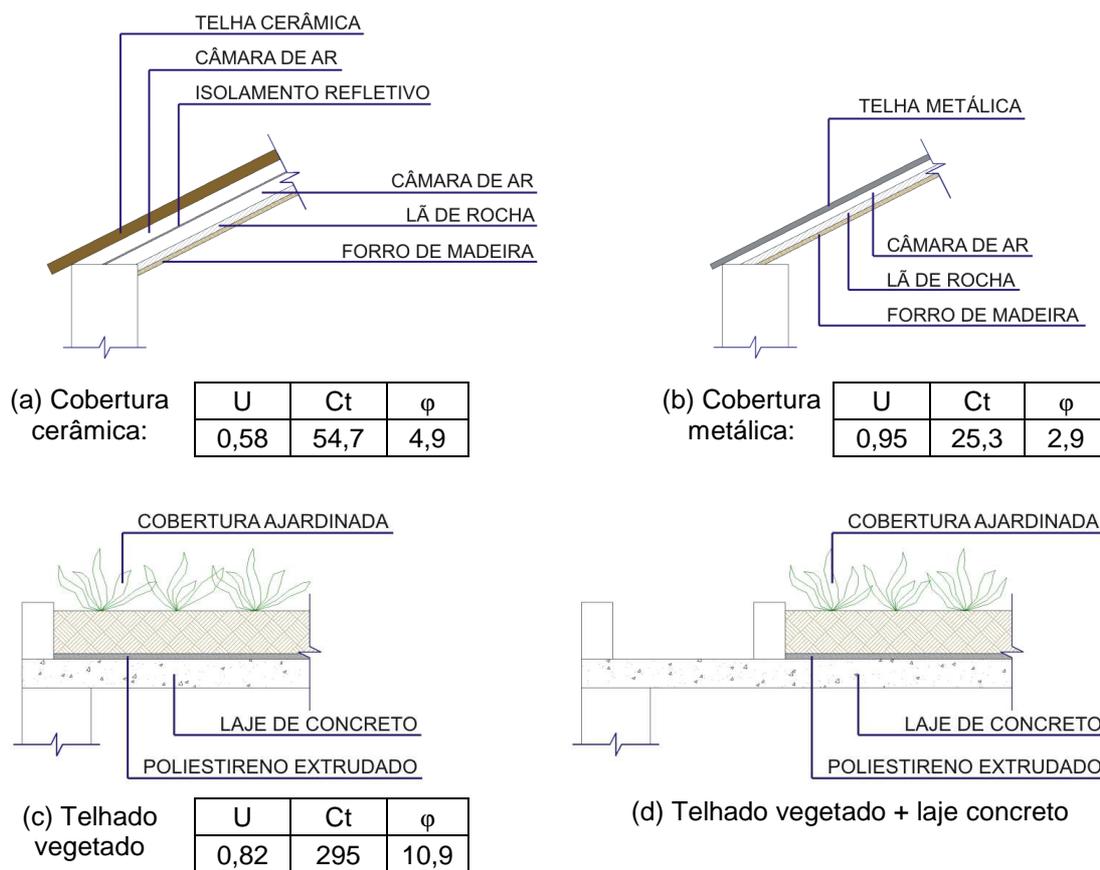


Figura 3.12 – Esquema dos tipos de cobertura do modelo de calibração: telha cerâmica (a), telha metálica (b), teto jardim (c), teto jardim + laje de concreto (d).

Nota: U = Transmitância térmica [$W/m^2.K$]; Ct = Capacidade térmica [$kJ/m^2.K$]; ϕ = Atraso térmico [horas].

As propriedades térmicas da maior parte dos materiais usados, tais como condutividade térmica, densidade, calor específico, absorvância para radiação solar e resistência térmica, foram obtidas na norma NBR 15220 (ABNT, 2005b; 2005c). Apenas as características utilizadas para a parede de tijolos cerâmicos maciços foram obtidas em Ordenes et al. (2003), de forma que fosse considerada a influência da argamassa de assentamento, adotando valores para um material equivalente. Estes dados são apresentadas na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Características dos materiais utilizados na simulação computacional.

Material	Condutividade térmica [W/m.K]	Densidade [kg/m ³]	Calor específico [J/kg.K]	Absortância	Resistência térmica [m ² .K/W]
Tijolo cerâmico maciço 10 cm, com argamassa de assentamento	0,900	1764	920	0,3	0,107
Argamassa reboco 2,5 cm	1,150	2000	1000	0,2	0,022
Concreto maciço 10,0 cm	1,750	2200	1000	0,3	0,057
Telha cerâmica 1,0 cm	1,050	2000	920	0,4	0,010
Telha metálica 0,1 cm	112,00	7100	380	0,2	0,000
Madeira para forro 1,5 cm	0,140	600	2300	0,7	0,107
Madeira para porta 3,0 cm	0,150	600	1340	0,2	0,200
PVC para esquadria 1,0 cm	0,200	1350	960	0,2	0,050
Polietileno aluminizado 0,5 cm	0,400	1200	2299	0,3	0,013
Manta de lã de rocha 2,5 cm	0,045	100	750	-	0,555
Poliestireno extrudado 2,0 cm	0,035	30	1420	-	0,571
Câmara de ar de baixa emissividade, espessura >5,0 cm - fluxo descendente	-	-	-	-	0,61
Câmara de ar de alta emissividade, espessura >5,0 cm - fluxo descendente	-	-	-	-	0,21
Câmara de ar de alta emissividade, espessura 3 cm - fluxo descendente	-	-	-	-	0,18

O EnergyPlus permite também a inclusão de **ganhos internos de calor** no modelo, podendo ser por equipamentos elétricos, iluminação e ocupação de usuários. Para a calibração, os ganhos internos foram incluídos conforme o uso ocorrido na edificação durante os dias de monitoramento, nos quatro períodos determinados. Grosso

Tendo em vista que, nos períodos considerados, a edificação foi ocupada apenas durante o dia, seus usuários aproveitaram ao máximo a iluminação natural, com o mínimo de uso de lâmpadas. Por isso, no modelo de calibração não foram incluídos ganhos de calor pela iluminação.

Quanto aos equipamentos elétricos, representando a realidade observada no local, dois aparelhos foram considerados: uma geladeira e um computador. A geladeira permaneceu ligada 24 horas por dia, todos os dias, na zona da cozinha. O computador permaneceu ligado também 24 horas por dia, todos os dias, na zona do quarto de casal. Para a geladeira considerou-se uma potência média de 50 W, e para o computador de 130 W. Estes valores foram obtidos a partir de medições de consumo desses eletrodomésticos da casa,

utilizando um medidor portátil de consumo, marca Yokogawa. O valor adotado para a fração radiante de ganho de calor foi 0,5 para os dois equipamentos, que é um valor comumente utilizado por pesquisadores, tendo em vista que a divisão entre as parcelas radiante e convectiva (de ganho de calor) para grande parte dos equipamentos é geralmente uniforme (ASHRAE, 2005b).

A ocupação dos usuários não foi constante durante o monitoramento. Por isso, foram criados vários padrões de ocupação definindo a quantidade de usuários em cada zona do modelo, para cada um dos dias, dos quatro períodos monitorados. Gráficos referentes à ocupação da casa durante os dias de monitoramento são apresentados na Figura 3.13 para o período de agosto/07, na Figura 3.14 para setembro/07 e Figura 3.15 para janeiro/08. Os ambientes que não são mostrados nas figuras, não foram ocupados (por no mínimo 30 minutos) nos dias de monitoramento. No período de dezembro/07 a casa permaneceu sem usuários. Em todos os finais de semana, ou seja, sábados e domingos, a casa também permaneceu sem usuários.

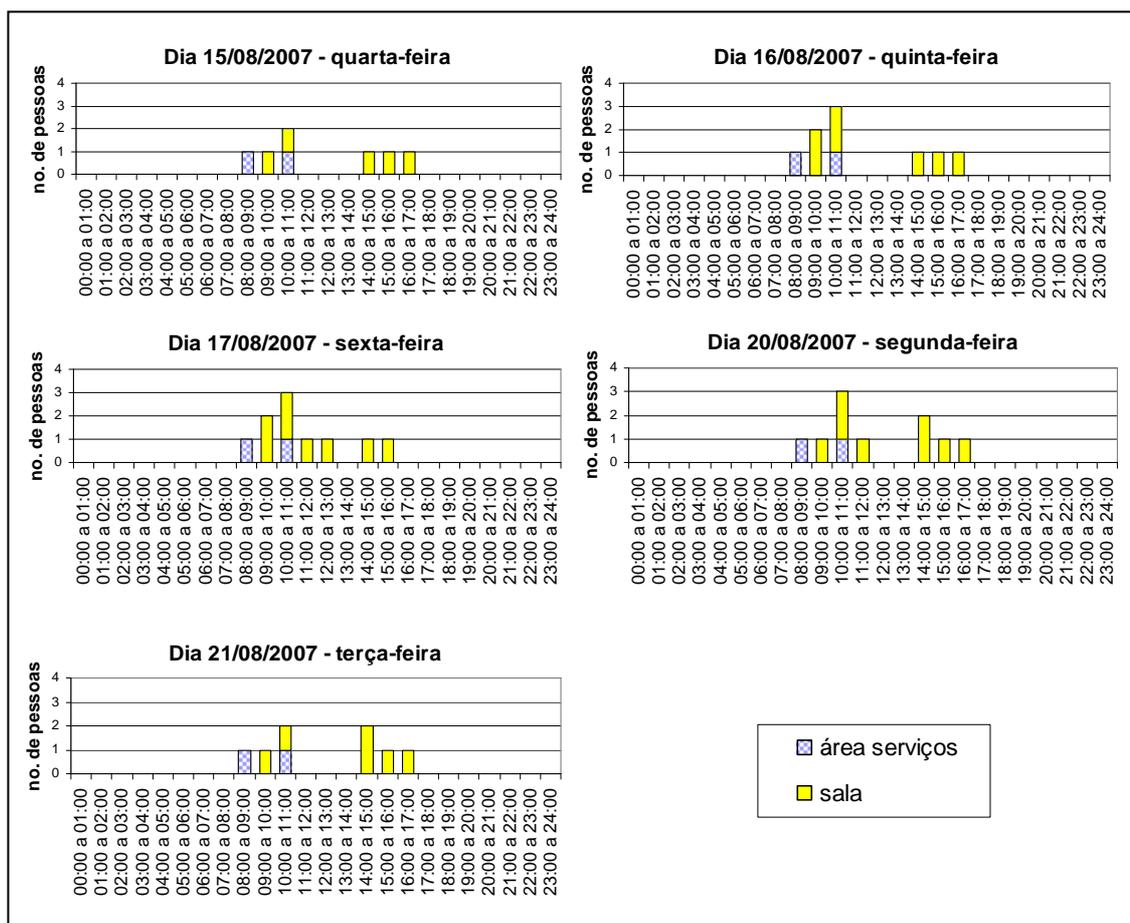


Figura 3.13 – Ocupação da casa – período de monitoramento em agosto de 2007

Foram também definidas as atividades realizadas em cada zona, resultando em diferentes produções de calor. Esses dados, apresentados na Tabela 3.4, foram baseados nos valores de taxa metabólica (W/m^2) da ASHRAE (2005a), considerando uma área de pele média de $1,80 m^2$. Nas simulações, o valor do calor produzido [W] é multiplicado pela quantidade de pessoas na zona.

Tabela 3.4 – Atividades realizadas e calor produzido nas zonas térmicas do modelo.

Zona	Atividade realizada	Calor produzido [W/m^2]	Calor produzido para área de pele = $1,80 m^2$ [W]
Área de serviços	Limpeza doméstica	115	207
Sala	Sentado, lendo e/ou escrevendo	60	108
Cozinha, banheiro, corredor, quarto solteiro e quarto casal	Em pé	70	126

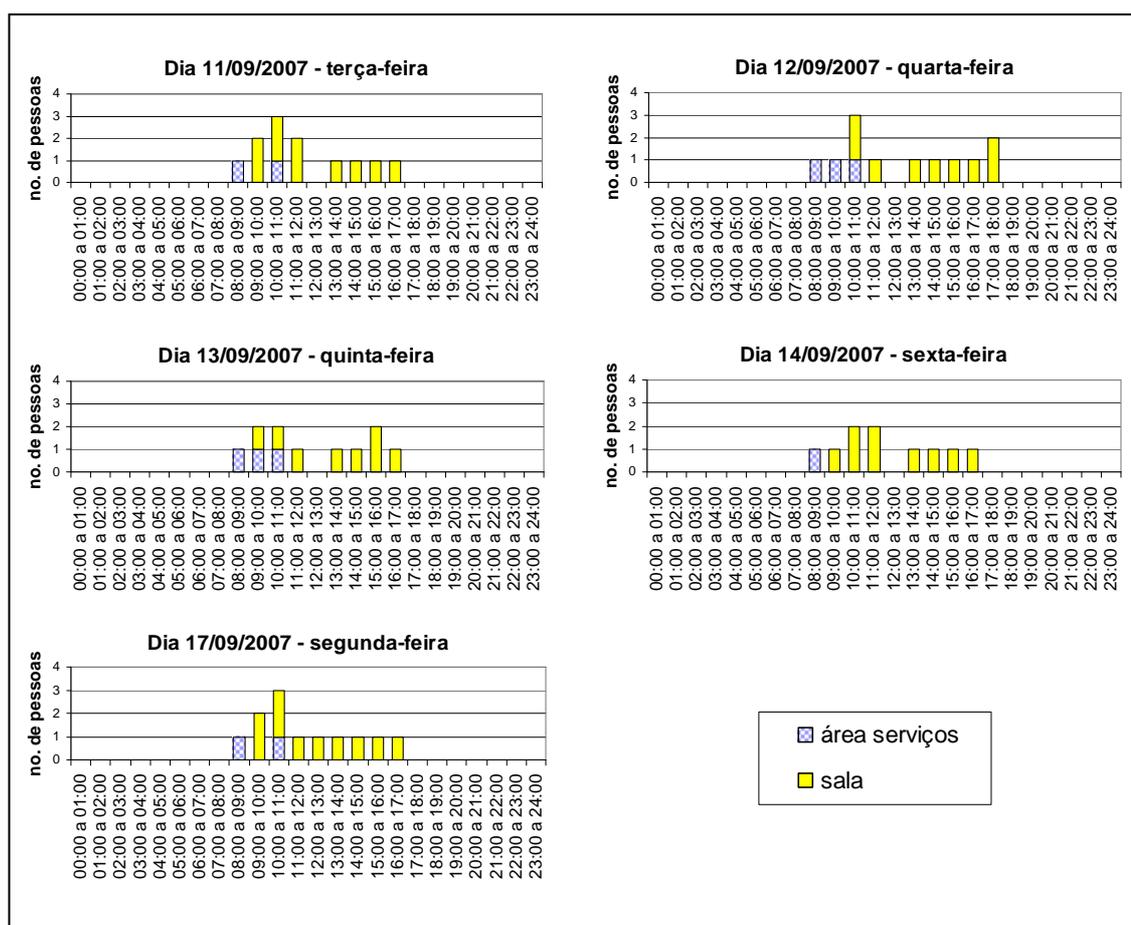


Figura 3.14 – Ocupação da casa – período de monitoramento em setembro de 2007

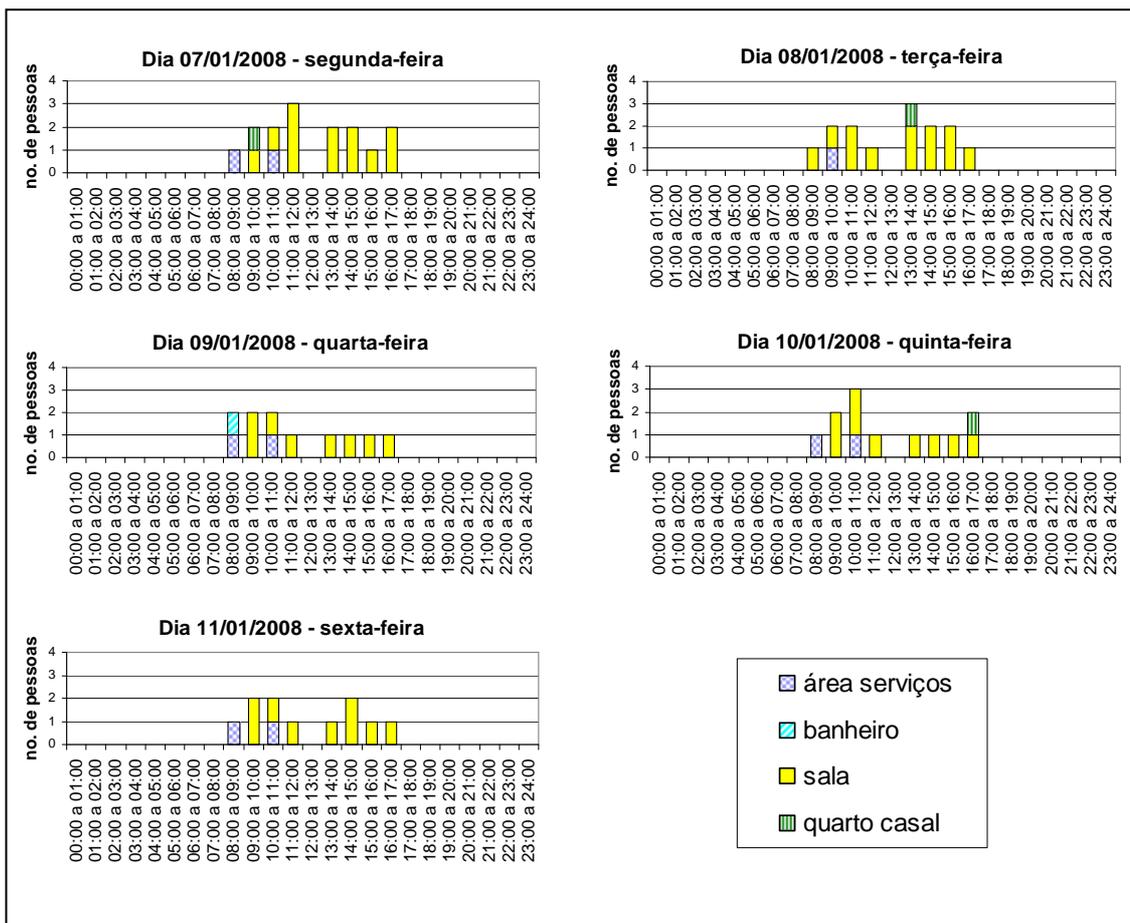


Figura 3.15 – Ocupação da casa – período de monitoramento em janeiro de 2008

O sistema “*AirflowNetwork*”, inserido no programa EnergyPlus, é capaz de simular as **trocas de ar** em uma edificação, incluindo as trocas do exterior com as zonas térmicas, e entre as zonas. Nesta calibração, a ventilação foi modelada de acordo com o comportamento verificado durante os períodos de monitoramento da edificação real. Considerou-se todas as portas internas abertas 24 horas todos os dias.

Nos períodos de agosto e dezembro todas as janelas e portas externas permaneceram fechadas. Nos períodos de setembro e janeiro a abertura das janelas e portas externas, nos dias úteis, aconteceu conforme mostrado na Tabela 3.5. Nos finais de semana (sábado e domingo) elas permaneceram sempre fechadas. As portas externas do banheiro, do quarto de casal e do quarto de solteiro, e a janela da parede norte da cozinha, permaneceram fechadas durante todos os períodos de monitoramento.

Utilizando o *AirflowNetwork*, a infiltração de ar é definida por um parâmetro chamado “*Air Mass Flow Coefficient When Opening is Closed*”

(Coeficiente de fluxo de massa de ar quando as aberturas estão fechadas), dado em kg/s.m (para 1 Pa por metro de fresta). O valor utilizado nesse parâmetro foi 0,001 kg/s.m, o mesmo adotado nos exemplos de simulação do programa EnergyPlus.

Tabela 3.5 – Abertura das janelas e portas externas nos períodos de monitoramento em setembro/2007 e janeiro/2008.

Horário	porta externa - área serviços	janela sul - área serviços	janela oeste - área serviços	janela oeste - cozinha	janela oeste - banheiro	janela norte - banheiro	porta sul - sala	porta norte - sala	janela leste - quarto casal	janela leste - quarto solteiro
00h a 08h	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F
08h a 09h	F	F	F	F	F	F	A	F	F	F
09h a 12h	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
12h a 14h	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F
14h a 17h	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
17h a 24h	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F

Legenda:

A

 = Aberto

F

 = Fechado

Com relação às trocas de ar quando as janelas e portas são abertas, uma das principais definições no *AirflowNetwork* é feita pelo item “*Discharge coefficient*” (coeficiente de descarga). Ele pode ser definido como um coeficiente adimensional que relaciona a taxa de fluxo de ar médio através de uma abertura para um ambiente e a correspondente diferença de pressão na abertura (ALLEN, 1981). O valor utilizado nesse parâmetro foi 0,6 para janelas e portas, tendo em vista que, segundo Flourentzou et al. (1998), é indicado um valor de 0,6 (com precisão de $\pm 0,1$) para o coeficiente de descarga para aberturas retangulares (janelas e portas).

Além destes itens, para a simulação da ventilação natural é essencial a definição de valores de coeficiente de pressão (*Wind Pressure Coefficient*), definidos para cada abertura da edificação, para diferentes direções do vento. Estes são dados de difícil definição, que dependem da volumetria do edifício, do seu entorno e de qualquer tipo de obstáculo à passagem do vento. Para estas simulações, o coeficiente de pressão foi obtido com auxílio do programa Cp Generator, desenvolvido no TNO Building Research (TNO, 2008).

Além disso, deve-se definir um valor de expoente para a velocidade do vento tendo em vista a rugosidade do entorno (*Exponent of Wind velocity*

Profile), que pode variar de 0 a 0,5. O valor adotado aqui para esse expoente foi 0,32, correspondente a um entorno heterogêneo, com estruturas maiores que um pavimento.

Outro item importante modelado são as **persianas** existentes em algumas janelas e portas externas. Elas foram inseridas no programa EnergyPlus como do tipo “Shade”, sendo o material de PVC branco, conforme o esquema da Figura 3.16. As propriedades térmicas definidas foram refletância (solar e visível) igual a 0,8, transmitância (solar e visível) igual a 0,4, espessura 0,5 cm e condutividade térmica 0,2 W/mK.

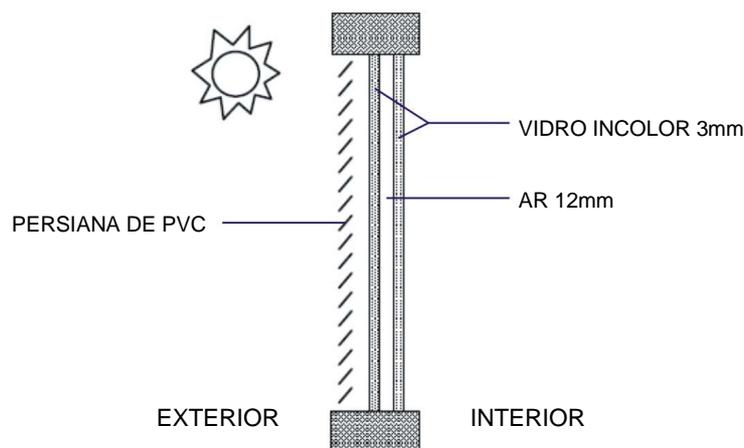


Figura 3.16 – Esquema das Persianas.

O padrão de aberturas dessas persianas também foi definido em função do comportamento verificado durante os períodos de monitoramento da edificação real. No período de dezembro todas as persianas permaneceram fechadas 24 horas todos os dias. Nos demais monitoramentos sua abertura se deu conforme mostrado na Tabela 3.6. Em todos os finais de semana (sábado e domingo) elas permaneceram sempre fechadas. As persianas das portas externas do quarto de casal e do quarto de solteiro, e da janela da parede norte da cozinha permaneceram fechadas durante todos os períodos de monitoramento.

Tabela 3.6 – Abertura das persianas nos períodos de monitoramento em agosto e setembro de 2007, e janeiro de 2008.

Horário	AGOSTO					SETEMBRO e JANEIRO				
	janela oeste - cozinha	porta sul - sala	porta norte - sala	janela leste - quarto casal	janela leste - quarto solteiro	janela oeste - cozinha	porta sul - sala	porta norte - sala	janela leste - quarto casal	janela leste - quarto solteiro
00h a 08h	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F
08h a 12h	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
12h a 14h	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F
14h a 17h	F	A	F	A	F	A	A	A	A	A
17h a 24h	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F

Legenda: A = Aberta F = Fechada

3.2.1.2. Ajustes no Modelo

Para a calibração foram realizados ajustes no modelo, modificando alguns parâmetros e comparando os resultados destas simulações com as medições efetuadas previamente na casa. Esses parâmetros foram escolhidos por se tratarem dos principais dados de entrada utilizados para a simulação no programa EnergyPlus. A cada simulação um novo parâmetro era alterado, sendo que, quando considerada adequada, a alteração era mantida nas simulações seguintes.

Em uma primeira etapa, os primeiros parâmetros alterados foram comparados com as medições realizadas nos meses de agosto e dezembro de 2007, quando a casa foi monitorada sem ventilação (janelas e portas fechadas). São eles:

- **Temperatura do solo:** Os dados de temperatura do solo foram alterados, passando a utilizar valores medidos no terreno estudado (média mensal), mostrados na Tabela 3.7. Essas medições foram realizadas com um sensor do tipo termopar, instalado no solo abaixo da sala de jantar da casa, a uma profundidade de 20 cm.

Tabela 3.7 – Valores de temperatura média do solo obtidos *in loco* [°C].

Mês	Temperatura média do solo [°C]
Janeiro/2008	26,3
Agosto/2007	18,7
Setembro/2007	22,1
Dezembro/2007	24,7

- **Geometria da edificação:** Tendo em vista que o modelo inicial foi construído com todas as coberturas horizontais, essa alteração foi realizada definindo as coberturas com as inclinações existentes na edificação estudada. Este modelo é mostrado na Figura 3.17.

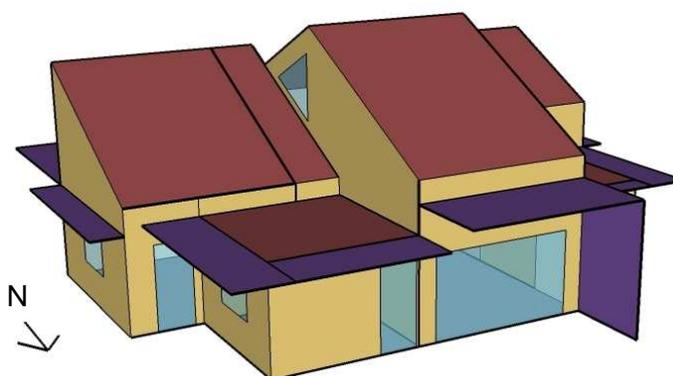


Figura 3.17 – Perspectiva do modelo de calibração com alteração na volumetria da cobertura.

- **Resistência térmica dos materiais do envelope:** As propriedades térmicas dos materiais utilizados no modelo inicial, obtidas em norma, são apontadas pela própria norma como sendo apenas indicativos, porque eles podem variar em função da matéria prima e da forma de fabricação. Para verificar a influência de diferenças nos valores da resistência térmica dos materiais, foram realizadas simulações diminuindo em 10% e aumentando em 10% e em 20% a resistência térmica de todos os materiais. Santana (2006) trabalhou com a variação da transmitância térmica dos materiais e constatou uma influência linear desta sobre o desempenho da edificação. Por isso, é desnecessária a análise de muitas opções de variação.

- **Absortância dos materiais do envelope:** No modelo inicial, a absortância dos materiais foram definidas pela observação das cores na edificação estudada e adotando valores de norma. Porém, esta observação simples não define tais valores com precisão, mesmo porque a sujeira pode

provocar alterações nessa propriedade. Assim, para confirmar o valor real de absorvância dos materiais utilizados no envelope da casa estudada, foram realizadas medições no local utilizando o equipamento medidor de refletância (espectrômetro) “Alta II”, mostrado na Figura 3.18. Com os valores medidos, e tendo como referência medições em um papel branco, a absorvância real pôde ser calculada utilizando-se planilhas eletrônicas. Os valores obtidos e utilizados nessa simulação estão indicados na Tabela 3.8.



Figura 3.18 – Equipamento Alta II.

Tabela 3.8 – Valores corrigidos de absorvância dos materiais.

Material	Absorvância
Tijolo cerâmico maciço	0,36
Telha cerâmica	0,48
Telha metálica	0,36
PVC das esquadrias	0,26

- **Ganho interno de calor por equipamentos:** Para a simulação inicial adotou-se o valor 0,5 para a fração radiante de ganho de calor pelos equipamentos, resultando, conseqüentemente, em 0,5 para a fração convectiva. Porém, segundo a ASHRAE (2005b), a divisão entre as parcelas radiante e convectiva (de ganho de calor) para grande parte dos equipamentos é geralmente uniforme, mas há uma importante diferença no caso de equipamentos que possuem ventilador para resfriamento, como no caso de computadores. Sendo assim, foi realizada uma simulação adotando, para a fração radiante de ganho de calor, o valor 0,20 para o computador e o valor 0,35 para a geladeira, baseado no apresentado pela ASHRAE (2005b).

- **Infiltração de ar:** O valor utilizado inicialmente no parâmetro “*Air Mass Flow Coefficient When Opening is Closed*” foi 0,001 kg/s.m. Nessa simulação, esse parâmetro foi alterado de forma a diminuir a infiltração de ar, adotando o valor 0,0001 kg/s.m para as janelas e portas de correr, e 0,0005 kg/s.m para as janelas máximo-ar, conforme obtido a partir de Liddament (1986).

Em uma segunda etapa, com o modelo corrigido, adotando as melhores opções das simuladas na primeira etapa, foram simuladas novas alterações, comparando-as com os dados das medições dos meses de setembro de 2007 e janeiro de 2008. Foram alterados no modelo os parâmetros relacionados à ventilação natural descritos a seguir. Pela dificuldade de obtenção dos valores de coeficiente de pressão, eles não foram variados.

- **Coefficiente de descarga:** O valor utilizado como coeficiente de descarga nas simulações iniciais foi 0,6 para janelas e portas. Porém, como Flourentzou et al. (1998), indicam o valor de 0,6 com precisão de $\pm 0,1$, foram realizadas simulações alterando o coeficiente de descarga para 0,7 e para 0,5. Foi ainda realizada outra simulação reduzindo esse valor para 0,3 para analisar a influência de maiores alterações nesse parâmetro.

- **Expoente da velocidade do vento:** O valor de 0,32, inicialmente adotado para esse expoente, foi alterado para 0,5, que é o limite máximo aceito pelo programa. Esse novo valor significaria um entorno com alta rugosidade, ou seja, muitas obstruções, que pode corresponder melhor ao caso da edificação estudada, pois ela localiza-se numa área cercada por morros.

3.2.1.3. Critérios para a Calibração

Para comparação dos resultados destas simulações com os valores medidos na edificação real, foi requerida, como dado de saída do modelo, a temperatura média horária do ar no interior da edificação. Foram utilizados os valores das zonas da sala, banheiro e quarto de casal, que se localizam em diferentes orientações solares na casa. Em cada um dos quatro períodos definidos, foram escolhidos três dias mais significativos para as análises. Esses dias foram escolhidos por estarem em uma seqüência de dias com comportamento semelhante, proporcionando uma estabilidade no comportamento térmico da casa.

As primeiras simulações foram comparadas com as medições realizadas em agosto e em dezembro de 2007, quando a casa foi mantida com janelas e portas externas fechadas, ou seja, sem ventilação. As últimas

simulações de calibração foram comparadas com as medições realizadas em setembro de 2007 e janeiro de 2008, quando a casa foi monitorada com abertura de janelas e portas, ou seja, com ventilação natural. A Tabela 3.9 descreve as simulações realizadas e os meses utilizados nas comparações.

Tabela 3.9 – Simulações realizadas para a calibração e meses de análise.

Simulação		Mês analisado
Número	Descrição / Alterações	
1	Modelo inicial	Agosto e Dezembro/2007
2	Modelo inicial + Temperatura do solo	Agosto e Dezembro/2007
3	Simulação 2 + Volumetria da cobertura	Agosto e Dezembro/2007
4	Simulação 3 + Resistência térmica - 10%	Agosto e Dezembro/2007
5	Simulação 3 + Resistência térmica + 10%	Agosto e Dezembro/2007
6	Simulação 3 + Resistência térmica + 20%	Agosto e Dezembro/2007
7	Simulação 3 + Absortância	Agosto e Dezembro/2007
8	Simulação 6 + Ganho por equipamentos	Agosto e Dezembro/2007
9	Simulação 7 + Infiltração de ar	Agosto, Setembro e Dezembro/2007 e Janeiro/2008
10	Simulação 8 + Coeficiente de descarga = 0,7	Setembro/2007 e Janeiro/2008
11	Simulação 8 + Coeficiente de descarga = 0,5	Setembro/2007 e Janeiro/2008
12	Simulação 8 + Coeficiente de descarga = 0,3	Setembro/2007 e Janeiro/2008
13	Simulação 8 + Expoente da vel. vento = 0,5	Setembro/2007 e Janeiro/2008

Os dados obtidos por medição e simulação foram comparados, e calculadas as diferenças entre os valores, o erro quadrático e a amplitude das temperaturas no período. As diferenças entre os valores simulados e medidos foram verificadas para cada dado horário, e então calculadas a diferença mínima, máxima e média, para cada período de três dias analisados. A Equação 3.1 mostra como foi realizado o cálculo da diferença média. O erro quadrático foi calculado conforme indicado na Equação 3.2.

$$Dm = \left| \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - x_i)}{N} \right| \quad \text{Equação 3.1}$$

$$EQ = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - x_i)^2}{N} \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{Equação 3.2}$$

Onde:

- Dm é a diferença média [°C];
- EQ é o erro quadrático [°C];

- y_i é a temperatura horária obtida por simulação [°C];
- x_i é a temperatura horária medida na edificação [°C];
- N é o número de observações.

3.2.2. Definição do Modelo de Referência para as Simulações

Após a calibração, para possibilitar as demais análises desejadas, definiu-se um Modelo de Referência para as simulações, representando uma edificação residencial unifamiliar. Sua geometria foi determinada a partir do modelo calibrado anteriormente, com os mesmos cômodos da edificação real monitorada, porém os materiais foram simplificados e foram definidos novos padrões de uso.

A partir desse modelo de referência foram simuladas variações, alterando as propriedades do envelope, a fim de verificar a influência deste no desempenho térmico da edificação. Estas simulações foram realizadas com e sem ventilação e ocupação. As simulações, tanto do modelo de referência quanto das variações, foram realizadas para um ano inteiro, utilizando um arquivo climático com dados do ano climático de referência (TRY) de Florianópolis.

3.2.2.1. Geometria

O modelo de referência seguiu a mesma geometria definida no modelo final da calibração, possuindo, portanto, nove zonas térmicas de simulação. Quanto às aberturas, foram apenas excluídas as portas externas do banheiro, do quarto de casal e do quarto de solteiro, e a janela da parede norte da cozinha. As demais aberturas foram mantidas (portas e janelas), mas sem persianas e sem brises. Foram também retiradas as proteções solares nas fachadas. A Figura 3.19 mostra uma perspectiva do modelo.

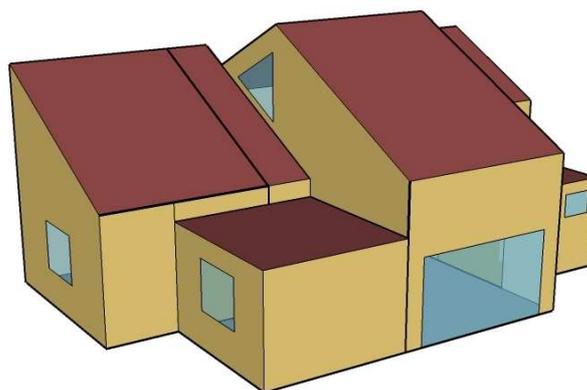


Figura 3.19 – Perspectiva do modelo de referência.

3.2.2.2. Temperatura do Solo

A temperatura do solo é uma característica ligada diretamente às temperaturas médias do ar, internas e externas, na cidade simulada. Quando não existem dados de medição da temperatura do solo, para obter resultados confiáveis indica-se o uso do programa Slab, vinculado ao EnergyPlus. Ele calcula a temperatura média do solo para cada mês do ano, com base nos valores médios de temperaturas internas e externas da edificação, para o clima determinado. Aqui foram usados dados referentes ao ano climático de referência de Florianópolis. Os valores obtidos com o Slab, e então utilizados nas simulações seguintes, são apresentados na Tabela 3.10.

Tabela 3.10 – Valores de temperatura média do solo [°C] para as simulações.

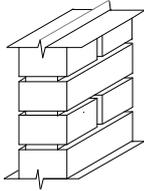
Mês	Temperatura média do solo [°C]	Mês	Temperatura média do solo [°C]
Janeiro	25,94	Julho	17,80
Fevereiro	26,05	Agosto	17,69
Março	25,26	Setembro	19,20
Abril	23,43	Outubro	19,93
Maiο	20,49	Novembro	21,86
Junho	18,12	Dezembro	23,47

3.2.2.3. Materiais

Como já mencionado, as características do modelo de referência foram escolhidas a partir das características da edificação monitorada, mas diminuindo a variedade dos materiais. Foi definido um único tipo de parede para toda a casa, possuindo uma camada de tijolo cerâmico, maciço e aparente, com espessura de 10 cm, com as características mostradas na Tabela 3.11.

Tabela 3.11 – Características da parede do modelo base.

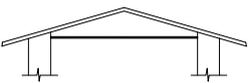
Fonte: ABNT (2005c)

Parede	Descrição	Transmitância térmica – U [W/(m ² .K)]	Capacidade térmica - Ct [kJ/(m ² .K)]	Atraso térmico - ϕ [horas]
	Parede de tijolos maciços aparentes, assentados na menor dimensão: Dimensões do tijolo: 10x6x22 cm; Espessura da argamassa de assentamento: 1,0 cm; Espessura total da parede: 10,0 cm.	3,70	149	2,4

O piso, no interior de toda a casa, foi modelado com uma camada de concreto, com espessura de 10 cm. A cobertura do modelo base foi determinada com três camadas: telha cerâmica, camada de ar e forro de madeira, com as características mostradas na Tabela 3.12. A telha cerâmica possui 1,0 cm de espessura. A camada de ar foi modelada como uma câmara de ar não ventilada, com superfície de alta emissividade, possuindo espessura maior que 5,0 cm, de acordo com o apresentado pela norma NBR 15220 (ABNT, 2005b). O forro de madeira possui 1,0 cm de espessura.

Tabela 3.12 – Características da cobertura do modelo base.

Fonte: ABNT (2005c)

Cobertura	Descrição	Transmitância térmica – U [W/(m ² .K)]	Capacidade térmica - Ct [kJ/(m ² .K)]	Atraso térmico - ϕ [horas]
	Cobertura de telha de barro com forro de madeira Espessura da telha: 1,0 cm Espessura da madeira: 1,0 cm	2,00	32	1,3

Todas as janelas e portas externas modeladas possuem apenas uma camada de vidro incolor de 3,0 mm de espessura. As propriedades do vidro foram obtidas dos modelos de vidro do próprio programa EnergyPlus. As demais portas da casa (portas internas) são de madeira com pintura branca, tendo 3,0 cm de espessura.

As propriedades térmicas dos materiais usados no modelo base (condutividade, densidade, calor específico, absorvância para radiação solar e resistência térmica) são as mesmas utilizadas no modelo de calibração, conforme apresentado anteriormente na Tabela 3.3.

3.2.2.4. Cargas Térmicas Internas

O modelo de referência foi definido sem cargas térmicas internas. Posteriormente, nas variações de caso de simulação, foi estudada a alternativa com ganhos internos de calor, tanto por equipamentos elétricos, quanto por iluminação e ocupação de usuários. Dessa forma, puderam-se comparar os resultados, verificando a influência do envelope no desempenho da edificação considerada com e sem ocupação.

3.2.2.5. Trocas de Ar

No modelo de referência as janelas e portas externas foram mantidas fechadas todos os dias do ano, permitindo trocas de ar apenas por infiltração. Nas variações de caso posteriores, a ventilação natural foi permitida com a abertura de janelas e portas, a fim de estudar a influência do envelope no desempenho da edificação naturalmente ventilada.

3.2.3. Variações no Modelo de Referência

Uma série de variações foram propostas, a partir do modelo de referência, a fim de comparar a influência do envelope no desempenho da edificação. Em todas as variações simuladas foram mantidas as características da geometria do modelo de referência. As alterações propostas dizem respeito às propriedades térmicas do envelope, e foram simuladas com e sem ventilação natural e ocupação (cargas térmicas internas).

3.2.3.1. Variação da Ventilação

Esta variação do modelo inclui trocas de ar pela ventilação natural, como alternativa ao modelo de referência, modelado apenas com infiltração. Definiu-se um padrão de abertura das janelas e portas externas, para dias úteis e para finais de semana, diferenciado para os meses de verão e inverno conforme a Tabela 3.13 e a Tabela 3.14. Considerou-se todas as portas internas abertas 24 horas todos os dias. Esses padrões foram definidos buscando reproduzir o uso convencional de uma edificação em Florianópolis.

Tabela 3.13 – Abertura das janelas e portas externas nos meses de verão.

Horário	VERÃO - Dias Úteis										VERÃO - Finais de Semana									
	porta externa - área serviços	janela sul - área serviços	janela oeste - área serviços	janela oeste - cozinha	janela oeste - banheiro	janela norte - banheiro	porta sul - sala	porta norte - sala	janela leste - quarto casal	janela leste - quarto solteiro	porta externa - área serviços	janela sul - área serviços	janela oeste - área serviços	janela oeste - cozinha	janela oeste - banheiro	janela norte - banheiro	porta sul - sala	porta norte - sala	janela leste - quarto casal	janela leste - quarto solteiro
00h a 06h	F	A	A	F	A	A	F	F	F	F	F	A	A	F	A	A	F	F	F	F
06h a 08h	F	A	A	A	A	A	F	F	A	A	F	A	A	F	A	A	F	F	F	F
08h a 09h	F	A	A	A	A	A	A	A	A	A	F	A	A	F	A	A	F	F	F	F
09h a 10h	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	F	A	A	A	A	A	A	A	A	F
10h a 11h	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	F	A	A	A	A	A	A	A	A	A
11h a 15h	F	A	A	A	A	A	A	A	A	A	F	A	A	A	A	A	A	A	A	A
15h a 17h	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	F	A	A	A	A	A	A	A	A	A
17h a 18h	F	A	A	A	A	A	A	A	A	A	F	A	A	A	A	A	A	A	A	A
18h a 19h	F	A	A	A	A	A	F	F	A	A	F	A	A	A	A	A	F	F	A	A
19h a 20h	F	A	A	A	A	A	F	F	A	A	A	A	A	A	A	A	F	F	A	A
20h a 21h	F	A	A	F	A	A	F	F	A	A	F	A	A	F	A	A	F	F	A	A
21h a 22h	F	A	A	F	A	A	F	F	F	F	F	A	A	F	A	A	F	F	A	F
22h a 24h	F	A	A	F	A	A	F	F	F	F	F	A	A	F	A	A	F	F	F	F

Legenda: A = Aberto F = Fechado

Tabela 3.14 – Abertura das janelas e portas externas nos meses de inverno.

Horário	INVERNO - Dias Úteis										INVERNO - Finais de Semana									
	porta externa - área serviços	janela sul - área serviços	janela oeste - área serviços	janela oeste - cozinha	janela oeste - banheiro	janela norte - banheiro	porta sul - sala	porta norte - sala	janela leste - quarto casal	janela leste - quarto solteiro	porta externa - área serviços	janela sul - área serviços	janela oeste - área serviços	janela oeste - cozinha	janela oeste - banheiro	janela norte - banheiro	porta sul - sala	porta norte - sala	janela leste - quarto casal	janela leste - quarto solteiro
00h a 06h	F	F	A	F	A	F	F	F	F	F	F	F	A	F	A	F	F	F	F	F
06h a 07h	F	F	A	F	A	F	A	F	F	F	F	F	A	F	A	F	F	F	F	F
07h a 08h	F	F	A	F	A	F	F	F	F	F	F	F	A	F	A	F	F	F	F	F
08h a 09h	F	F	A	F	A	F	F	F	F	F	F	F	A	F	A	F	F	F	F	F
09h a 10h	F	F	A	F	A	F	F	F	F	F	F	F	A	F	A	F	F	F	F	F
10h a 11h	F	F	A	A	A	F	F	F	F	F	F	F	A	A	A	F	A	F	F	F
11h a 12h	F	F	A	F	A	F	A	A	F	F	F	F	A	F	A	F	F	F	F	F
12h a 14h	F	F	A	F	A	F	F	F	A	A	F	F	A	F	A	F	F	F	A	A
14h a 15h	F	F	A	F	A	F	F	F	A	A	F	F	A	F	A	F	F	F	A	A
15h a 16h	F	F	A	A	A	F	F	F	F	F	F	F	A	A	A	F	A	F	F	F
16h a 17h	F	F	A	F	A	F	F	F	F	F	F	F	A	F	A	F	F	F	F	F
17h a 18h	F	F	A	F	A	F	A	F	F	F	F	F	A	F	A	F	F	F	F	F
18h a 24h	F	F	A	F	A	F	F	F	F	F	F	F	A	F	A	F	F	F	F	F

Legenda: A = Aberto F = Fechado

Os meses de verão e inverno foram diferenciados tendo como critério a temperatura média mensal do ar registrada no ano climático de referência (TRY) de Florianópolis, sendo que para valores acima de 20°C, considerou-se mês de verão. Com isso, o verão foi considerado nos meses de novembro a abril, e o inverno de maio a outubro.

3.2.3.2. Variação da Ocupação (Cargas Térmicas Internas)

Como alternativa ao caso base, que foi simulado sem ocupação, definiu-se a variação da simulação incluindo cargas térmicas internas, incluindo ganhos de calor por equipamentos elétricos, iluminação e ocupação de usuários. Para cada uma dessas fontes de calor, foram criadas diferentes rotinas (*schedules*) que definem seu padrão de uso, baseadas em um perfil de usuários da residência.

Em relação aos usuários, foi determinado um modelo ocupado por quatro pessoas, representando uma família com um casal, no qual apenas um deles trabalha fora de casa, e dois filhos, que estudam no período da manhã. Foram definidos dois padrões de ocupação pelos usuários, sendo um para os dias úteis (de segunda a sexta-feira) e outro para os finais de semana (sábado e domingo). Tendo isso em vista, a ocupação do modelo variou conforme apresentado na Figura 3.20. As zonas do corredor, caixas d'água e boiler foram consideradas sem ocupação.

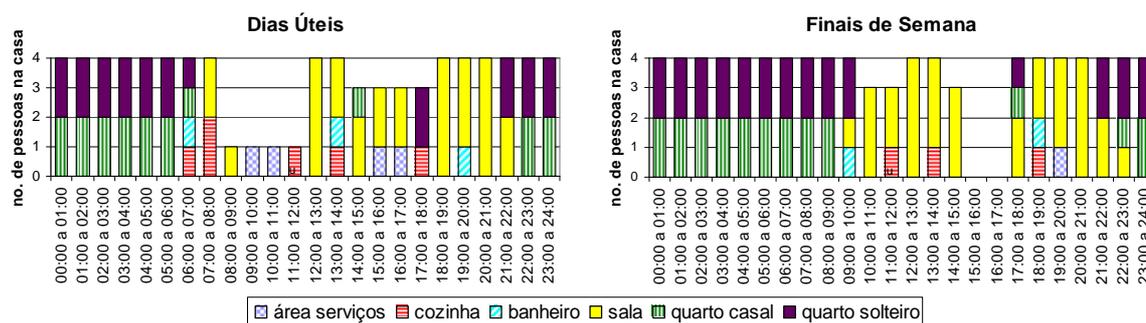


Figura 3.20 – Ocupação do modelo – dias úteis e finais de semana

De acordo com o tipo de atividade desempenhada em cada zona, foram determinadas diferentes produções de calor, apresentadas na Tabela 3.15. Elas basearam-se nos valores de taxa metabólica (W/m^2) da ASHRAE (2005a), considerando uma área de pele média de 1,80 m^2 . Nas simulações, o

valor do calor produzido [W] é multiplicado pela quantidade de pessoas na zona.

Tabela 3.15 – Atividades realizadas e calor produzido nas zonas térmicas do modelo.

Zona	Atividade realizada	Calor produzido [W/m ²]	Calor produzido para área de pele = 1,80 m ² [W]
Área de serviços	Limpeza doméstica	115	207
Cozinha	Cozinhando	95	171
Banheiro	Em pé	70	126
Sala	Sentado, lendo e/ou escrevendo	60	108
Quarto solteiro e quarto casal	Dormindo ou descansando	45	81

Quanto à iluminação, definiu-se um modelo utilizando lâmpadas incandescentes de 60 W e 100 W, e fluorescentes compactas de 25 W. As incandescentes, que ainda são as mais utilizadas no contexto residencial brasileiro, foram incluídas nas zonas dos quartos, banheiro, cozinha e área de serviços. As fluorescentes foram incluídas na zona onde há maior uso de iluminação artificial, que é a da sala. O modelo possui um total de 9 lâmpadas, perfazendo 520 W, e aproximadamente 4,2 W/m² de densidade de potência instalada em iluminação. Elas são distribuídas nas zonas conforme mostrado na Tabela 3.16.

Tabela 3.16 – Iluminação em cada zona térmica do modelo.

Zona	Quantidade de lâmpadas	Potência das lâmpadas [W]
Área de serviços	1	60
Cozinha	1	100
Banheiro	1	60
Sala	4	25
Quarto solteiro	1	100
Quarto casal	1	100

O padrão de uso da iluminação foi definido a partir da ocupação dos usuários em cada zona, conforme apresentado na Tabela 3.17, sendo, portanto, diferente para dias úteis e finais de semana. Considerou-se que os usuários aproveitam a iluminação natural durante o dia, apenas acendendo lâmpadas nos primeiros horários da manhã, e à noite.

Tabela 3.17 – Padrão de uso da iluminação – dias úteis e finais de semana

Horário	Porcentagem da potência total em uso											
	Dias Úteis						Finais de Semana					
	área serviços	cozinha	banheiro	sala	quarto casal	quarto solteiro	área serviços	cozinha	banheiro	sala	quarto casal	quarto solteiro
00h a 06h	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
06h a 07h	0	100	100	0	100	100	0	0	0	0	0	0
07h a 08h	0	100	0	50	0	0	0	0	0	0	0	0
08h a 09h	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0
09h a 10h	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
10h a 17h	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17h a 18h	0	100	0	0	0	100	0	0	0	50	100	100
18h a 19h	0	0	0	100	0	0	0	100	100	50	0	0
19h a 20h	0	0	100	100	0	0	100	0	0	100	0	0
20h a 21h	0	0	0	50	0	0	0	0	0	100	0	0
21h a 22h	0	0	0	50	0	100	0	0	0	50	0	100
22h a 23h	0	0	0	0	100	0	0	0	0	50	100	0
23h a 24h	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Com relação aos equipamentos elétricos, foram incluídos ganhos de calor por dois aparelhos: uma geladeira e um computador. A geladeira permanece ligada 24 horas por dia, todos os dias, na zona da cozinha. O computador permanece ligado entre 18 e 21 horas nos dias úteis, e nos finais de semana entre 10 e 12 horas e 19 e 22 horas, na zona da sala. Para a geladeira considerou-se uma potência média de 50 W, e para o computador de 130 W, ou seja, os mesmos valores adotados na calibração.

3.2.3.3. Variações de Propriedades Térmicas do Envelope

A fim de estudar a contribuição do tipo de envelope no desempenho térmico da edificação, foram realizadas simulações do modelo base com variações nas opções de materiais das paredes e coberturas.

Foram escolhidas sete opções de parede e cinco opções de cobertura (além das utilizadas no modelo base). Os tipos de parede e cobertura foram variados separadamente, sendo que, nas simulações com variação da parede, manteve-se a cobertura do modelo base e, nas simulações com variação da cobertura, manteve-se a parede do modelo base. Foram então simulados doze casos de variação do envelope, além do modelo de referência (Figura 3.21).

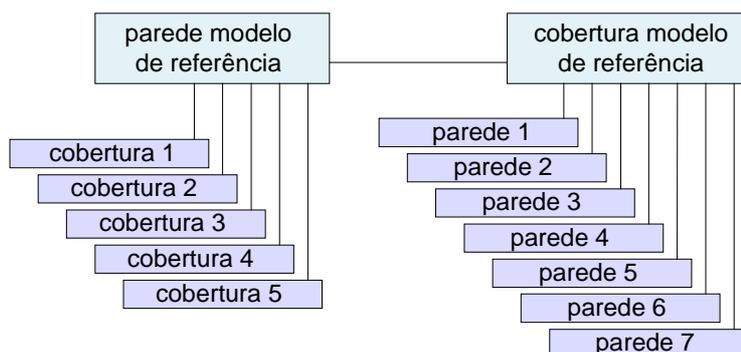
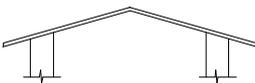
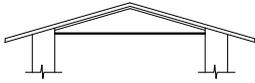
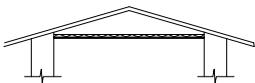


Figura 3.21 – Combinações de componentes do envelope, totalizando 12 variações.

As opções de envelope selecionadas, que são apresentadas na Tabela 3.18 (coberturas), e na Tabela 3.19 (paredes), foram escolhidas por suas diferentes propriedades térmicas. As paredes possuem transmitância térmica variando de 1,21 a 5,04 W/(m².K), e capacidade térmica variando de 55 a 430 kJ/(m².K). As coberturas possuem transmitância térmica variando de 0,95 a 4,55 W/(m².K), e capacidade térmica variando de 18 a 458 kJ/(m².K).

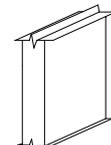
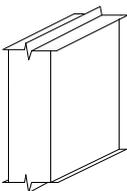
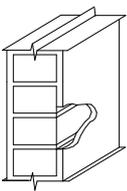
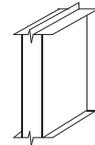
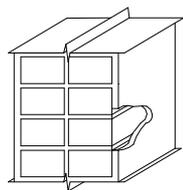
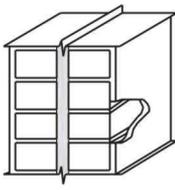
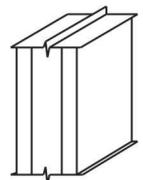
Tabela 3.18 – Descrição e Propriedades Térmicas das Coberturas Simuladas.

Fonte: ABNT (2005c)

Coberturas	Descrição	Transmitância térmica – U [W/(m ² .K)]	Capacidade e térmica - Ct [kJ/(m ² .K)]	Atraso térmico - φ [horas]
1 	Cobertura de telha de barro sem forro Espessura da telha: 1,0 cm	4,55	18	0,3
2 	Cobertura de telha de barro com laje de concreto de 20 cm Espessura da telha: 1,0 cm	1,84	458	8,0
3 	Cobertura de telha de barro, lâmina de alumínio polido e forro de madeira Espessura da telha: 1,0 cm Espessura da madeira: 1,0 cm	1,11	32	2,0
4 	Cobertura de telha de barro, lâmina de alumínio polido e laje de concreto de 20 cm Espessura da telha: 1,0 cm	1,06	458	11,8
5 	Cobertura de telha de barro com 2,5 cm de lã de vidro sobre o forro de madeira Espessura da telha: 1,0 cm Espessura da madeira: 1,0 cm	0,95	33	2,3

NOTA: Os atrasos térmicos das coberturas são calculados para condições de verão (fluxo térmico descendente).

Tabela 3.19 – Descrição e Propriedades Térmicas das Paredes Simuladas.
Fonte parcial: ABNT (2005c)

Paredes	Descrição	Transmitância térmica – U [W/(m ² .K)]	Capacidade térmica - Ct [kJ/(m ² .K)]	Atraso térmico - ϕ [horas]
1 	Parede de concreto maciço: Espessura total da parede: 5,0 cm.	5,04	110	1,3
2 	Parede de concreto maciço: Espessura total da parede: 10,0 cm.	4,40	220	2,6
3 	Parede de tijolos maciços, assentados na menor dimensão: Dimensões do tijolo: 10x6x22 cm; Argamassa de assentam.: 1,0 cm; Argamassa de emboço: 2,5 cm; Espessura total da parede: 15,0 cm.	3,13	255	3,8
4 	Parede de madeira: Espessura total da parede: 3,0 cm.	2,60	41	2,2
5 	Parede dupla de tijolos maciços, assentados na menor dimensão: Dimensões do tijolo: 10x6x22 cm; Argamassa de assentam.: 1,0 cm; Argamassa de emboço: 2,5 cm; Espessura total da parede: 26,0 cm.	2,30	430	6,6
6 	Parede dupla de tijolos maciços, assentados na menor dimensão: Dimensões do tijolo: 10x6x22 cm; Camada de manta de lã de rocha no interior: 2,0 cm; Argamassa de assentam.: 1,0 cm; Argamassa de emboço: 2,5 cm; Espessura total da parede: 27,0 cm.	1,45	416	9,1
7 	Parede dupla de madeira: Espessura da madeira: 2,0 cm; Câmara de ar não ventilada no interior: 4,0 cm; Espessura total da parede: 8,0 cm.	1,21	55	6,9

As propriedades térmicas dos materiais usados (condutividade térmica, densidade, calor específico, absorvância para radiação solar e resistência térmica), obtidas na NBR 15220 (ABNT, 2005b; 2005c) e em Ordenes et al. (2003), são apresentadas na Tabela 3.20. Todas as paredes possuem a mesma absorvância, de forma que esse não seja mais um fator de influência nos resultados. O mesmo ocorre com as coberturas.

Tabela 3.20 – Características dos materiais utilizados na simulação computacional.

Material	Condutividade térmica [W/m.K]	Densidade [kg/m ³]	Calor específico [J/kg.K]	Absorvância	Resistência térmica [m ² .K/W]
Tijolo cerâmico maciço 10 cm, com argamassa de assentamento	0,900	1764	920	0,3	0,107
Argamassa emboço 2,5 cm	1,150	2000	1000	0,3	0,022
Concreto maciço 10,0 cm	1,750	2200	1000	0,3	0,057
Telha cerâmica 1,0 cm	1,050	2000	920	0,4	0,010
Madeira para parede 2,0 cm	0,140	600	2300	0,7	0,143
Madeira para forro 1,0 cm	0,140	600	2300	0,7	0,071
Manta de lã de rocha 2,0 cm	0,045	100	750	-	0,444
Manta de lã de vidro 2,5 cm	0,045	50	700	-	0,556
lâmina de alumínio polido ($\epsilon < 0,2$)	230	2700	880	-	-
Câmara de ar de baixa emissividade, espessura >5,0 cm - fluxo descendente	-	-	-	-	0,61
Câmara de ar de alta emissividade, espessura >5,0 cm - fluxo descendente	-	-	-	-	0,21
Câmara de ar de baixa emissividade, espessura 4 cm - fluxo horizontal	-	-	-	-	0,37

3.2.4. Tratamento dos Dados Finais

Para a realização das análises desejadas, das simulações no programa EnergyPlus as variáveis requeridas do ambiente externo foram temperatura de bulbo seco [°C] e umidade relativa do ar [%]; e as variáveis requeridas da edificação foram temperatura média do ar no interior de cada zona [°C], umidade relativa do ar no interior de cada zona [%], ganho de calor por cargas internas [J], troca de calor por infiltração e ventilação [J], troca de calor pelas janelas e portas de vidro [J], troca de calor por convecção pelas paredes, pisos e coberturas [J].

Uma análise comparativa dos desempenhos de cada modelo proposto foi realizada com base na porcentagem de horas de desconforto, considerando a zona de conforto adaptada de Givoni (1992). Para isso foi utilizado o programa computacional Analysis Bio, inserindo os valores horários de temperatura e umidade relativa do ar obtidos nas zonas térmicas da edificação, em cada modelo simulado, para o ano inteiro. Foram analisados dados de duas zonas do modelo: sala e quarto de casal, que estão entre os ambientes de maior permanência em uma residência.

Os valores de horas de desconforto foram também obtidos separadamente para o período de verão (novembro a abril) e de inverno (maio a outubro). Isso foi feito tendo em vista a diferenciação do padrão de abertura das janelas nos meses de verão e inverno. As horas de abertura da maior parte das janelas e portas externas são reduzidas no inverno.

Foram realizadas análises de correlação das porcentagens de horas de desconforto com os valores de transmitância térmica, capacidade térmica e atraso térmico dos componentes do envelope, para as diferentes opções de parede e cobertura. Para isso, foram calculadas as propriedades térmicas equivalentes para cada cômodo, através de uma ponderação, conforme exemplificado na Equação 3.3. O mesmo cálculo mostrado para a transmitância, foi também realizado para a capacidade e atraso térmicos.

$$U_{eq} = \frac{(U_{pa} \cdot A_{pa}) + (U_c \cdot A_c) + (U_{pi} \cdot A_{pi}) + (U_j \cdot A_j)}{A_{pa} + A_c + A_{pi} + A_j} \quad \text{Equação 3.3}$$

Onde:

- U_{eq} é a transmitância térmica equivalente do cômodo [W/m².K];
- U_{pa} é a transmitância térmica das paredes externas [W/m².K];
- U_c é a transmitância térmica da cobertura [W/m².K];
- U_{pi} é a transmitância térmica do piso [W/m².K];
- U_j é a transmitância térmica da janela (vidro) [W/m².K];
- A_{pa} é a área de parede externa [m²];
- A_c é a área de cobertura [m²];
- A_{pi} é a área de piso [m²];
- A_j é a área de janela [m²].

As correlações foram realizadas com o auxílio de planilhas eletrônicas, gerando gráficos e obtendo o valor do coeficiente de determinação (R^2). Esse é um dado que varia de 0,0 a 1,0, sendo que quanto mais próximo do valor 1,0 for o R^2 , melhor a correlação. Um R^2 igual a 1,0 significaria uma correlação perfeita entre as duas variáveis. Um R^2 igual a zero significaria que as duas variáveis não dependem linearmente uma da outra. Neste trabalho adotou-se a seguinte interpretação:

- $R^2 > 0,70$ indica correlação forte;
- $0,40 \leq R^2 \leq 0,70$ indica correlação moderada;
- $R^2 < 0,40$ indica correlação fraca.

Com os valores de trocas térmicas da edificação, foi possível verificar os principais meios de ganho e perda de calor do modelo, com e sem ocupação e ventilação natural.

CAPÍTULO 4

4. RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos ao longo desta pesquisa. Inicialmente são mostrados os resultados da calibração, realizada pela comparação dos dados obtidos nas simulações com as medições em quatro períodos na edificação estudada. Foram verificadas as diferenças entre esses valores e o erro quadrático. Quanto menor fossem tais valores, mais adequada foi considerada a simulação.

Em seguida, são apresentadas as análises para verificação da influência do envelope no desempenho do modelo simulado, com e sem ventilação e ocupação. Foram verificadas as horas de desconforto do modelo com diferentes opções de envelope, e realizadas correlações entre a porcentagem de horas de desconforto e as propriedades térmicas dos componentes da edificação. Ao fim, são apresentadas as trocas térmicas do modelo.

4.1. Calibração do Modelo para Simulação

Os resultados descritos a seguir dizem respeito à comparação dos valores de temperatura média do ar obtidos por simulação e por medição na edificação estudada. Para as análises, foram utilizados dados dos seguintes ambientes: sala, banheiro e quarto de casal. Todos os gráficos apresentados são referentes a três dias compreendidos entre o período total de monitoramento da edificação em cada mês, e mostram os valores de temperatura média do ar medidos e simulados.

Os resultados das primeiras simulações foram comparados às medições realizadas em agosto e em dezembro de 2007 (janelas e portas externas fechadas, sem ventilação). Os resultados das últimas simulações foram comparados com as medições realizadas em setembro de 2007 e janeiro de 2008 (janelas e portas externas abertas, com ventilação), conforme mostrado anteriormente na Tabela 3.9.

4.1.1. Simulações Sem Ventilação

4.1.1.1. Resultados para o mês de Dezembro de 2007

São mostrados a seguir os resultados das comparações entre simulação e a medição de dezembro. No primeiro caso simulado, utilizando o modelo inicial descrito no item 3.2.1.1, obteve-se os resultados mostrados na Figura 4.1, para três dias escolhidos, nos três ambientes analisados. Verifica-se que os comportamentos das curvas de temperatura são semelhantes, porém os simulados estão sempre bem abaixo dos medidos. A diferença média entre temperaturas simulada e medida é de 3,7°C na sala, 4,0°C no quarto de casal e 3,3°C no banheiro, conforme indicado na Tabela 4.1.

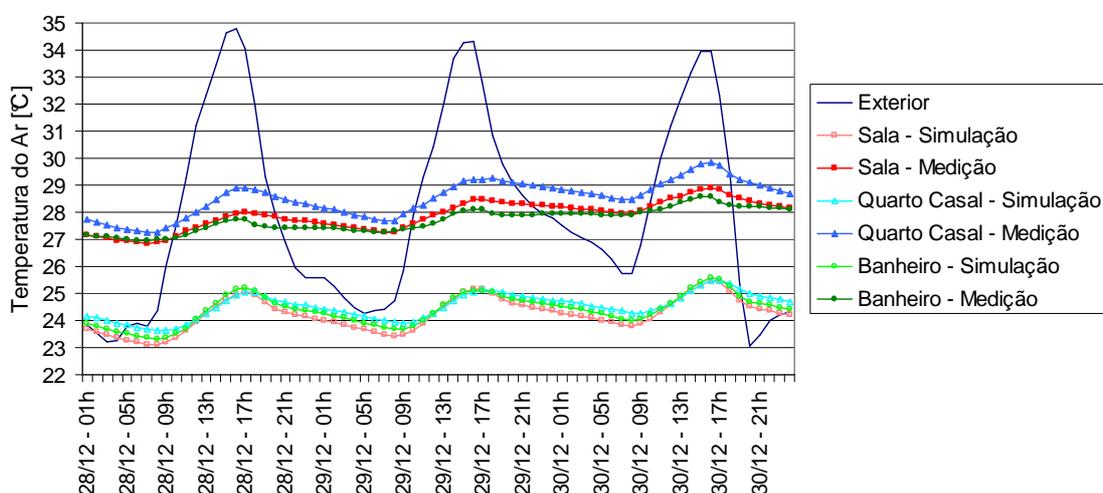


Figura 4.1 – Comparação entre simulação 1 (modelo inicial) e medição em dezembro/2007

A segunda simulação, com alteração nos valores de temperatura do solo (do TRY para o medido *in loco*), apresentou os resultados da Figura 4.2. Percebe-se uma grande melhoria em relação à primeira simulação. As curvas de temperatura da simulação se aproximaram da medição, ficando entre elas a diferença média de 1,4°C na sala, 1,7°C no quarto de casal e 1,1°C no banheiro (Tabela 4.1). O erro quadrático apresenta valores quase iguais à diferença média: 1,5°C na sala, 1,7°C no quarto de casal e 1,1°C no banheiro. Essa alteração foi mantida nos casos seguintes.

Tabela 4.1 – Resultados das simulações comparadas às medições de dezembro/2007.

N°	Descrição	DIFERENÇA (Temp. simulada – Temp. medida) [°C]									ERRO QUADRÁTICO			AMPLITUDE [°C]			Alterações adotadas
		MÍNIMA			MÁXIMA			MÉDIA			S	Q	B	S	Q	B	
		S	Q	B	S	Q	B	S	Q	B	S	Q	B	S	Q	B	
-	Medição	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,1	2,6	1,7	-
1	Modelo inicial	3,0	3,5	2,4	4,2	4,6	3,9	3,7	4,0	3,3	3,7	4,0	3,3	2,4	1,9	2,3	-
2	Modelo inicial + alteração temp. do solo	0,8	1,3	0,2	1,9	2,2	1,7	1,4	1,7	1,1	1,5	1,7	1,1	2,4	1,9	2,2	Sim
3	Simulação 2 + alteração volumetria da cobertura	0,7	1,3	0,2	2,0	2,2	1,7	1,4	1,7	1,1	1,5	1,7	1,1	2,5	1,9	2,3	Sim
4	Simulação 3 + diminuição de 10% na resistência	0,6	1,3	0,1	2,0	2,2	1,7	1,4	1,7	1,0	1,4	1,7	1,1	2,6	2,0	2,4	Não
5	Simulação 3 + aumento de 10% na resistência	0,7	1,3	0,2	2,0	2,2	1,7	1,4	1,7	1,1	1,5	1,8	1,1	2,4	1,8	2,2	Não
6	Simulação 3 + aumento de 20% na resistência	0,8	1,3	0,2	2,0	2,3	1,7	1,5	1,7	1,1	1,5	1,8	1,1	2,3	1,7	2,2	Não
7	Simulação 3 + alteração absortâncias	0,3	1,1	0,0	1,8	2,1	1,6	1,2	1,5	0,9	1,3	1,5	1,0	2,7	2,0	2,4	Sim
8	Simulação 6 + aumento do ganho de calor	0,3	1,0	0,0	1,8	1,9	1,5	1,2	1,4	0,9	1,2	1,4	0,9	2,7	2,0	2,3	Sim
9	Simulação 7 + alteração infiltração	0,5	0,9	0,2	1,8	1,9	1,5	1,2	1,4	0,9	1,3	1,4	1,0	2,5	1,9	2,1	Sim

Obs.: S = Sala; Q = Quarto; B = Banheiro

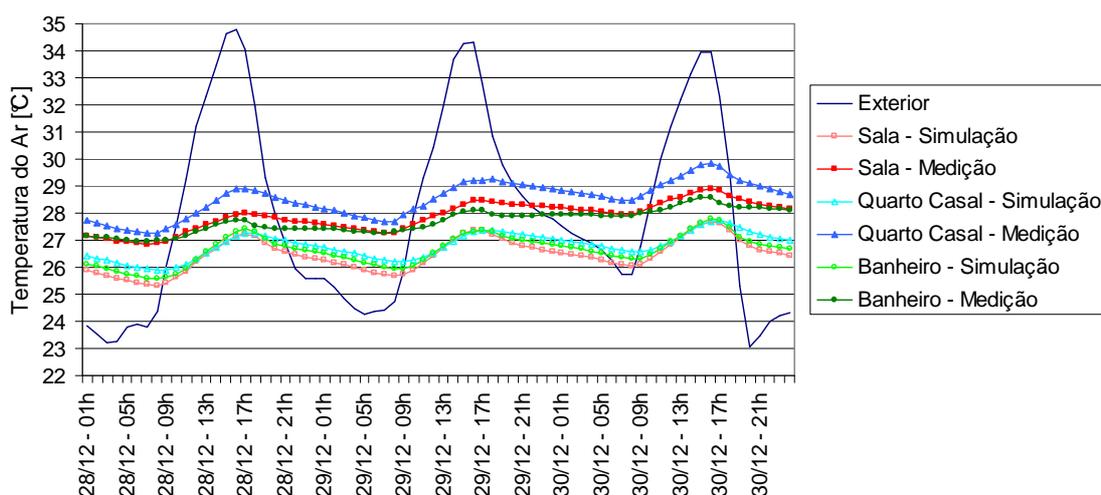


Figura 4.2 – Comparação entre simulação 2 (alteração na temperatura do solo) e medição em dezembro/2007.

Na terceira simulação, com alteração na volumetria da cobertura do modelo, obtiveram-se resultados bem semelhantes ao anterior, e por isso o

gráfico está apresentado em apêndice (Apêndice B). O erro quadrático e as diferenças médias entre temperaturas simuladas e medidas permaneceram iguais ao segundo caso. Apesar de não representar mudanças significativas para os resultados, essa alteração foi mantida nos casos seguintes, já que esta volumetria representa melhor o caso real da edificação estudada.

As três simulações seguintes foram realizadas alterando a resistência térmica dos materiais de construção da casa, com diminuição de 10% e aumento de 10% e de 20%. Como pode ser verificado na Tabela 4.1, as diferenças em relação à simulação anterior foram mínimas (gráficos no Apêndice B). Nos três casos, as diferenças médias e os erros quadráticos sofreram apenas leves variações. Analisando as amplitudes de temperatura, na simulação 4 as amplitudes nos três ambientes foram maiores que o caso anterior, e conseqüentemente mais diferentes em relação às medições. Na simulação 5 a sala apresentou amplitude de 2,4°C, o quarto de 1,8°C e o banheiro de 2,2°C. Isso significa que as amplitudes diminuíram um pouco em relação ao modelo inicial, porém não a ponto de alcançar os valores medidos. Na simulação 6, as amplitudes ficaram ainda um pouco menores, sendo de 2,3°C na sala, 1,7°C no quarto e 2,2°C no banheiro. Esses resultados indicaram que tais alterações na resistência dos materiais tiveram pouca influência nos valores de temperatura do ar dos ambientes, não contribuindo significativamente na aproximação do modelo com as medições. Isso pode ter acontecido porque os valores de resistência utilizados inicialmente já são altos, e já proporcionam um grande isolamento térmico dos ambientes. Sendo assim, as demais simulações foram realizadas mantendo os valores de resistência originais, do modelo inicial.

A sétima simulação teve alterações nos valores de absorvância dos materiais do envelope da edificação (gráfico no Apêndice B). Verifica-se, conforme a Tabela 4.1, que as diferenças médias foram de 1,2°C na sala, 1,5°C no quarto e 0,9°C no banheiro. Ou seja, as diferenças médias de temperatura foram menores. O erro quadrático também diminuiu um pouco: 1,3°C na sala, 1,5°C no quarto e 1,0°C no banheiro. Com isso, esses dados de absorvância foram mantidos nas simulações seguintes.

A oitava simulação foi realizada alterando a fração radiante de ganho de calor pelos equipamentos. Analisando os resultados na Tabela 4.1 (gráfico

no Apêndice B), se vê que as diferenças médias nos valores de temperatura entre simulação e medição foram de 1,2°C na sala, 1,4°C no quarto de casal e 0,9°C no banheiro. O erro quadrático foi de 1,2°C na sala, 1,4°C no quarto e 0,9°C no banheiro. Isso significa que houve uma pequena diminuição das diferenças em relação à simulação anterior. Com relação às amplitudes das temperaturas, elas ficaram em 2,7°C na sala, 2,0°C no quarto e 2,3°C no banheiro. Essa alteração é pouco significativa neste modelo porque ele possui uma quantidade pequena de equipamentos: apenas dois. Ainda assim, a alteração foi mantida para as simulações seguintes por provocar uma pequena redução nas diferenças.

No nono caso simulado (o último comparado com os períodos de agosto e dezembro de 2007) o modelo sofreu alterações no parâmetro de definição da infiltração de ar. Com os resultados, mostrados na Figura 4.3, verifica-se que não houve mudanças significativas nas diferenças médias em relação à simulação anterior. Porém, ocorreram algumas leves alterações nas amplitudes de temperatura dos ambientes, que passaram a 2,5°C na sala, 1,9°C no quarto e 2,1°C no banheiro. Esses valores da infiltração foram mantidos nas simulações seguintes. Não foi simulada uma alteração nesse parâmetro de forma a aumentar a infiltração de ar, pois isso aumentaria a amplitude da temperatura simulada, tornando-a ainda mais divergente em relação ao medido.

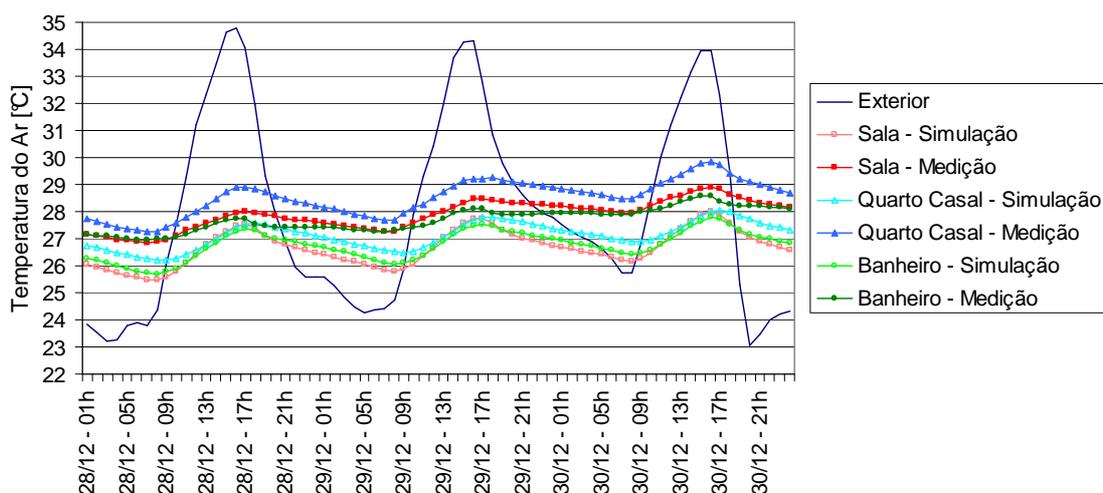


Figura 4.3 – Comparação entre simulação 9 (alteração na infiltração de ar) e medição em dezembro/2007.

4.1.1.2. Resultados para o mês de Agosto de 2007

Os resultados dessas nove simulações foram comparados com as medições realizadas em agosto de 2007. A Figura 4.4 mostra a comparação da primeira simulação com a medição de agosto. Verifica-se novamente que os resultados simulados estão abaixo dos valores medidos. A Tabela 4.2, que mostra as diferenças encontradas entre simulação e medição de agosto, indica erros quadráticos de 1,2°C na sala, 1,0°C no quarto e 1,1°C no banheiro para o modelo inicial.

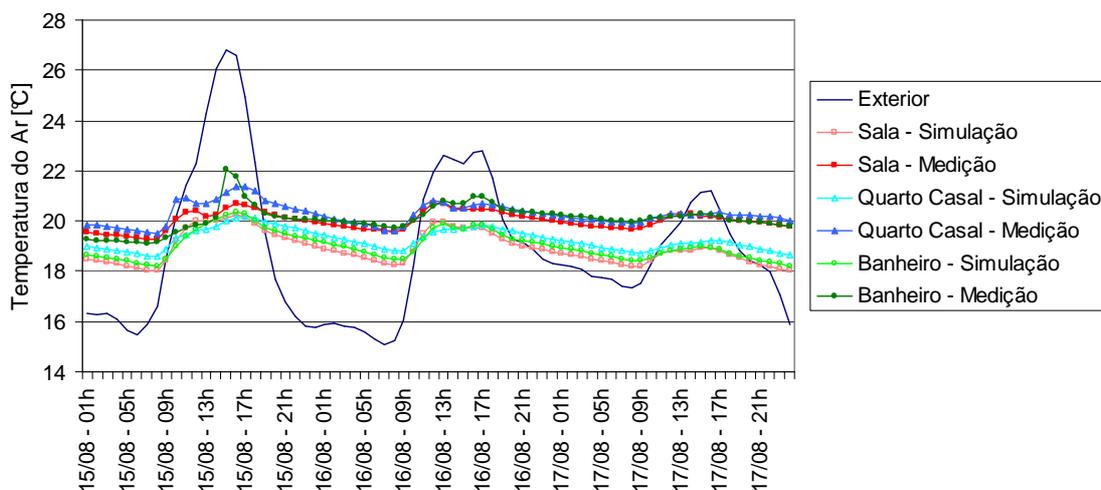


Figura 4.4 – Comparação entre simulação 1 (modelo inicial) e medição em agosto/2007.

Verificando os resultados de agosto da nona simulação, na Figura 4.5, percebe-se uma grande melhoria, pela redução das diferenças entre valores simulados e medidos. Conforme a Tabela 4.2, os erros quadráticos da simulação 9 caíram para 0,4°C na sala, 0,2°C no quarto e 0,4°C no banheiro. Os gráficos das simulações 2 a 8 para o mês de agosto são apresentados no Apêndice C, por terem resultados muito semelhantes à simulação 9.

Percebe-se que os resultados das simulações apresentaram menores diferenças quando comparados às medições de agosto do que às de dezembro. Na comparação com agosto, os erros quadráticos ficam bem próximos a zero, o que atestaria a sua confiabilidade.

Tabela 4.2 – Resultados das simulações comparadas às medições de agosto/2007.

N°	Descrição	DIFERENÇA (Temp. simulada – Temp. medida) [°C]									ERRO QUADRÁTICO			AMPLITUDE [°C]			Alterações adotadas
		MÍNIMA			MÁXIMA			MÉDIA			S	Q	B	S	Q	B	
		S	Q	B	S	Q	B	S	Q	B	S	Q	B	S	Q	B	
-	Medição	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,4	1,9	2,9	-
1	Modelo inicial	0,2	0,7	0,0	1,8	1,6	1,8	1,1	1,0	1,1	1,2	1,0	1,1	2,2	1,6	2,2	-
2	Modelo inicial + alteração temp. do solo	0,5	0,0	0,7	1,1	0,8	1,1	0,4	0,3	0,4	0,5	0,4	0,5	2,2	1,6	2,2	Sim
3	Simulação 2 + alteração volumetria da cobertura	0,7	0,0	0,8	1,1	0,9	1,0	0,4	0,3	0,3	0,6	0,4	0,5	2,5	1,8	2,3	Sim
4	Simulação 3 + diminuição de 10% na resistência	0,7	0,0	0,8	1,2	0,9	1,0	0,4	0,3	0,4	0,6	0,4	0,6	2,5	1,9	2,3	Não
5	Simulação 3 + aumento de 10% na resistência	0,7	0,0	0,8	1,1	0,8	1,0	0,4	0,3	0,3	0,5	0,3	0,5	2,4	1,7	2,2	Não
6	Simulação 3 + aumento de 20% na resistência	0,7	0,0	0,9	1,0	0,8	1,0	0,3	0,2	0,3	0,5	0,3	0,5	2,4	1,6	2,2	Não
7	Simulação 3 + alteração absorvâncias	0,9	0,2	0,8	1,0	0,8	1,0	0,2	0,1	0,2	0,5	0,3	2,6	2,6	1,9	2,4	Sim
8	Simulação 6 + aumento do ganho de calor	0,9	0,4	0,8	0,9	0,6	1,0	0,2	0,0	0,2	0,5	0,2	0,4	2,5	1,9	2,4	Sim
9	Simulação 7 + alteração infiltração	0,9	0,4	0,9	0,9	0,6	1,0	0,2	0,1	0,2	0,4	0,2	0,4	2,4	1,7	2,2	Sim

Obs.: S = Sala; Q = Quarto; B = Banheiro

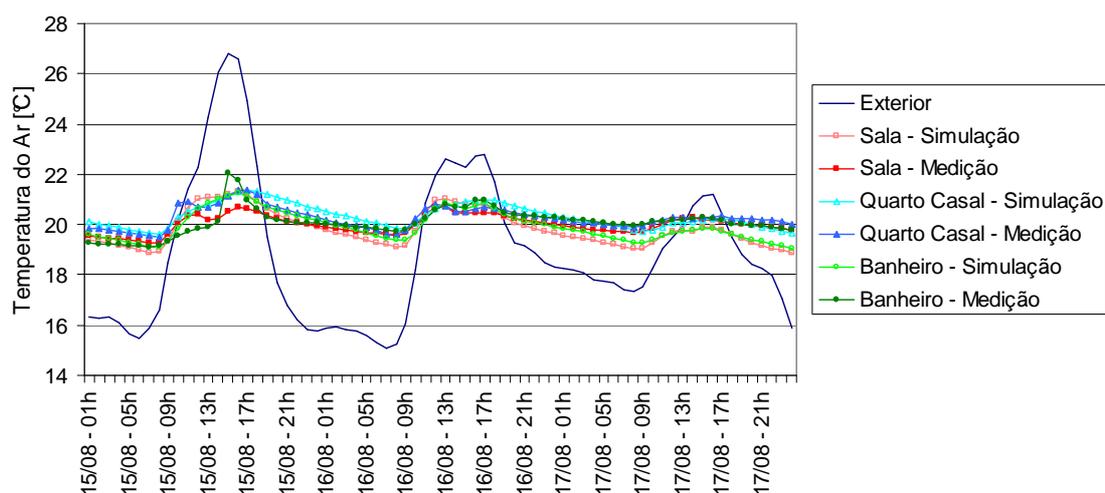


Figura 4.5 – Comparação entre simulação 9 (alteração na infiltração de ar) e medição em agosto/2007.

Investigando o que poderia provocar essa maior diferença na comparação com os dados de dezembro, verificou-se que nos dias de

monitoramento em dezembro a temperatura do ar manteve-se mais alta (variação de 23°C a 35°C nos dias 28 a 30/12/2007) do que o verificado em agosto (variação de 15°C a 27°C nos dias 15 a 17/08 /2007). Isso gerou a desconfiança de que nos períodos mais quentes poderia ocorrer uma estratificação da temperatura nos ambientes, influenciando as medições com os Hobos.

É importante destacar que os dados de temperatura do ar do monitoramento dizem respeito a um ponto de medição localizado a 1,80 m de altura aproximadamente no centro de cada ambiente, e que os ambientes não apresentam distribuição uniforme dos fluxos de ar. Já o resultado da simulação diz respeito ao valor de temperatura do ar exatamente no centro ambiente, considerando cada ambiente homogêneo termicamente.

A fim de investigar essa desconfiança, seis Hobos foram posicionados na sala da edificação monitorada, em diferentes alturas, conforme mostrado na Figura 4.6. Foram realizadas medições entre os dias 2 e 5 de novembro de 2008, com a casa fechada, sem ventilação, e sem ocupação. O dia mais quente desse período foi 5/11, com temperatura externa do ar variando de 22 a 29°C. O dia menos quente no período foi 2/11, com temperatura externa variando de 20 a 22°C.

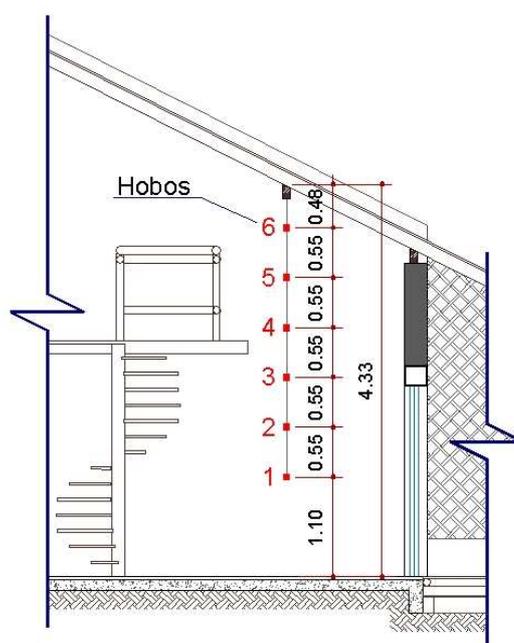


Figura 4.6 – Corte da sala: Hobos utilizados para verificação de estratificação na temperatura do ar.

A Figura 4.7 mostra as temperaturas medidas pelos seis Hobos no período. Os resultados mostram que realmente há uma diferenciação nos valores de temperatura do ar para as diferentes alturas, sendo essa diferença maior para os dias com temperatura mais elevada. Sendo assim, tal fato poderia explicar a maior diferença nos dados da calibração para o período de dezembro (mais quente) e menor para agosto (mais frio). A partir desta verificação, o modelo foi considerado adequado, e sua calibração teve prosseguimento, incluindo a ventilação natural.

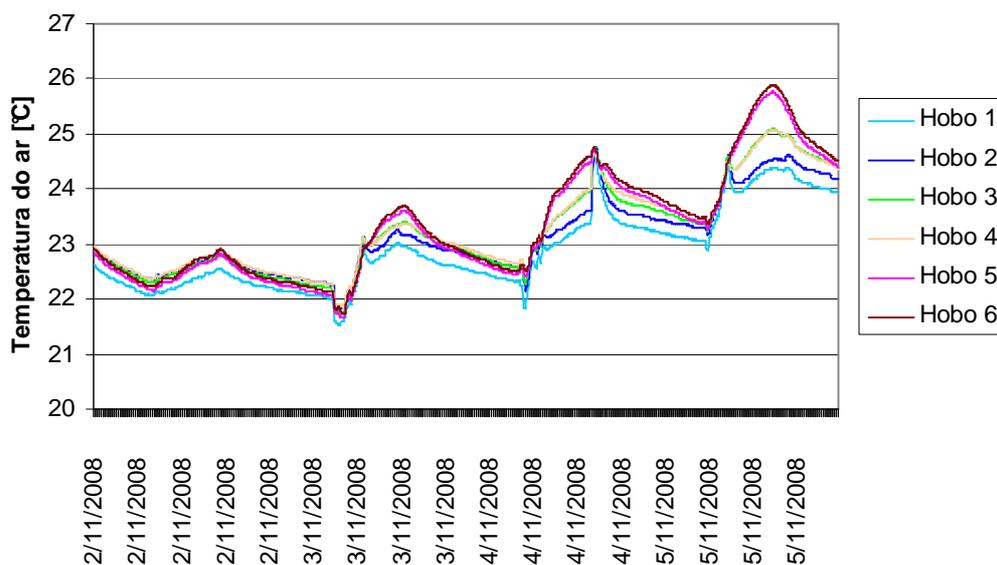


Figura 4.7 – Gráfico de temperaturas do ar: dias 2 a 5/11/2008.

4.1.2. Simulações Com Ventilação

As últimas simulações de calibração foram comparadas com as medições realizadas em setembro de 2007 e janeiro de 2008, quando a casa foi monitorada com abertura de janelas e portas, ou seja, com ventilação natural.

4.1.2.1. Resultados para o mês de Janeiro de 2008

São mostrados a seguir os resultados das comparações entre as simulações e a medição de janeiro. A Figura 4.8 mostra os resultados para a simulação do nono caso (com alteração na infiltração de ar) comparado com as medições em três dias de janeiro. Verifica-se que a influência da ventilação na temperatura interna dos ambientes é mais significativa na simulação do que a que ocorreu de fato no monitoramento, principalmente na sala e banheiro.

Nos horários da noite, quando as janelas estavam fechadas, os resultados da simulação são mais semelhantes aos medidos. Porém, nos horários diurnos, quando as janelas estavam abertas, os resultados da simulação atingem picos mais elevados que os das medições. A Tabela 4.3 mostra que essa diferença chega ao máximo de 2,0°C na sala, 1,9°C no quarto e 2,2°C no banheiro. Apesar disso, as diferenças médias podem ser consideradas pequenas: 0,2°C na sala, 0,4°C no quarto e 0,6°C no banheiro. Analisando as amplitudes de temperatura no período, verifica-se que nas medições obteve-se amplitude de 3,0°C na sala, 2,8°C no quarto de casal e 2,5°C no banheiro. Já nas simulações, as amplitudes obtidas foram maiores: 4,8°C na sala, 3,3°C no quarto e 4,3°C no banheiro.

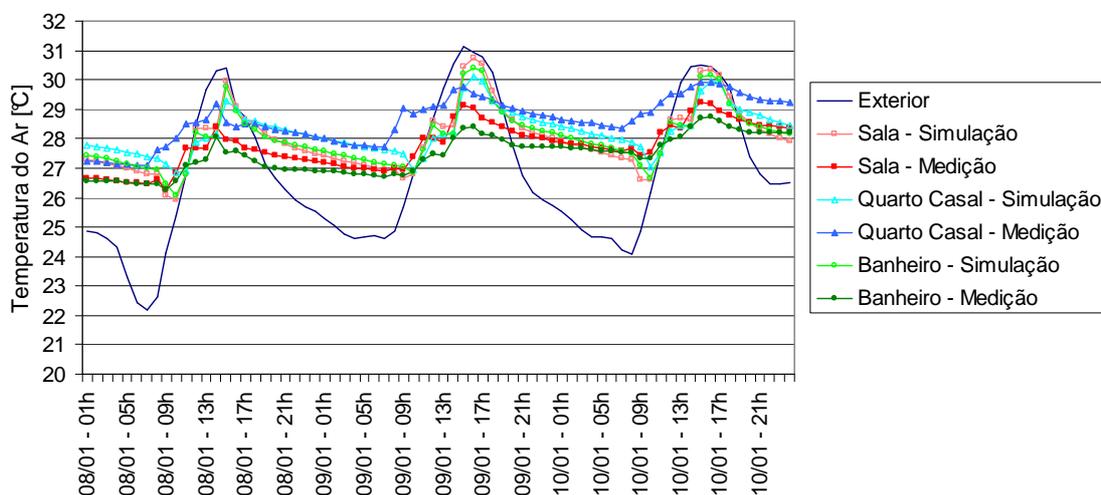


Figura 4.8 – Comparação entre simulação 9 (alteração na infiltração de ar) e medição em janeiro/2008.

Para verificar a influência do coeficiente de descarga na simulação da ventilação, foram realizadas simulações alterando seu valor para 0,7 e para 0,5. Os gráficos dessas simulações são apresentados no Apêndice D, por terem resultados muito semelhantes aos da simulação anterior. Com os resultados da Tabela 4.3 para a simulação 10, que utilizou coeficiente de descarga igual a 0,7, verifica-se que esta alteração provocou um pequeno aumento nos valores e nas amplitudes de temperatura obtidos na simulação, tornando os resultados mais diferentes em relação aos medidos. Já nos resultados da simulação 11, com coeficiente de descarga igual a 0,5, verifica-se uma pequena diminuição nas amplitudes de temperatura, porém não há alterações nas diferenças médias. As amplitudes de temperatura desta

simulação ficaram em 4,7°C na sala, 3,0°C no quarto e 4,2°C no banheiro. Os resultados ficaram mais próximos às medições, mas ainda com diferenças máximas de 2,0°C na sala, 1,9°C no quarto e 2,1°C no banheiro, sempre nos momentos mais quentes do dia, com ventilação.

Tabela 4.3 – Resultados das simulações comparadas às medições de janeiro/2008.

SIMULAÇÃO		DIFERENÇA (Temp. simulada – Temp. medida) [°C]									ERRO QUADRÁTICO			AMPLITUDE [°C]			Alterações adotadas
Nº	Descrição	MÍNIMA			MÁXIMA			MÉDIA			S	Q	B	S	Q	B	
		S	Q	B	S	Q	B	S	Q	B							
-	Medição	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3,0	2,8	2,5	-
9	Simulação 7 + alteração infiltração	1,0	0,7	0,7	2,0	1,9	2,2	0,2	0,4	0,6	0,7	0,7	0,8	4,8	3,3	4,3	Sim
10	Simulação 8 + coef. desc. = 0,7	1,0	0,8	0,8	2,1	2,0	2,3	0,3	0,4	0,6	0,7	0,8	0,8	4,9	3,4	4,5	Não
11	Simulação 8 + coef. desc. = 0,5	0,9	0,6	0,6	2,0	1,9	2,1	0,2	0,4	0,6	0,6	0,7	0,8	4,7	3,0	4,2	Não
12	Simulação 8 + coef. desc. = 0,3	0,8	0,6	0,5	1,8	1,7	1,9	0,2	0,4	0,5	0,6	0,7	0,7	4,4	2,5	3,7	Não
13	Simulação 8 + exp. vel. vento = 0,5	0,8	0,5	0,4	1,7	1,6	1,8	0,2	0,4	0,5	0,6	0,7	0,7	4,3	2,6	3,6	Sim

Obs.: S = Sala; Q = Quarto; B = Banheiro

Tendo em vista que essas duas alterações tiveram pouco efeito sobre os resultados, foi realizada uma nova simulação utilizando coeficiente de descarga ainda menor: igual a 0,3 (simulação 12). Apesar de estarem um pouco mais próximos às medições, os valores de temperatura ainda apresentam diferenças máximas de 1,8°C na sala, 1,7 °C no quarto e 1,9°C no banheiro (gráfico no Apêndice D). As amplitudes de temperatura na simulação foram de 4,4°C na sala, 2,5°C no quarto e 3,7°C no banheiro. Estas alterações não foram mantidas.

As diferenças que permaneceram podem também ser provocadas por imprecisão nos valores de coeficiente de pressão. Porém, como este é um parâmetro complexo, com a inclusão de uma série de valores, para cada abertura e para diferentes ângulos de vento, seria difícil definir uma variação para ele. Assim, para tentar minimizar as diferenças nos resultados, optou-se por uma última modificação, no valor do expoente da velocidade do vento, relacionado à rugosidade do entorno. Os resultados desta última simulação (simulação 13) são mostrados na Figura 4.9. Tais resultados se mostram um pouco mais próximos às medições, com diferenças máximas de 1,7°C na sala,

1,6°C no quarto e 1,8°C no banheiro. As diferenças médias foram de 0,2°C na sala, 0,4°C no quarto e 0,5°C no banheiro. As amplitudes de temperatura na simulação foram de 4,3°C na sala, 2,6°C no quarto e 3,6°C no banheiro. Sendo assim, esta última alteração foi mantida, definindo o modelo final.

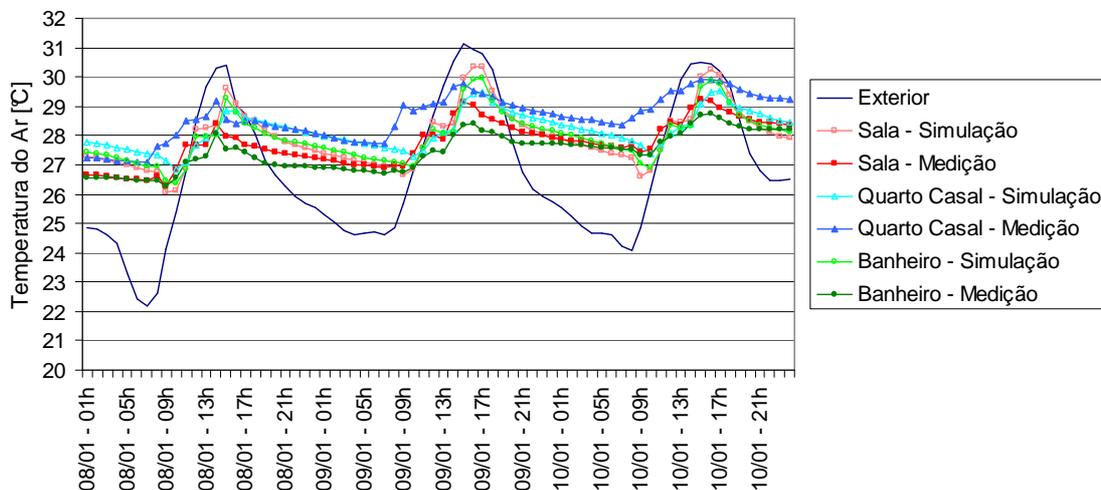


Figura 4.9 – Comparação entre simulação 13 (expoente da velocidade do vento = 0,5) e medição em janeiro/2008.

4.1.2.2. Resultados para o mês de Setembro de 2007

Os resultados das simulações 9 a 13 foram também comparados com as medições realizadas em setembro de 2007. Na Tabela 4.4 são mostradas as diferenças encontradas entre simulações e medição de setembro. O erro quadrático na simulação 9 foi de 1,2°C na sala, 0,7°C no quarto e 1,0°C no banheiro. Na simulação 13, o erro quadrático caiu para 1,0°C na sala, 0,6°C no quarto e 0,8°C no banheiro. As amplitudes que na simulação 9 eram de 5,5°C na sala, 4,1°C no quarto e 5,1°C no banheiro, caíram na simulação 13 para 4,9°C, 2,8°C e 4,2°C, respectivamente, diminuindo as disparidades em relação aos dados medidos. O gráfico da simulação final, com alteração no expoente da velocidade do vento (simulação 13) é mostrado na Figura 4.10. Os demais gráficos (simulações 9 a 12) estão apresentados no Apêndice E, pois têm resultados semelhantes.

Verifica-se que, assim como nas comparações do mês de janeiro, os valores de temperatura da simulação atingem picos mais elevados que os das medições nos horários diurnos, quando as janelas estavam abertas. Apesar dessas diferenças que se mantiveram, esse modelo final apresentou diferenças médias e erros quadráticos iguais ou menores que 1,0°C. Tendo isso em vista,

e considerando que os equipamentos utilizados para as medições de temperatura do ar possuem precisão de $\pm 0,35^{\circ}\text{C}$, o modelo foi considerado adequado para as simulações seguintes, de análises da influência do envelope no desempenho térmico da edificação.

Tabela 4.4 – Resultados das simulações comparadas às medições de setembro/2008.

SIMULAÇÃO		DIFERENÇA (Temp. simulada – Temp. medida) [°C]									ERRO QUADRÁTICO			AMPLITUDE [°C]			Alterações adotadas
N°	Descrição	MÍNIMA			MÁXIMA			MÉDIA			S	Q	B	S	Q	B	
		S	Q	B	S	Q	B	S	Q	B							
-	Medição	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,3	2,0	2,1	-
9	Simulação 7 + alteração infiltração	0,5	1,3	0,8	3,5	2,0	3,1	0,5	0,1	0,4	1,2	0,7	1,0	5,5	4,1	5,1	Sim
10	Simulação 8 + coef. desc. = 0,7	0,5	1,3	0,8	3,6	2,1	3,2	0,5	0,1	0,5	1,2	0,7	1,1	5,6	4,3	5,2	Não
11	Simulação 8 + coef. desc. = 0,5	0,6	1,2	0,7	3,4	1,9	3,0	0,4	0,2	0,4	1,2	0,6	1,0	5,5	3,8	4,9	Não
12	Simulação 8 + coef. desc. = 0,3	0,7	1,2	0,6	3,2	1,4	2,6	0,3	0,3	0,3	1,1	0,6	0,9	5,3	3,1	4,4	Não
13	Simulação 8 + exp. vel. vento = 0,5	0,6	1,1	0,6	2,9	1,2	2,4	0,3	0,3	0,3	1,0	0,6	0,8	4,9	2,8	4,2	Sim

Obs.: S = Sala; Q = Quarto; B = Banheiro

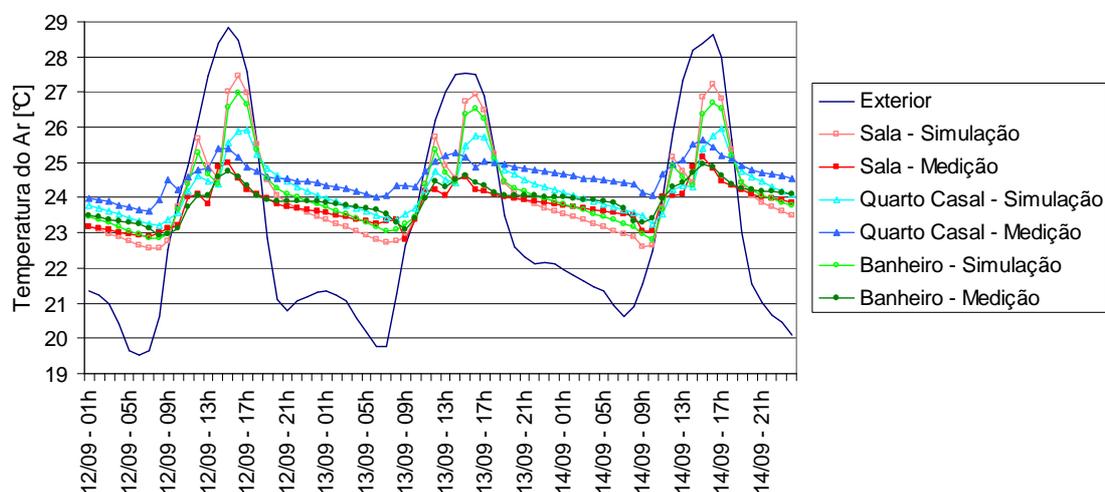


Figura 4.10 – Comparação entre simulação 13 (expoente da velocidade do vento = 0,5) e medição em setembro/2007.

4.2. Análises das Simulações de Desempenho Térmico

O modelo computacional, após calibrado, recebeu algumas simplificações (retirada de algumas aberturas e de todas as persianas e proteções solares), e foi utilizado para simulações de desempenho térmico, com diferentes materiais no seu envelope. A Figura 4.11 mostra um esquema das simulações realizadas, com 13 combinações de envelope, simulados com e sem ventilação e ocupação, totalizando 26 simulações.

Duas zonas do modelo foram escolhidas para as análises: quarto de casal e sala. Os dados de temperatura interna do ar e umidade relativa do ar, para cada uma dessas zonas, obtidas nas simulações com o programa EnergyPlus, foram inseridas no programa Analysis Bio. Com isso, obteve-se a porcentagem de horas de conforto e de desconforto no ano, para cada ambiente, em cada variação simulada. São mostrados a seguir os resultados para o quarto de casal. Os resultados obtidos para a sala foram semelhantes ao do quarto e, por isso, estão apresentados no Apêndice F.

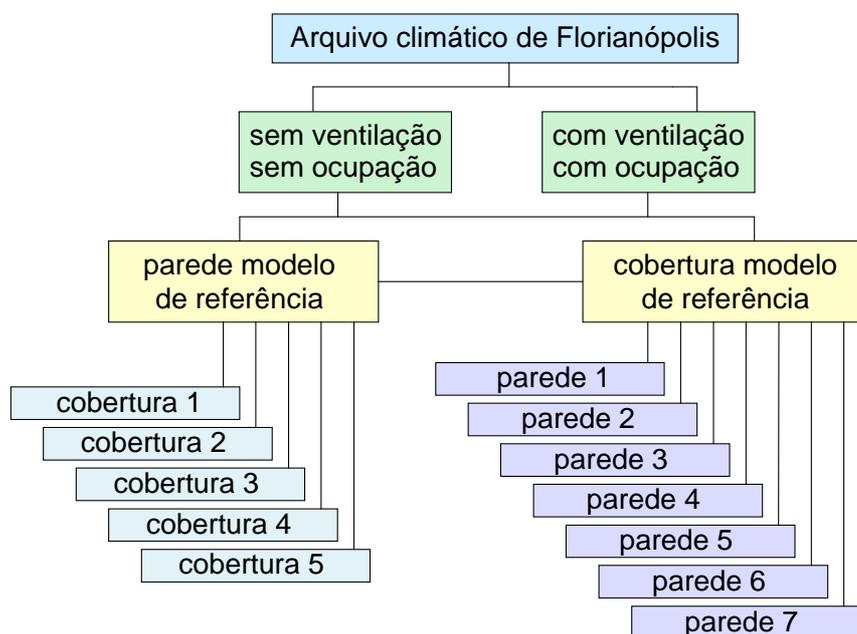


Figura 4.11 – Esquema das simulações finais realizadas.

A Tabela 4.5 mostra as porcentagens de horas de conforto e desconforto no quarto de casal, para as 26 simulações. Nas simulações com ventilação e ocupação, o quarto de casal teve a janela aberta no período diurno, conforme determinado no item 3.2.3.1, e teve ocupação principalmente noturna, conforme o item 3.2.3.2. Verifica-se que as alterações no envelope

provocaram algumas variações nas porcentagens, sendo que nos modelos sem ventilação e ocupação as horas de desconforto variaram de 43,2% a 57,4%, e nos modelos com ventilação e ocupação as horas de desconforto variaram de 57,4% a 69,0%.

Tabela 4.5 – Porcentagem de horas de conforto e desconforto anuais no quarto de casal.

Modelo	Sem Ventilação e Ocupação				Com Ventilação e Ocupação			
	Horas de conforto [%]	Horas de desconforto [%]			Horas de conforto [%]	Horas de desconforto [%]		
		Total	Frio	Calor		Total	Frio	Calor
Modelo Referência	48,3	51,7	23,8	27,9	34,1	65,9	26,2	39,7
Variação Cobertura 1	46,7	53,3	25,1	28,2	31,0	69,0	29,5	39,5
Variação Cobertura 2	50,5	49,5	23,1	26,4	39,1	60,9	22,6	38,3
Variação Cobertura 3	49,2	50,8	23,5	27,3	35,6	64,4	24,7	39,7
Variação Cobertura 4	50,5	49,5	23,3	26,2	38,4	61,6	22,7	38,9
Variação Cobertura 5	49,1	50,9	23,3	27,6	36,0	64,0	24,5	39,5
Variação Parede 1	46,9	53,1	25,3	27,8	31,8	68,2	29,2	39,0
Variação Parede 2	49,6	50,4	23,3	27,1	34,9	65,1	25,7	39,4
Variação Parede 3	50,5	49,5	23,0	26,5	37,6	62,4	23,9	38,5
Variação Parede 4	42,6	57,4	27,0	30,4	31,7	68,2	29,3	38,9
Variação Parede 5	53,0	47,0	22,7	24,3	40,1	59,9	22,0	37,9
Variação Parede 6	56,8	43,2	21,1	22,1	42,6	57,4	20,4	37,0
Variação Parede 7	44,6	55,4	24,9	30,5	35,7	64,3	25,6	38,7

Para todas as opções de envelope, o modelo com ventilação e ocupação apresentou maior desconforto que o modelo sem ventilação e ocupação, principalmente por calor. Nos modelos sem ventilação e ocupação, os valores de desconforto por frio e por calor são semelhantes (diferenças variando de 1,0% a 5,6%). Já nos modelos com ventilação e ocupação, as porcentagens de desconforto por calor são de 9,6 a 16,6% maiores que por frio. Isso significa que a ventilação diurna constante durante o verão foi desfavorável ao conforto térmico do ambiente. O ideal para obter conforto seria

fazer a ventilação seletiva, abrindo as janelas apenas nos horários em que a temperatura do ar externa estivesse mais baixa que a interna. Verifica-se ainda que, nos dois casos (com e sem ventilação e ocupação), o menor desconforto foi obtido no modelo com a parede 6, correspondente à parede dupla de tijolos maciços, com camada de manta de lã de rocha no interior.

A Figura 4.12 mostra as cartas bioclimáticas, geradas no programa Analysis Bio, para o modelo de referência com e sem ventilação e ocupação. É possível observar que no caso sem ventilação, os pontos ficam mais organizados, sem ultrapassar determinados valores de umidade. Já no caso com ventilação, os pontos ficam mais dispersos na carta. Apesar dessas diferenças, nos dois casos os pontos se distribuem nas mesmas zonas da carta, estando a maioria dos pontos nas zonas de conforto (1), ventilação (2) e massa térmica/aquecimento solar (7).

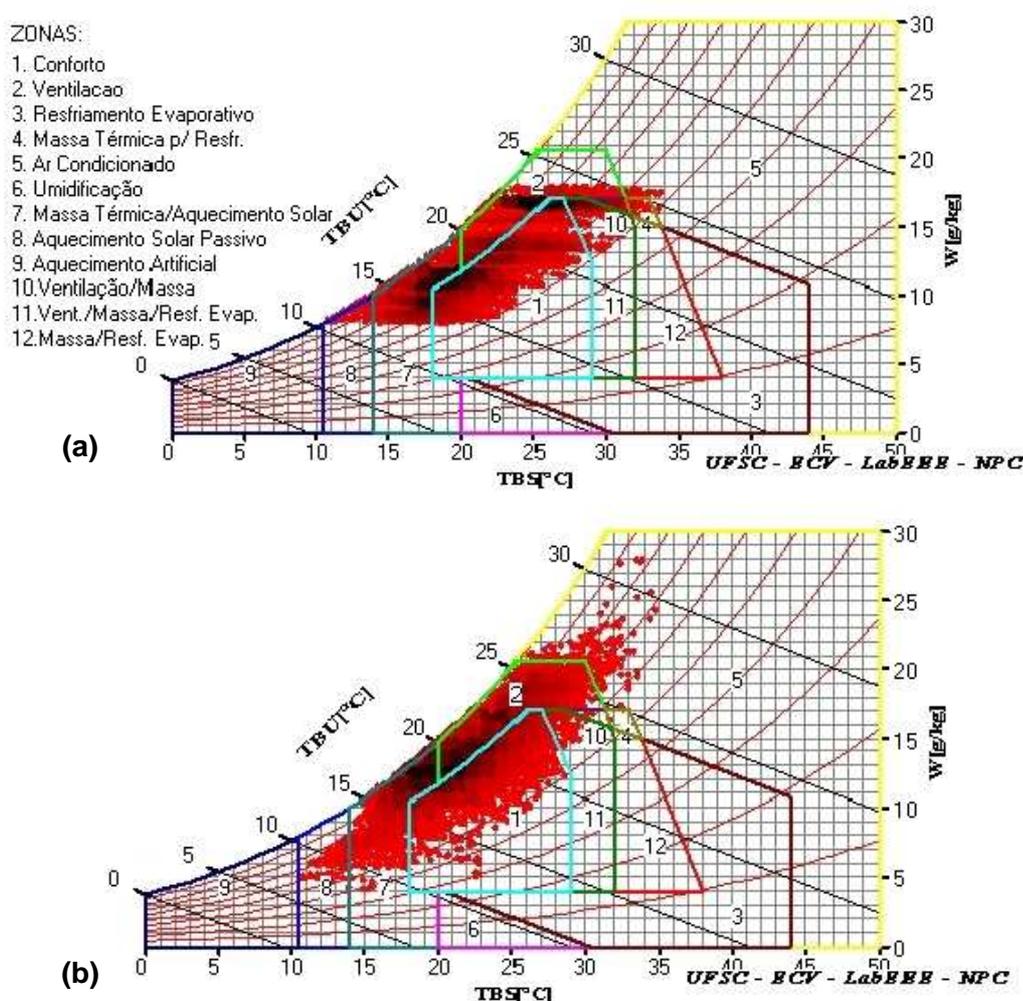


Figura 4.12 – Carta bioclimática gerada no programa Analysis Bio, para o quarto de casal - Modelo de Referência: sem ventilação e ocupação (a), e com ventilação e ocupação (b).

Tendo em vista a diferenciação do padrão de abertura das janelas nos meses de verão e inverno, os dados da simulação com ventilação e ocupação foram separados em período de verão e de inverno. Com essa separação, obtiveram-se os valores de horas de conforto e desconforto para verão e para inverno. Para o modelo de referência obtiveram-se os resultados mostrados na Tabela 4.6. Verifica-se que o valor de horas de desconforto anual, é igual à média entre os valores de verão e inverno, em decorrência de ambos os períodos serem compostos por 6 meses. É possível perceber ainda que, no caso sem ventilação e ocupação o desconforto é maior no verão. Já no caso com ventilação e ocupação, o desconforto é maior no inverno.

Tabela 4.6 – Porcentagem de horas de conforto e desconforto do **quarto de casal** no **Modelo de Referência** para ano inteiro, verão e inverno.

Período	Simulação	Horas de conforto [%]	Horas de desconforto [%]		
			Total	Frio	Calor
Ano inteiro	Sem Ventilação e Ocupação	48,3	51,7	23,8	27,9
	Com Ventilação e Ocupação	34,1	65,9	26,2	39,7
Verão	Sem Ventilação e Ocupação	43,6	56,4	1,8	54,6
	Com Ventilação e Ocupação	38,6	61,4	0,8	60,6
Inverno	Sem Ventilação e Ocupação	52,9	47,1	45,5	1,6
	Com Ventilação e Ocupação	29,6	70,4	51,2	19,2

As três figuras mostradas a seguir (Figuras 4.13, 4.14 e 4.15) apresentam as porcentagens de horas de desconforto anuais no quarto de casal, ordenadas pelo valor crescente de transmitância térmica equivalente (Figura 4.13), capacidade térmica equivalente (Figura 4.14), e atraso térmico equivalente (Figura 4.15) dos componentes do envelope. Essas propriedades térmicas equivalentes foram calculadas por uma ponderação para o conforto, conforme explicado no item 3.2.4 deste trabalho. Verifica-se que a variação dos materiais do envelope provoca também variações nas horas de desconforto, sendo essa variação semelhante para os casos com e sem ventilação e ocupação.

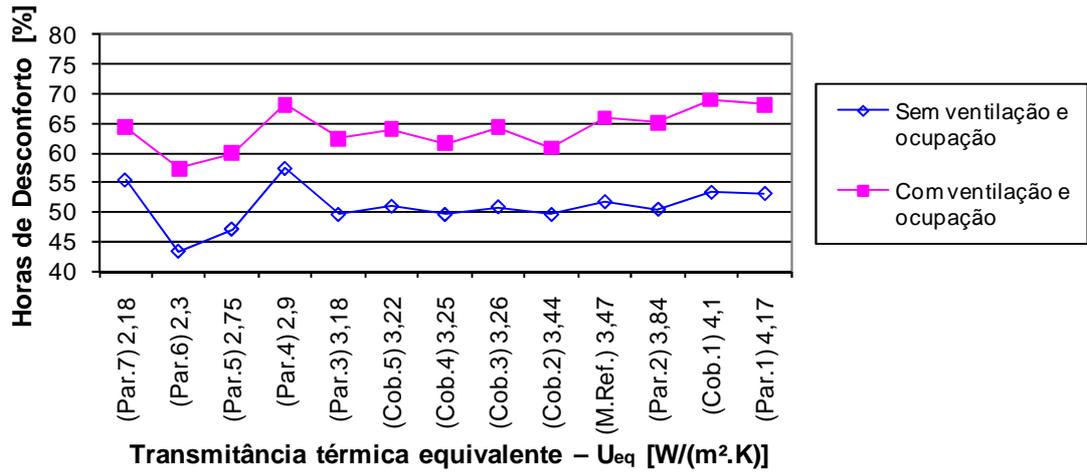


Figura 4.13 – Percentagens de **horas de desconforto anuais** no quarto de casal relacionadas à transmitância térmica equivalente.

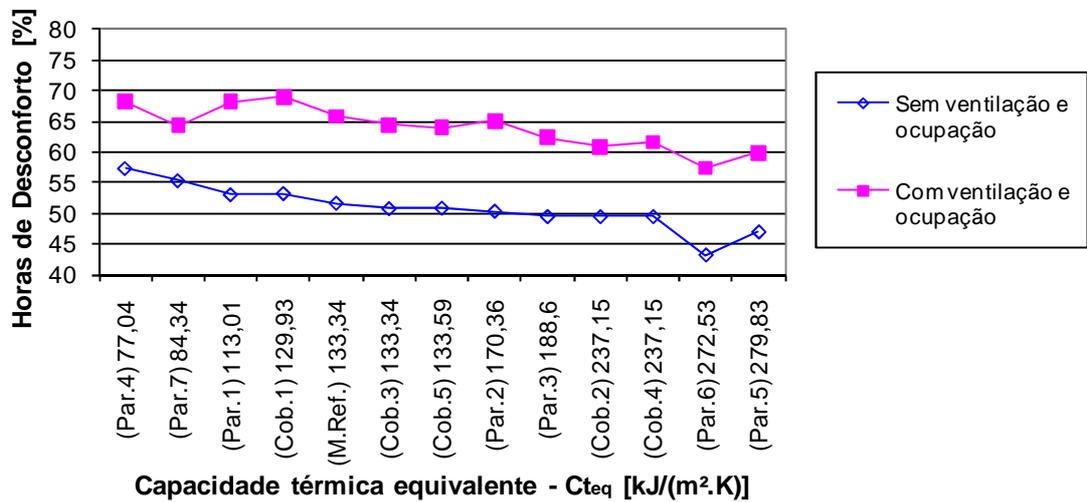


Figura 4.14 – Percentagens de **horas de desconforto anuais** no quarto de casal relacionadas à capacidade térmica equivalente.

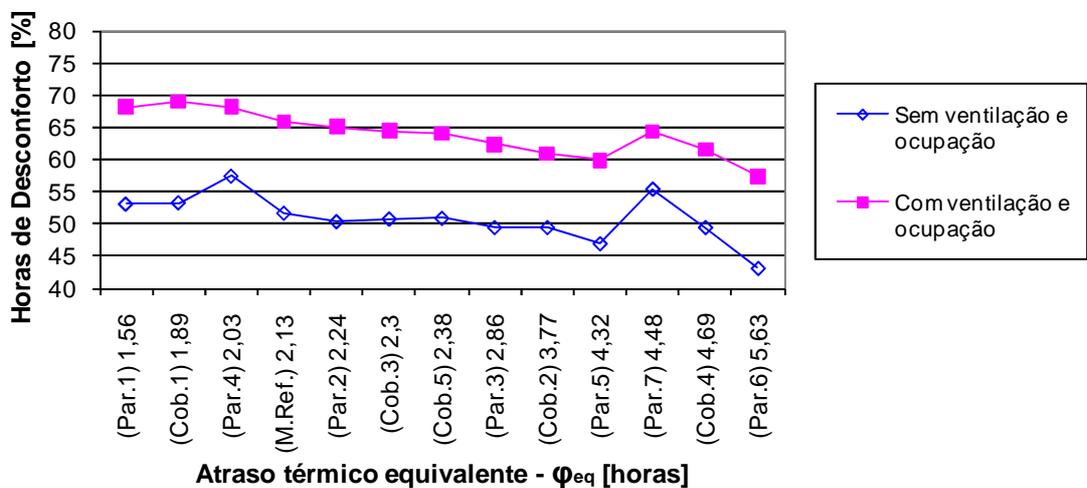


Figura 4.15 – Percentagens de **horas de desconforto anuais** no quarto de casal relacionadas ao atraso térmico equivalente.

Analisando a Figura 4.13, percebe-se que, com o aumento dos valores de transmitância térmica equivalente, há uma tendência ao aumento das horas de desconforto. Porém, essa relação é irregular, com valores que fogem a essa tendência, como os referentes à parede 7 e à parede 4. Não há uma regularidade (reta ascendente ou descendente) na relação entre a variação da transmitância e a variação das horas de desconforto.

Observando as Figuras 4.14 e 4.15, verifica-se que, tanto para capacidade térmica equivalente como atraso térmico equivalente, com o aumento desses valores, há uma tendência à diminuição das horas de desconforto. Porém, novamente essa relação é irregular: no gráfico do atraso térmico verifica-se, por exemplo, que o valor correspondente à parede 7 novamente foge à tendência.

Os mesmos gráficos foram elaborados para as porcentagens de horas de desconforto no quarto de casal apenas no período do verão, obtendo-se os resultados mostrados na Figura 4.16 (transmitância térmica equivalente), Figura 4.17 (capacidade térmica equivalente) e Figura 4.18 (atraso térmico equivalente). Com elas, verifica-se que, apesar das diferenças entre as porcentagens de horas de desconforto apenas no período do verão, ainda assim os resultados dos casos com e sem ventilação e ocupação apresentaram variações bem semelhantes.

Na Figura 4.16 verifica-se que também há uma tendência ao aumento das horas de desconforto à medida que se aumenta a transmitância, porém novamente com irregularidades e com valores fora dessa tendência. Da mesma forma, nas Figuras 4.17 e 4.18 observa-se uma tendência à diminuição das horas de desconforto à medida que se aumenta a capacidade e o atraso térmico, porém também com irregularidades, principalmente no gráfico relacionado à capacidade térmica.

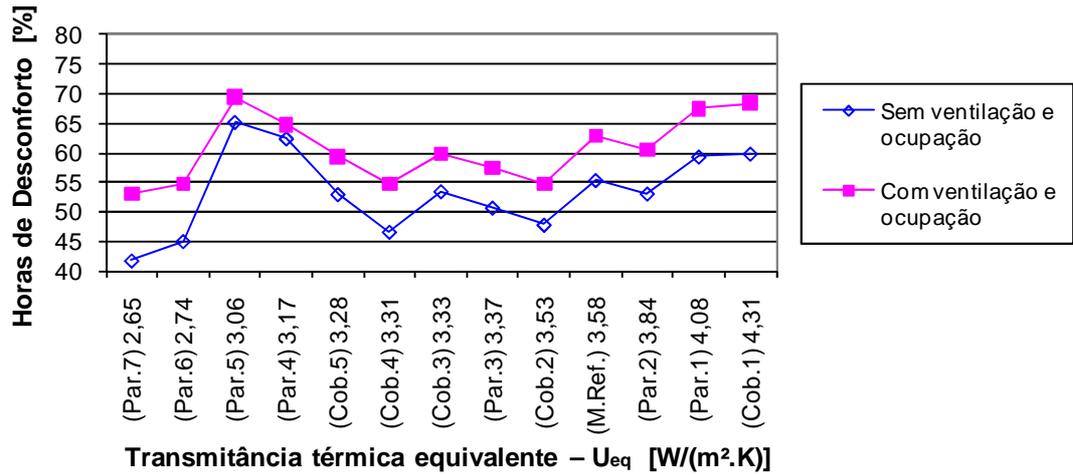


Figura 4.16 – Percentagens de **horas de desconforto no verão** no quarto de casal relacionadas à transmitância térmica equivalente.

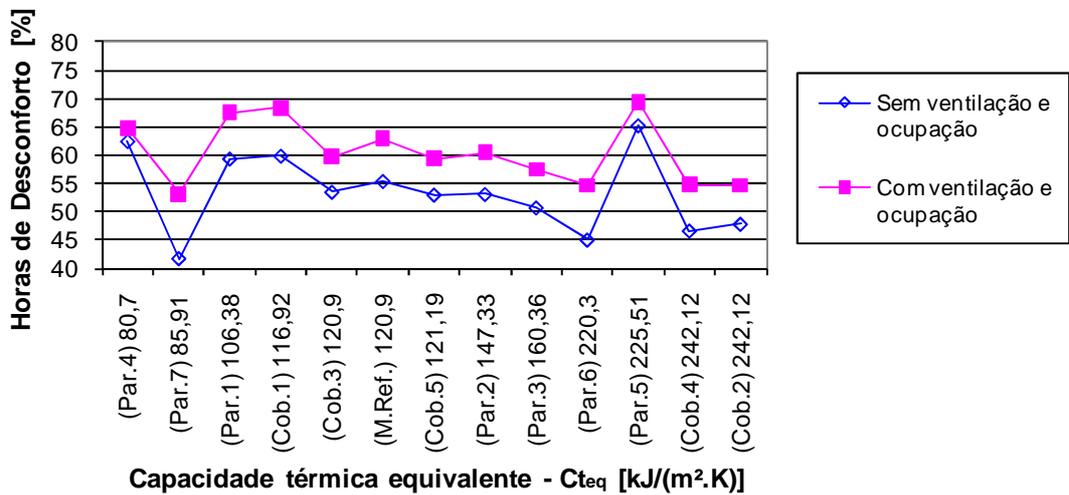


Figura 4.17 – Percentagens de **horas de desconforto no verão** no quarto de casal relacionadas à capacidade térmica equivalente.

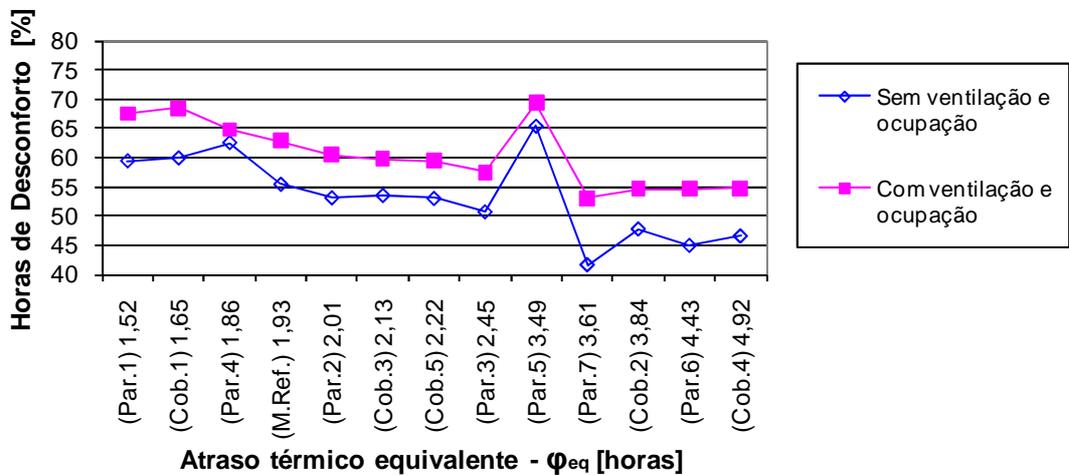


Figura 4.18 – Percentagens de **horas de desconforto no verão** no quarto de casal relacionadas ao atraso térmico equivalente.

4.2.1. Análises de Correlação

Os valores de porcentagens de horas de desconforto foram correlacionados às propriedades térmicas dos componentes do envelope, com o auxílio de planilhas eletrônicas, obtendo-se o valor de “R²”. Foram desenhados gráficos de correlação, considerando separadamente as variações de parede e variações de cobertura.

A Figura 4.19 mostra os gráficos de correlação das porcentagens de horas de desconforto do quarto com as propriedades térmicas da cobertura do modelo. Considerando os valores de R², que em todos os casos ficaram entre 0,4 e 0,7, pode-se dizer que houve correlação moderada entre o desconforto e as três propriedades térmicas, tanto com quanto sem ventilação e ocupação. O maior valor de R² foi 0,70, obtido na correlação entre desconforto e atraso térmico para o modelo sem ventilação e ocupação. O menor valor de R² foi 0,57, obtido na correlação entre desconforto e transmitância térmica do modelo com ventilação e ocupação. De forma geral, verifica-se que, para as variações de cobertura, a transmitância, a capacidade e o atraso térmicos influenciam de forma semelhante as horas de desconforto (R² varia pouco).

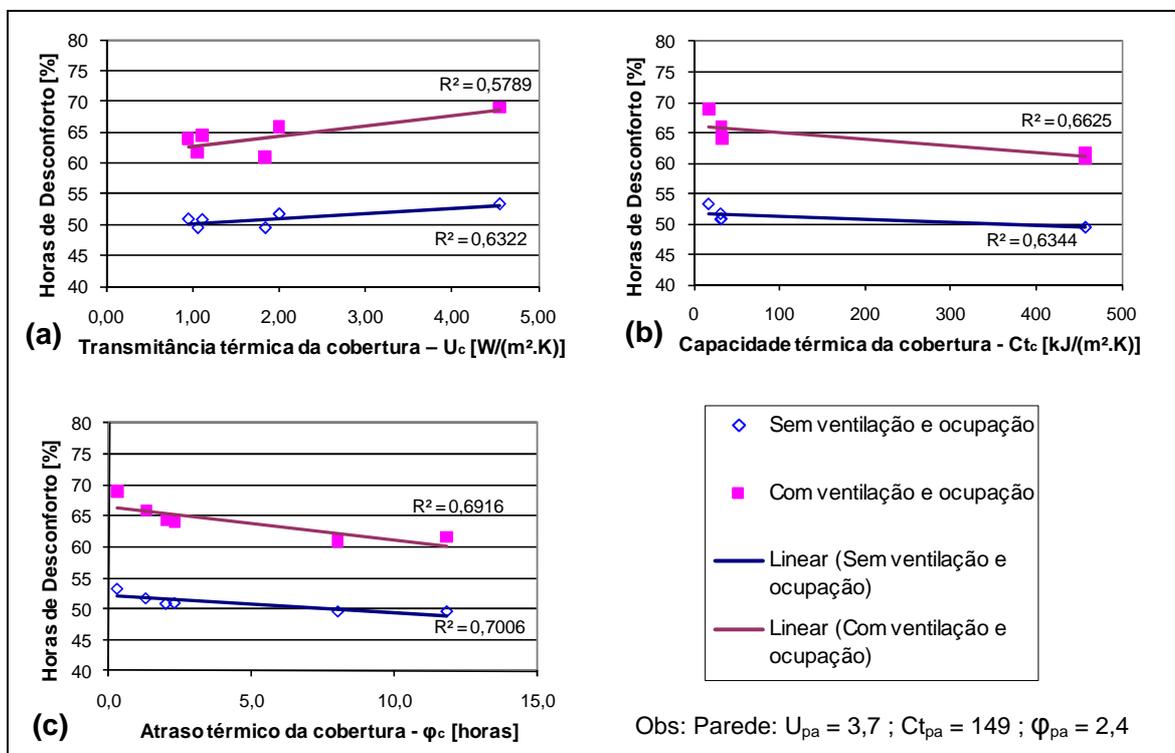


Figura 4.19 – Correlação entre a porcentagem de horas de desconforto e as propriedades térmicas da cobertura do quarto de casal: transmitância térmica (a), capacidade térmica (b), e atraso térmico (c).

Fazendo a correlação das porcentagens de horas de desconforto com as propriedades térmicas da parede do modelo, obtiveram-se os gráficos mostrados na Figura 4.20. Tendo em vista os valores de R^2 , percebe-se que as correlações obtidas foram variadas, sendo algumas fracas e outras fortes. As análises com a transmitância térmica foram as que apresentaram menores valores de R^2 , que ficaram abaixo de 0,4, indicando correlação fraca tanto para o caso com ventilação e ocupação quanto sem ventilação e ocupação. Na análise com o atraso térmico, apenas o caso com ventilação e ocupação obteve forte correlação com o desconforto, com $R^2 = 0,77$. A correlação mais forte ocorreu entre o desconforto e a capacidade térmica da parede: $R^2 = 0,90$ para o modelo sem ventilação e ocupação e $R^2 = 0,79$ para o modelo com ventilação e ocupação.

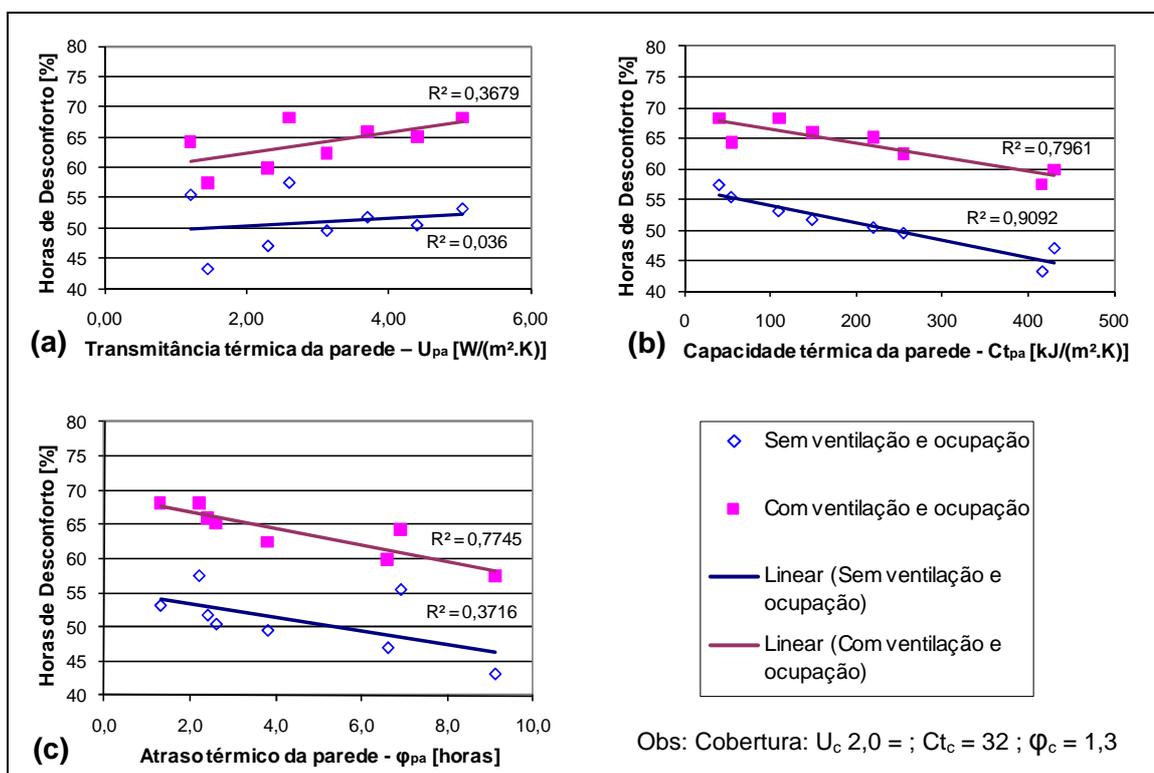


Figura 4.20 – Correlação entre a porcentagem de horas de desconforto e as **propriedades térmicas da parede** do quarto de casal: transmitância térmica (a), capacidade térmica (b), e atraso térmico (c).

Foram ainda realizadas correlações entre as porcentagens de horas de desconforto e as propriedades térmicas equivalentes dos componentes do envelope (ponderação para o cômodo como um todo, conforme explicado no item 3.2.4), mostradas na Figura 4.21. É possível perceber que houve fraca correlação entre desconforto e transmitância térmica, com valores de R^2

menores que 0,4. Houve forte correlação entre desconforto e capacidade térmica, com valor de $R^2 = 0,75$ para o caso com ventilação e ocupação, e $R^2 = 0,81$ para o caso sem ventilação e ocupação.

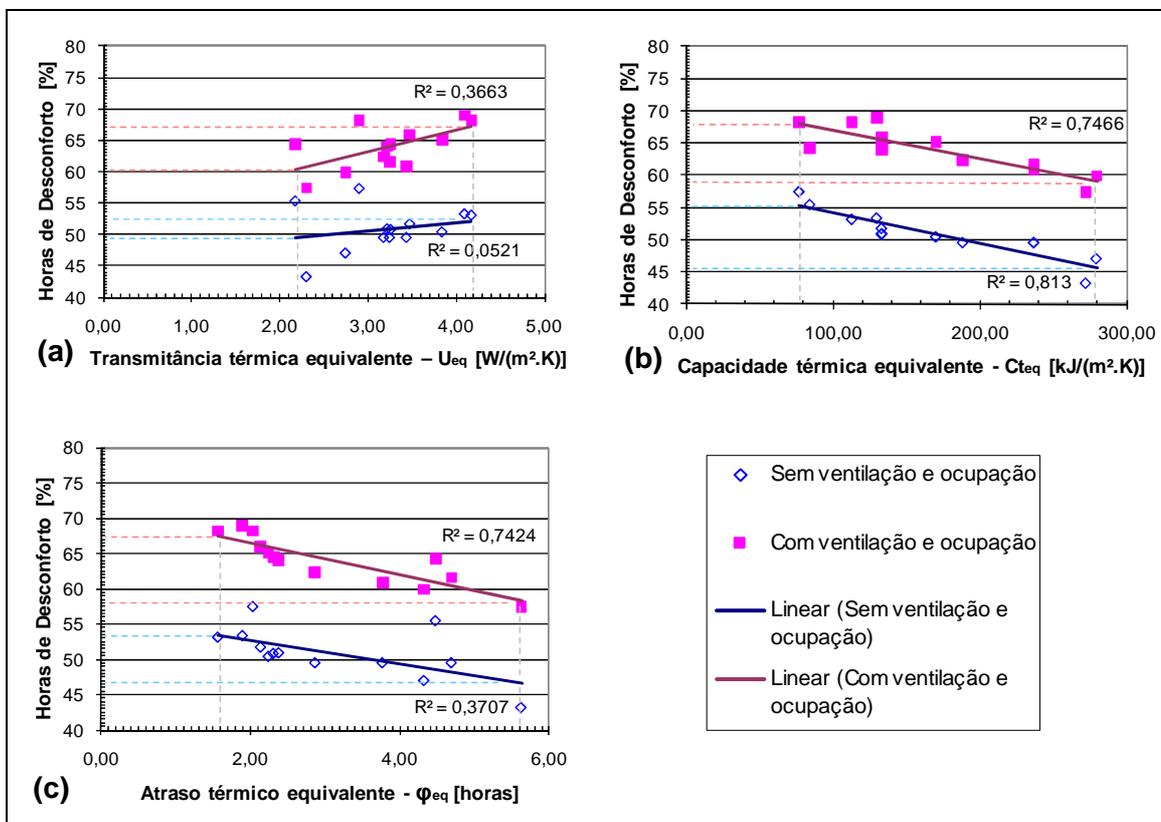


Figura 4.21 – Correlação entre a porcentagem de horas de desconforto e as **propriedades térmicas equivalentes** do quarto de casal: transmitância térmica (a), capacidade térmica (b), e atraso térmico (c).

Analisando a linha de tendência indicada em cada correlação, observa-se que, na análise da Figura 4.21a, a mesma variação de transmitância térmica equivalente corresponderia a uma variação de 3% no desconforto do caso sem ventilação e ocupação e de 7% no desconforto do caso com ventilação e ocupação. Isso significa que, apesar da fraca correlação, a transmitância exerce maior influência sobre o desconforto para o modelo ventilado e ocupado. Fazendo a mesma análise para a Figura 4.21b, verifica-se que a mesma variação de capacidade térmica equivalente corresponderia a uma variação de 10% no desconforto do caso sem ventilação e ocupação e de 9% no desconforto do caso com ventilação e ocupação. Sendo assim, a capacidade térmica influencia o desconforto do modelo ventilado e ocupado tanto quanto o modelo sem ventilação e ocupação. Na análise para a Figura 4.21c, observa-se que a mesma variação de atraso térmico equivalente

corresponderia a uma variação de 7% no desconforto do caso sem ventilação e ocupação e de 9% no desconforto do caso com ventilação e ocupação. Dessa forma, o atraso térmico demonstra exercer maior influência sobre o desconforto do modelo ventilado e ocupado do que sobre o modelo sem ventilação e ocupação

Esses resultados apontam que o tipo de material do envelope influencia no desempenho térmico da edificação com ventilação e ocupação, em alguns casos até mais do que no caso da edificação sem ventilação e ocupação. Eles indicam também que essa influência está mais fortemente relacionada à capacidade térmica dos componentes do envelope, e menos à sua transmitância térmica.

4.2.2. Análise das Trocas Térmicas

Os gráficos de correlação apresentados anteriormente demonstraram, em alguns casos, maior influência das propriedades dos componentes do envelope sobre os modelos com ventilação e ocupação do que sobre os modelos sem ventilação e ocupação. Esses resultados vão de encontro ao obtido em outras pesquisas apresentadas na revisão bibliográfica deste trabalho, tais como Özdeniz e Hançer (2005) e Liping e Hien (2007), o que gerou desconfianças quanto à veracidade dos resultados aqui obtidos. Foram então verificados os ganhos de calor dos modelos simulados. Os gráficos mostrados nas duas figuras a seguir (Figura 4.22 a 4.23), dizem respeito ao modelo de referência, nos dias 3 a 9 de janeiro, sendo o dia 8/1 o pico de calor do ano climático de referência (TRY).

A Figura 4.22 mostra as trocas de calor do quarto de casal para o modelo de referência sem ventilação e ocupação, e a Figura 4.23 com ventilação e ocupação. Nessas duas figuras, os gráficos são compostos por dados de troca de calor por convecção dos componentes do envelope com o ar no interior do cômodo, trocas de calor por infiltração e ventilação e ganhos de calor pelas cargas térmicas internas (pessoas, iluminação e equipamentos). Verifica-se que em ambos os gráficos existe um grande ganho de calor pela cobertura, seguido pelo ganho da parede leste (pois o quarto fica na fachada leste), e grandes perdas de calor pelo piso. Na Figura 4.23 existe ainda um grande ganho de calor pelas cargas internas, e uma grande perda pela

ventilação.

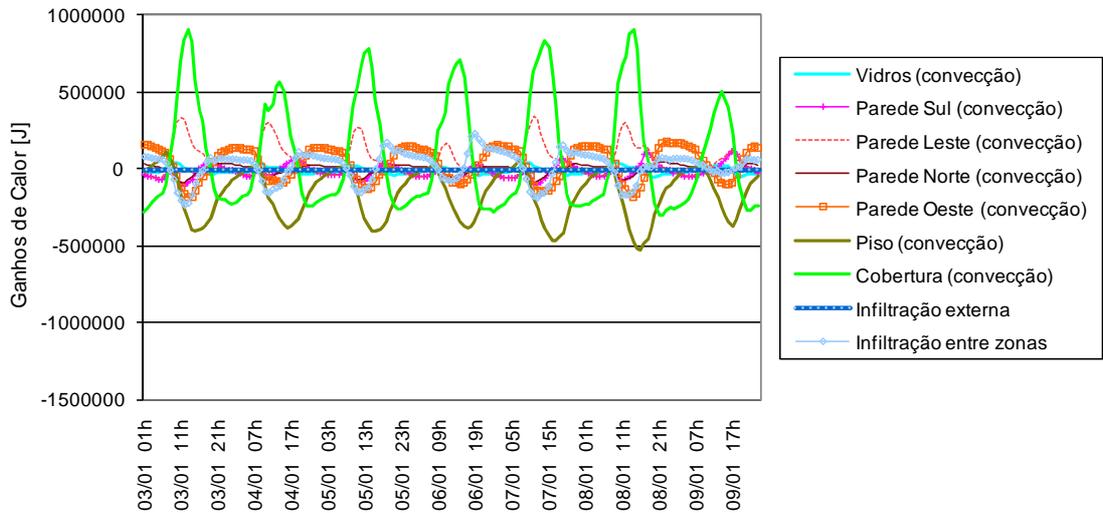


Figura 4.22 – Trocas de calor do quarto de casal – Modelo Referência sem ventilação e ocupação, nos dias 3 a 9 de janeiro.

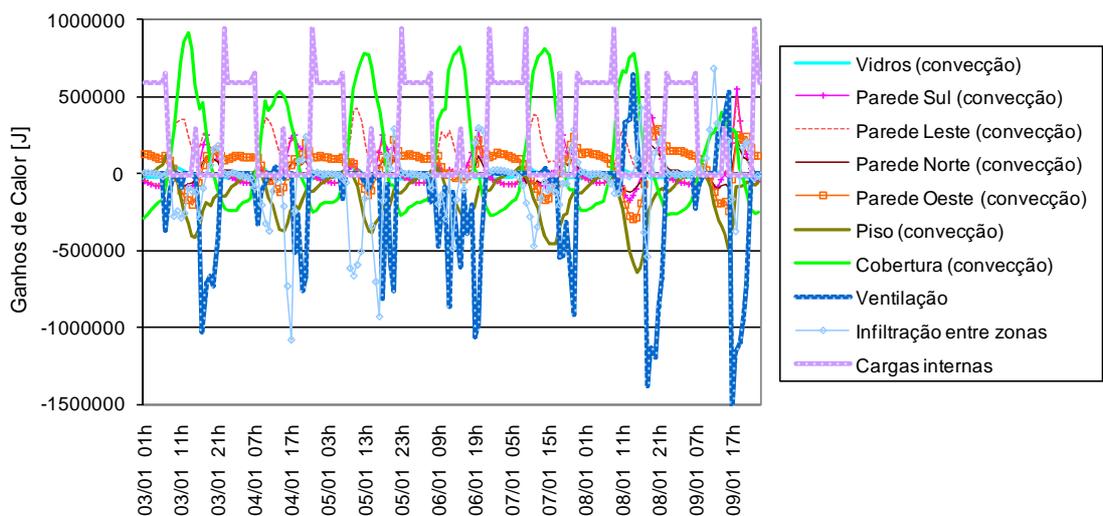


Figura 4.23 – Trocas de calor do quarto de casal – Modelo Referência com ventilação e ocupação, nos dias 3 a 9 de janeiro.

Tendo em vista tais fluxos de calor, era de se esperar que, quando comparado ao modelo sem ventilação e ocupação, o modelo com ventilação e ocupação apresentasse maiores temperaturas durante a noite (quando há grandes ganhos de calor por cargas internas) e menores temperaturas durante o dia (quando há grandes perdas de calor por ventilação). Porém, observando o comportamento da temperatura do ar do quarto de casal no modelo de referência, nesse mesmo período de janeiro, mostrado na Figura 4.24a, verifica-se que a temperatura interna do quarto fica com valores bem próximos

no modelo com e no sem ventilação e ocupação. Verifica-se que a temperatura interna do ar realmente é um pouco mais elevada durante a noite no modelo com ocupação e ventilação, porém durante o dia as temperaturas são muito semelhantes nos dois modelos. Existe uma maior diferenciação nos valores de umidade relativa, que são mais elevados para o modelo com ventilação e ocupação. Possivelmente essa diferença de umidade tenha provocado o maior número de horas de desconforto no modelo ventilado e ocupado. Pode-se também observar que nos dois modelos a temperatura interna fica com valores próximos à temperatura externa. A Figura 4.24b mostra as temperaturas e umidades em uma semana com temperatura do ar mais baixa, em novembro, e novamente verifica-se a semelhança nos valores de temperatura, com maiores diferenças na umidade relativa do ar.

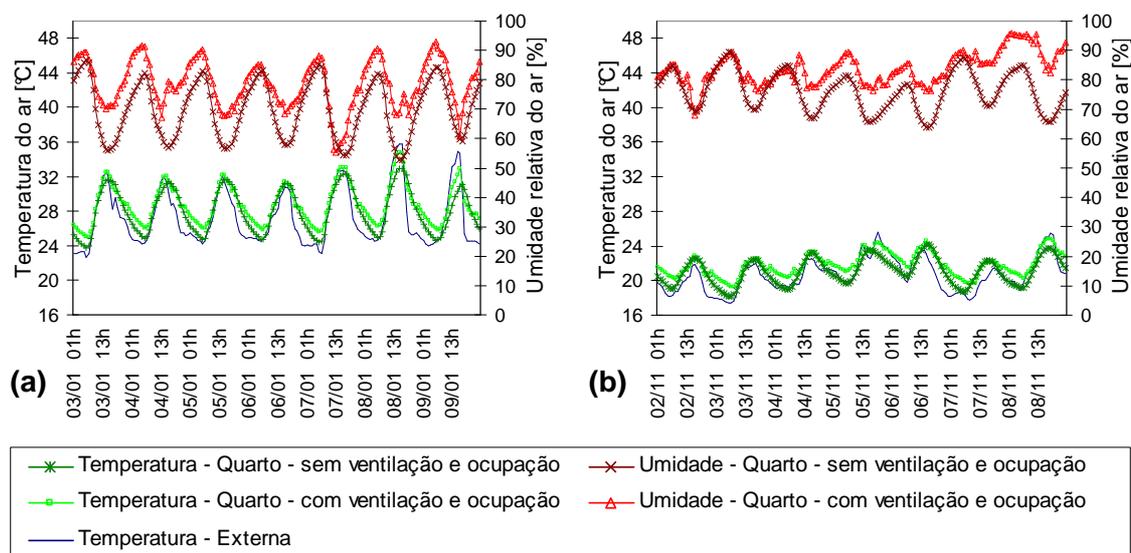


Figura 4.24 – Temperatura e umidade relativa do ar no exterior e no quarto – **Modelo Referência:** dias 03 a 09 de janeiro (a), e dias 02 a 08 de novembro (b).

O modelo de referência utiliza componentes no envelope com alta transmitância e baixa capacidade e inércia térmica. Tendo isso em vista, as mesmas análises foram realizadas para a variação do modelo com a parede 6, que possui menor transmitância e maior capacidade e inércia térmica (composta por parede dupla de tijolos maciços com isolamento de manta de lã de rocha).

As trocas térmicas no modelo com variação usando a parede 6 podem ser vistas na Figura 4.25 (sem ventilação e ocupação) e na Figura 4.26 (com ventilação e ocupação). Verifica-se que os principais ganhos de calor também

ocorrem pela cobertura do modelo. A principal diferença em relação ao modelo de referência é que os ganhos de calor pelas paredes são menores, pois estas são mais isoladas termicamente. As principais perdas de calor ocorrem pelo piso durante o dia e pela cobertura durante a noite. No caso da simulação com ventilação e ocupação (Figura 4.26), novamente acrescenta-se um grande ganho de calor noturno por cargas internas. Porém, nesse caso, a ventilação é responsável em determinados momentos por perdas de calor e, em outros, por ganho de calor.

A Figura 4.27 mostra o comportamento da temperatura do ar no quarto de casal no modelo com variação usando a parede 6. Verifica-se que, mesmo nesse caso, apesar das diferenças nos fluxos de calor, as temperaturas ficam muito semelhantes nos modelos com e sem ventilação e ocupação. Esperava-se igualmente que o modelo com ocupação apresentasse maiores temperatura no período noturno e que no período diurno a temperatura do modelo sem ventilação tivesse um maior amortecimento que no modelo com ventilação. Porém apenas no dia de pico de calor, o dia 08/01, é possível perceber uma maior diferença nas temperaturas máximas dos dois modelos.

Com isso, pode-se afirmar a necessidade de avaliar com cuidado os resultados baseados nas simulações dos modelos com ventilação natural, pois eles podem não ser uma boa representação da realidade. As inconsistências verificadas podem ser conseqüência de algumas simplificações do programa computacional utilizado, que considera que cada ambiente é homogêneo termicamente e que apresenta distribuição uniforme dos fluxos de ar. Outra questão a ser citada é que o manual do programa EnergyPlus (ENERGYPLUS, 2008) informa que nos cálculos de transferência de calor por condução e ganho solar através de janelas e portas assume-se que tais janelas e portas estão sempre fechadas. Isso poderia provocar imprecisões nos resultados das simulações com ventilação natural.

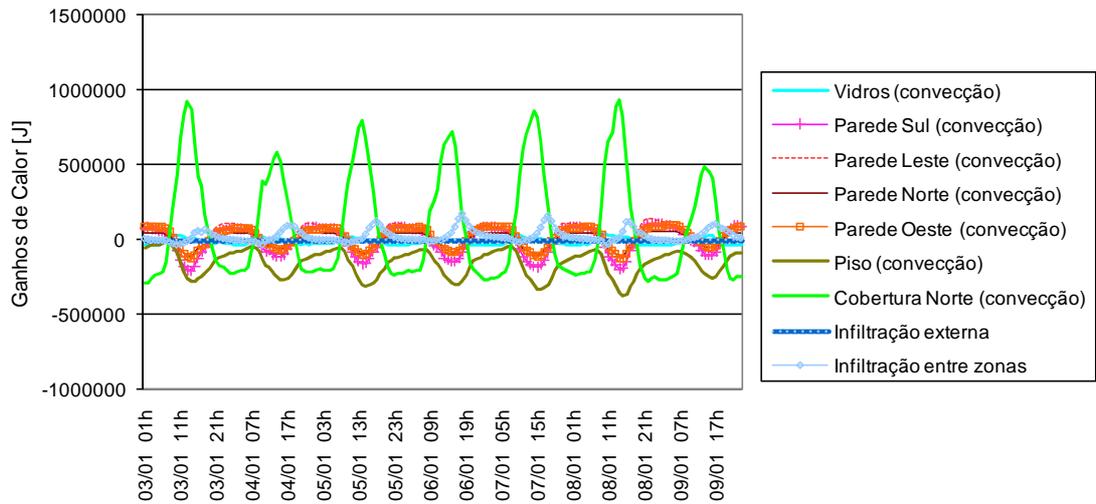


Figura 4.25 – Trocas de calor do quarto de casal – Variação Parede 6 sem ventilação e ocupação, nos dias 3 a 9 de janeiro.

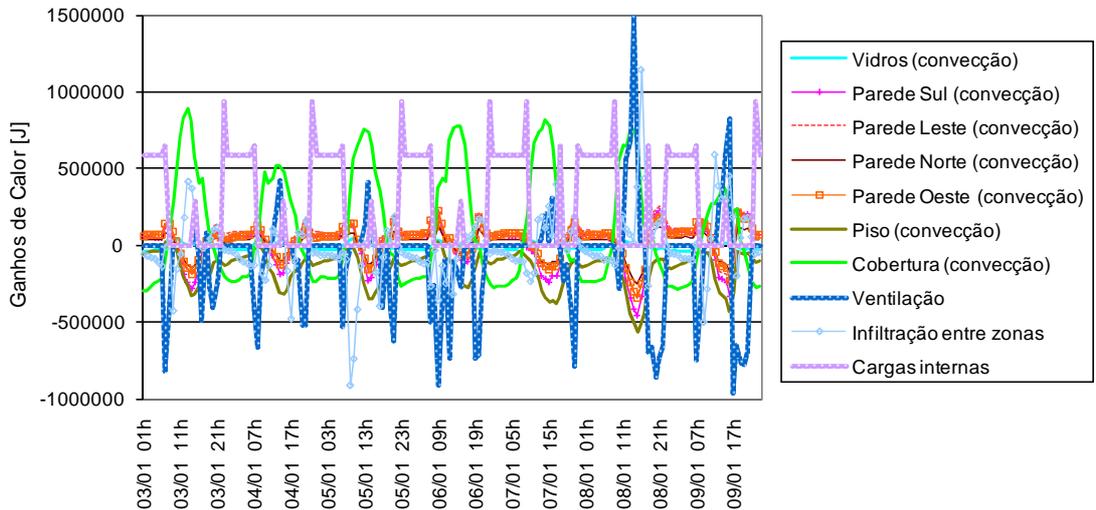


Figura 4.26 – Trocas de calor do quarto de casal – Variação Parede 6 com ventilação e ocupação, nos dias 3 a 9 de janeiro.

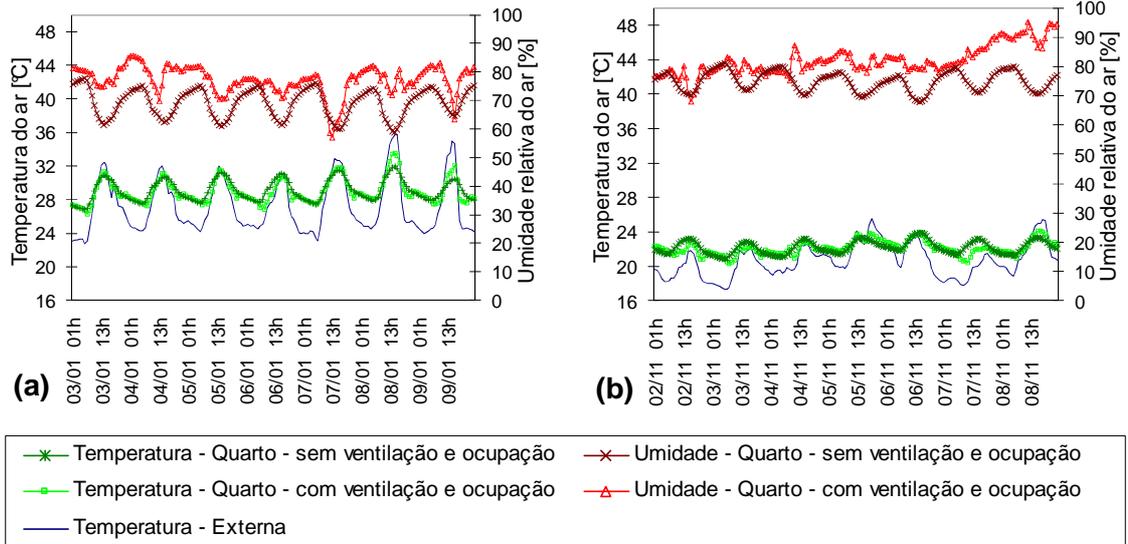


Figura 4.27 – Temperatura e umidade relativa do ar no exterior e no quarto – **Varição Parede 6**: dias 03 a 09 de janeiro (a), e dias 02 a 08 de novembro (b).

CAPÍTULO 5

5. CONCLUSÃO

Este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de investigar a influência das propriedades térmicas do envelope no desempenho térmico de edificações residenciais unifamiliares quando estas são ocupadas e ventiladas naturalmente. Para tal, foram realizadas análises de desempenho térmico, utilizando simulações computacionais.

A caracterização e o monitoramento de uma edificação real, na cidade de Florianópolis, permitiram a calibração de um modelo para simulação computacional, utilizando o programa EnergyPlus (versão 2.2.0). A calibração realizada demonstrou a possibilidade de criação de modelos computacionais com resultados de temperatura interna do ar similares ao que se encontraria em uma edificação real. Porém, tais resultados são melhores para modelos sem ventilação que para modelos com ventilação.

As simulações de calibração sem ventilação natural comparadas com as medições em agosto de 2007 apresentaram resultados muito semelhantes, com erros quadráticos entre 0,2 e 0,4°C apenas. Tendo em vista que a precisão dos equipamentos utilizados nas medições de temperatura do ar (Hobos *data loggers*) é de $\pm 0,35^\circ\text{C}$, tais erros estão cobertos por essa faixa. Quando comparadas às medições de dezembro de 2007 os resultados foram um pouco menos satisfatórios, provavelmente devido à estratificação de temperatura que ocorre nos ambientes em dias muito quentes. Em geral, as simulações sem o uso da ventilação natural são mais simples e conseguem obter resultados mais precisos.

Nestas calibrações destacou-se a importância da correta definição dos valores de temperatura do solo para simulação de edificações térreas, que tiveram grande influência nos resultados. As alterações na volumetria da cobertura tiveram pouquíssimo impacto nos resultados, o que indica que os modelos computacionais de residências térreas podem ter algumas simplificações de geometria, sem grandes prejuízos aos resultados.

As simulações com a ventilação natural obtiveram valores não tão acurados, com erros quadráticos de aproximadamente 0,7°C. As curvas de temperatura obtidas com a simulação apresentaram picos de temperatura mais

elevados que os das medições. Isso poderia indicar uma influência maior da ventilação no modelo simulado do que o observado na residência monitorada. Tais diferenças podem ter sido provocadas por imprecisões nos valores de coeficiente de pressão, ou ainda na não inclusão do mobiliário no interior da residência, que provocaria uma diminuição da velocidade do vento. Destaca-se que a calibração foi realizada com períodos curtos de medição, o que também pode provocar imprecisões.

A partir do modelo calibrado, com algumas simplificações, foram simuladas variações no envelope da edificação, utilizando materiais com diferentes propriedades térmicas. Com isso, foram obtidas as porcentagens de horas de desconforto em um ano, para cada caso, através do programa Analysis Bio. Foram então realizadas correlações entre as horas de desconforto e as propriedades térmicas dos componentes do envelope. Verificou-se que a propriedade térmica equivalente com mais forte correlação com as horas de desconforto da edificação foi a capacidade térmica. A transmitância térmica foi a propriedade com mais fraca correlação com o desconforto do modelo, tanto para o caso sem quanto com ventilação e ocupação.

Com tais resultados seria possível afirmar que existe uma influência do envelope sobre o desempenho térmico da edificação ocupada e ventilada naturalmente. Essa influência é mais fortemente relacionada ao valor de capacidade térmica do componente do envelope. Pode-se dizer que a transmitância térmica do componente proporciona pouca influencia no desempenho térmico da edificação.

Analisando as trocas térmicas do modelo simulado, verificou-se que, apesar das diferenças nos ganhos de calor entre modelo com e sem ventilação e ocupação, a temperatura interna do ar foi muito semelhante em ambos os casos. Tendo isso em vista, ressalta-se a necessidade de cautela ao avaliar dados obtidos por simulação computacional. Determinadas simplificações do programa computacional podem provocar imprecisões nos resultados. O programa EnergyPlus, utilizado nesta pesquisa, considera que cada ambiente é homogêneo termicamente e que apresenta distribuição uniforme dos fluxos de ar (*perfect mix*), o que não se verificaria em um ambiente real. O modelo estudado apresenta alguns ambientes com pé-direito elevado, e, portanto, a

ventilação se dá de forma heterogênea e há estratificação de temperatura.

O fato de o programa considerar as janelas e portas sempre fechadas nos cálculos de transferência de calor, mesmo quando a casa está ventilada, também poderia provocar imprecisões nos modelos com ventilação natural. O trabalho enfrentou algumas outras limitações, conforme se descreve a seguir.

5.1. Limitações do Trabalho

Como as análises de influência do envelope no desempenho térmico da edificação foram baseadas em dados obtidos com a simulação computacional, os resultados estão sujeitos às imprecisões dos cálculos do programa. Além disso, houve grande dificuldade na obtenção de valores para os parâmetros de ventilação, especialmente para os coeficientes de pressão das aberturas, para a edificação com forma não retangular. Praticamente todas as bases de dados encontradas apresentam apenas valores de coeficiente de pressão para edificações quadradas ou retangulares. O programa Cp Generator, utilizado aqui para obter tais dados, também apresenta limitações, de forma que o seu desenvolvedor adverte que edifícios com formas complexas precisam ser analisados cuidadosamente. Sendo assim, os valores obtidos podem também apresentar imprecisões. Valores mais precisos seriam obtidos apenas com experimentos em túnel de vento.

Também houveram limitações nas medições ocorridas na residência estudada: os períodos de monitoramento foram curtos (quatro períodos de sete dias) e os equipamentos utilizados (Hobos *data loggers*) podem apresentar imprecisões e erros de calibração.

5.2. Sugestões para Trabalhos Futuros

Como sugestões para futuros trabalhos relacionados à análises de desempenho térmico de edificações naturalmente ventiladas, podem ser realizadas:

- Utilização de dados de medições (e não apenas de simulação) em residências edificadas com diferentes materiais de construção nas paredes e coberturas, para as análises da influência do envelope no desempenho térmico das edificações.

-
- Definição mais precisa dos valores de coeficiente de pressão para edificações com formas irregulares (não retangulares).
 - Realizar simulações de modelos com ventilação natural em outros programas computacionais, a fim de comparar os resultados com o EnergyPlus, e obter dados mais confiáveis para os modelos naturalmente ventilados.
 - Verificar também a influência da absorvância do envelope no desempenho de edificações residenciais unifamiliares.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220**: Desempenho térmico de edificações. Rio de Janeiro, 2005a.

_____. **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, 2005b.

_____. **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, 2005c.

_____. **NBR 15575**: Edificações habitacionais de até cinco pavimentos – Desempenho. Rio de Janeiro, 2008.

AKUTSU, M.; VITTORINO, F. A Tendência Atual dos Métodos de Avaliação do Desempenho Térmico e Energético de Edificações. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 4., 1997, Salvador. **Anais...** Salvador: ANTAC, 1997. p. 147-151.

ALLEN, C. **Technical Note AIC 5** – Airgloss: Air Infiltration Glossary (English Edition). Air Infiltration Centre, Bracknell, 1981.

ALMEIDA, M. A.; SCHAEFFER, R.; LA ROVERE, E. L. The Potential for Electricity Conservation and Peak Load Reduction in the Residential Sector of Brazil. **Energy**, v.26, n.1, p.413-429, 2001.

AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE; AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **ANSI/ASHRAE 90.2-2001**: Energy-Efficient Design of Low-Rise Residential Buildings. Atlanta, 2001.

_____. **ANSI/ASHRAE 55-2004**: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. Atlanta, 2004.

AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE; AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS; ILLUMINATING ENGINEERING SOCIETY OF NORTH AMERICA. **ANSI/ASHRAE/IESNA 90.1-2001**: Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings. Atlanta, 2001.

ASHRAE – AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **2005 ASHRAE Handbook – Fundamentals**. Capítulo 8: Thermal Comfort. Atlanta, 2005a.

_____. **2005 ASHRAE Handbook – Fundamentals**. Capítulo 29: Nonresidential Cooling and Heating Load Calculation Procedures. Atlanta,

2005b.

BARBOSA, M. J. **Uma Metodologia para Especificar e Avaliar o Desempenho Térmico de Edificações Residenciais Unifamiliares**. 1997. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Departamento de Engenharia de Produção e Sistemas, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1997.

BARBOSA, M. J. et al. Aperfeiçoamento e Desenvolvimento de Novos Métodos de Avaliação de Desempenho para Subsidiar a Elaboração e Revisão de Normas Técnicas. **Coletânea Habitare**, Porto Alegre, v.3 - Normalização e Certificação na Construção Habitacional, capítulo 8, p. 134-173, 2003.

BATISTA, J. O.; LAMBERTS, R.; WESTPHAL, F. S. Avaliação de Desempenho Térmico de Componentes Construtivos Utilizando o EnergyPlus. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 8., 2005, Maceió. **Anais...** Maceió: ANTAC, 2005. p. 145-154.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. Secretaria Nacional de Irrigação. Departamento Nacional de Meteorologia. **Normais Climatológicas (1961-1990)**. Brasília-DF: SPI/EMBRAPA, 1992.

CHENG, V.; NG, E.; GIVONI, B. Effect of Envelope Colour and Thermal Mass on Indoor Temperatures in Hot Humid Climate. **Solar Energy**, v.78, n.1, p. 528-534, 2005.

DE DEAR, R. J.; BRAGER, G. S. Thermal Adaptation in The Built Environment: a Literature Review. **Energy and Buildings**, v.27, n.1, p. 83-96, 1998.

_____. Thermal Comfort in Naturally Ventilated Buildings: Revisions to ASHRAE Standard 55. **Energy and Buildings**, v.34, n.1, p. 549-561, 2002.

DOE – U. S. DEPARTMENT OF ENERGY. **Building Energy Software Tools Directory**. Disponível em: <http://www.eere.energy.gov/buildings/tools_directory/alpha_list.cfm>. Acesso em: 24 abr. 2007a.

_____. **EnergyPlus Energy Simulation Software**. Disponível em: <<http://www.energyplus.gov>>. Acesso em: 24 abr. 2007b.

DORNELLES, K.; RORIZ, M. Efeitos da Inércia Térmica Sobre as Temperaturas Internas de Edificações na Cidade de São Carlos, SP. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 8., 2005, Maceió. **Anais...** Maceió: ANTAC, 2005. p. 586-594.

ELETROBRÁS – Centrais Elétricas Brasileiras S.A.; PROCEL – Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica. **Pesquisa de Posse de Equipamentos e Hábitos de Uso – Ano Base 2005 – Classe Residencial – Relatório Brasil**. Rio de Janeiro: ELETROBRÁS/ PROCEL, 2007.

ENERGYPLUS. **Input Output Reference** – The Encyclopedic Reference to EnergyPlus Input and Output. University of Illinois and Ernest Orlando

Lawrence Berkley National Laboratory, 2008

FLOURENTZOU, F.; VAN DER MAAS, J.; ROULET, C. -A. Natural ventilation for passive cooling: measurement of discharge coefficients. **Energy and Buildings**, v.27, n.1, p. 283 – 292, 1998.

GHISI, E.; GOSCH, S.; LAMBERTS, R. Electricity End-Uses in the Residential Sector of Brazil. **Energy Policy**, v.35, n.1, p. 4107-4120, 2007.

GHISI, E.; MASSIGNANI, R. Thermal Performance of Bedrooms in a Multi-storey Residential Building in Southern Brazil. **Building and Environment**, v.42, n.1, p. 730-742, 2007.

GIVONI, B. Comfort, Climate Analysis and Building Design Guidelines. **Energy and Buildings**, v.18, n.1, p. 11-23, 1992.

GOULART, S.; LAMBERTS, R.; FIRMINO, S. **Dados Climáticos para projeto e avaliação energética de edificações para 14 cidades brasileiras**. 2ª edição. Florianópolis: Núcleo de Pesquisa em Construção/UFSC, 1998.

GRINGS, E. T. O.; BEYER, P. O. Comparação entre Resultados Computacionais e Experimentais do Comportamento Térmico de um Ambiente. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 7., 2003, Curitiba. **Anais...** Curitiba: ANTAC, 2003. p. 1074-1082.

ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARTIZATION. **ISO 7726**: Instruments and methods for measuring phisycal quantities. 1996.

KRÜGER, E. L. O Uso de Equações Preditivas na Avaliação do Desempenho Térmico de um Protótipo Habitacional Constituído de Materiais Alternativos. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v.3, n.2, p. 77-86, abr./jun. 2003.

KRÜGER, E.; GIVONI, B. Predicting Thermal Performance in Occupied Dwellings. **Energy and Buildings**, v.36, n.1, p. 301-307, 2004.

LABEEE – Laboratório de Eficiência Energética em Edificações da Universidade Federal de Santa Catarina. **Programa Computacional Analysis Bio**, Versão: 2.1.3. Disponível em: <<http://www.labeee.ufsc.br/software/analysis/BIO.html>>. Acesso em dez. 2007.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência Energética na Arquitetura**. 2ª edição. São Paulo: ProLivros, 2004.

LIDDAMENT, M. W. **Air Infiltration Calculation Techniques – An Applications Guide**. AIVC - Air Infiltration and Ventilation Centre, 1986.

LIPING, W.; HIEN, W. N. The Impacts of Ventilation Strategies and Facade on Indoor Thermal Environment for Naturally Ventilated Residential Buildings in Singapore. **Building and Environment**, v.42, n.1, p. 4006-4015, 2007.

MANIOGLU, G.; YILMAZ, Z. Economic Evaluation of the Building Envelope and

Operation Period of Heating System in Terms of Thermal Comfort. **Energy and Buildings**, v.38, n.1, p. 266-272, 2006.

MATOS, M. **Simulação Computacional do Desempenho Térmico de Residências em Florianópolis Utilizando a Ventilação Natural**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

MENDES, N.; WESTPHAL, F. S.; LAMBERTS, R.; NETO, J. A. B. C. Uso de Instrumentos Computacionais Para Análise do Desempenho Térmico e Energético de Edificações no Brasil. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v.5, n.4, p. 47-68, out./dez. 2005.

ORDENES, M.; PEDRINI, A.; GHISI, E.; LAMBERTS, R. **Metodologia Utilizada na Elaboração da Biblioteca de Materiais e Componentes Construtivos Brasileiros para Simulações no Visualdoe-3.1**. Relatório Interno – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

ÖZDENİZ, M. B.; HANÇER, P. Suitable Roof Constructions for Warm Climates – Gazimagusa Case. **Energy and Buildings**, v.37, n.1, p. 643-649, 2005.

PEDRINI, A. **Desenvolvimento de Metodologia de Calibração de Modelos para Simulações Térmica e Energética de Edificações**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1997.

SANTANA, M. V. **Influência de Parâmetros Construtivos no Consumo de Energia de Edifícios de Escritório Localizados em Florianópolis – SC**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

TNO Building Research. **Cp Generator**. Disponível em: <<http://cpgen.bouw.tno.nl/cp>>. Acesso em: 10 mai. 2008.

WESTPHAL, F. S.; LAMBERTS, R. Building Simulation Calibration Using Sensitivity Analysis. In: BUILDING SIMULATION, 9., 2005, Montreal. **Proceedings...** Montreal: IBPSA, 2005. p. 1331-1338.

WONG, N.H.; LI, S. A Study of the Effectiveness of Passive Climate Control in Naturally Ventilated Residential Buildings in Singapore. **Building and Environment**, v.42, n.1, p 1395-1405, 2007.

YILMAZ, Z. Evaluation of Energy Efficient Design Strategies for Different Climatic Zones: Comparison of Thermal Performance of Buildings in Temperate-Humid and Hot-Dry Climate. **Energy and Buildings**, v.39, n.1, p. 306-316, 2007.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Planta e Cortes da Edificação Estudada.

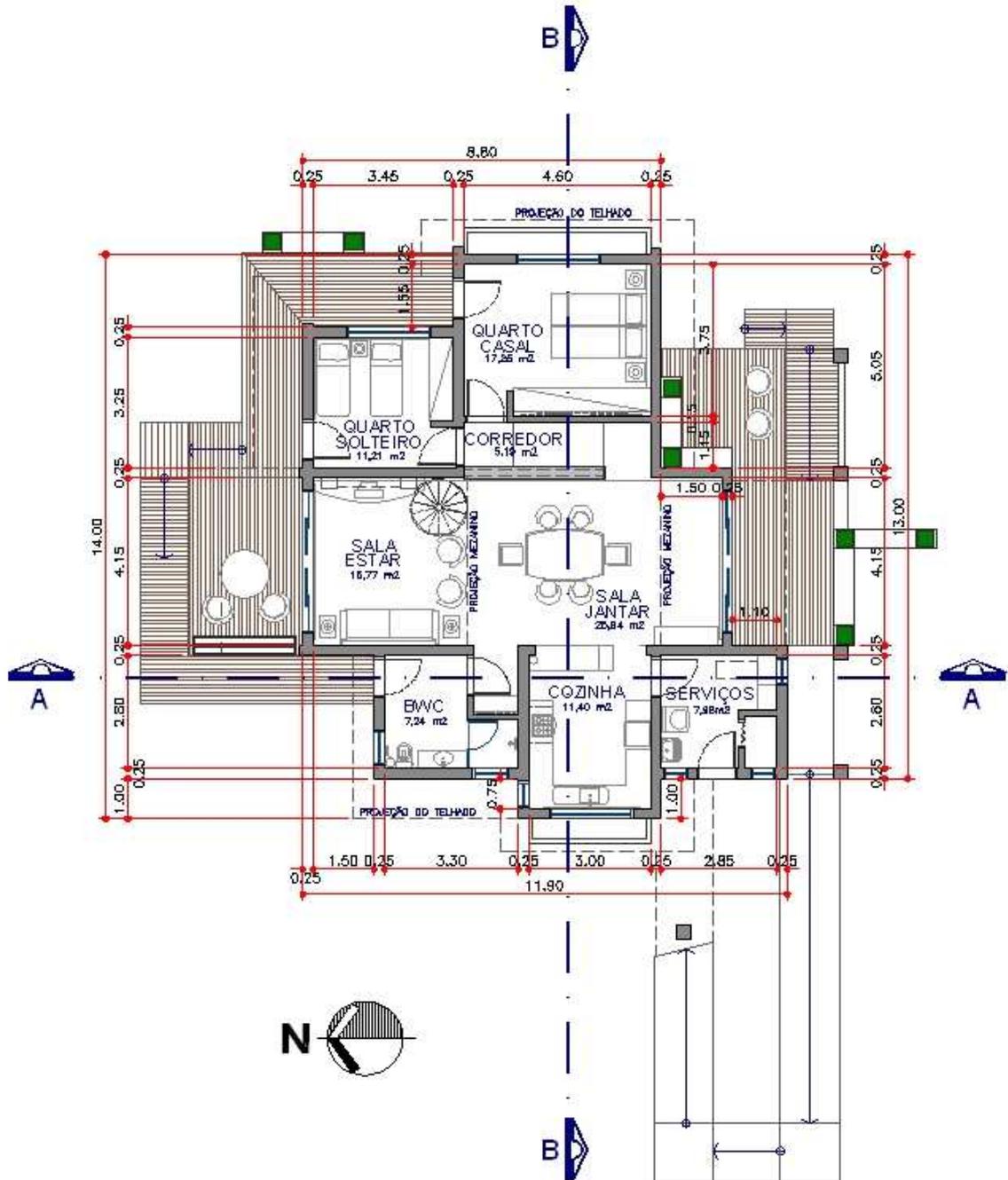


Figura A.1 – Planta baixa.



Figura A.2 – Corte AA.



Figura A.3 – Corte BB.

APÊNDICE B – Gráficos da Calibração: Mês de Dezembro

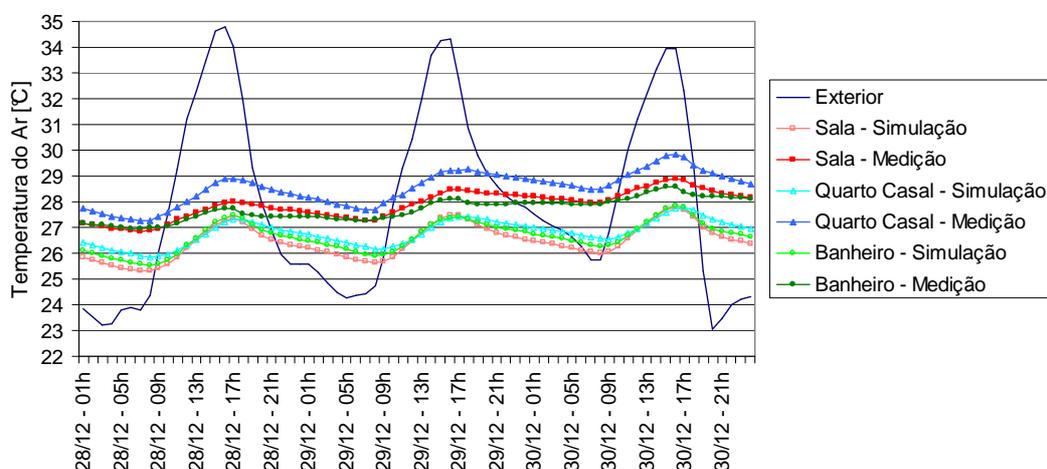


Figura B.1 – Comparação entre simulação 3 (alteração na volumetria da cobertura) e medição em dezembro/2007.

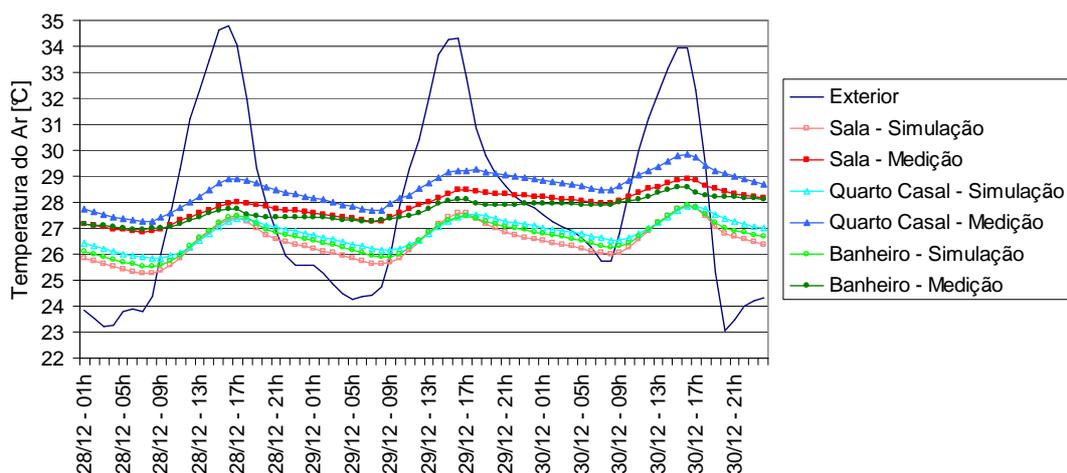


Figura B.2 – Comparação entre simulação 4 (resistência térmica - 10%) e medição em dezembro/2007.

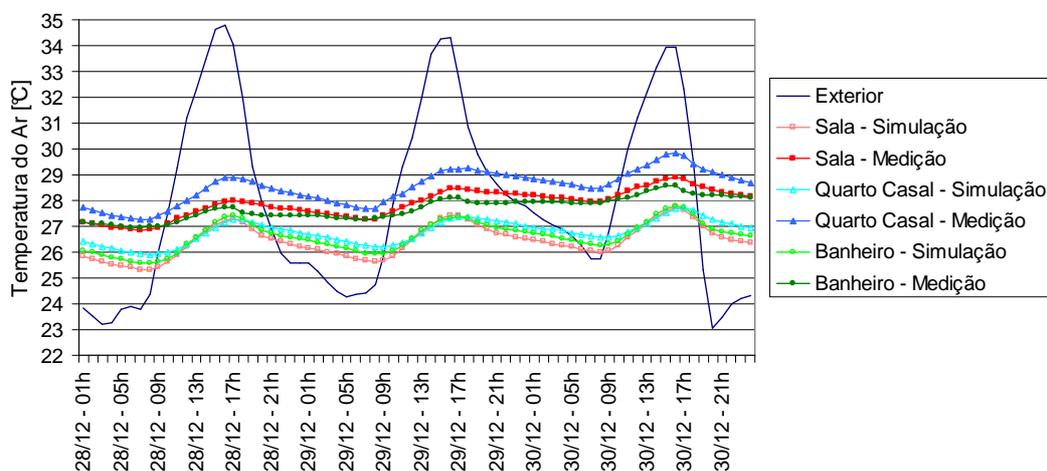


Figura B.3 – Comparação entre simulação 5 (resistência térmica + 10%) e medição em dezembro/2007.

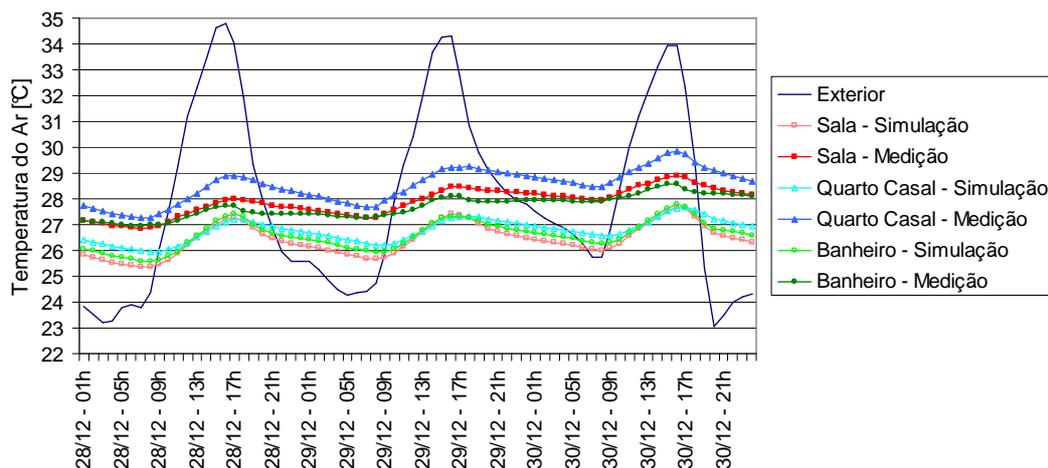


Figura B.4 – Comparação entre simulação 6 (resistência térmica + 20%) e medição em dezembro/2007.

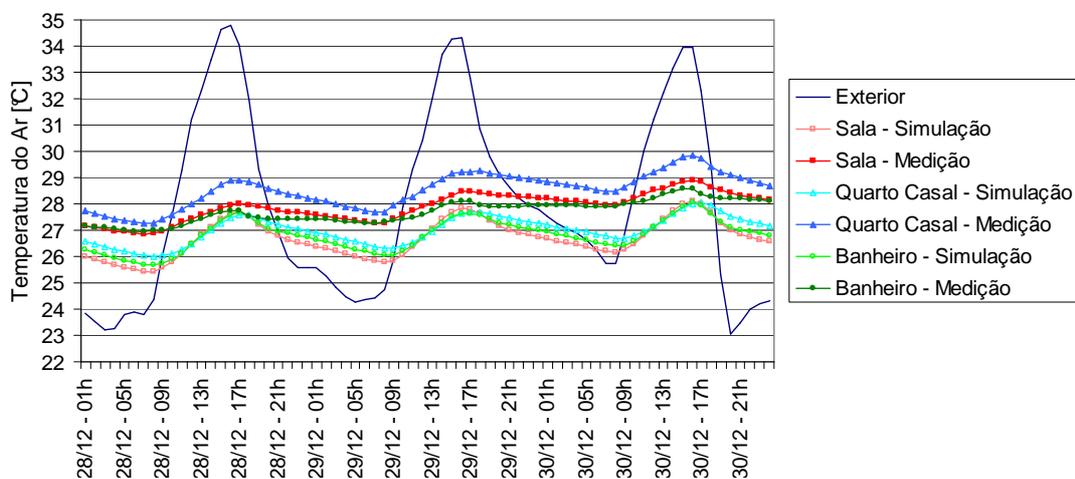


Figura B.5 – Comparação entre simulação 7 (alteração na absorvância) e medição em dezembro/2007.

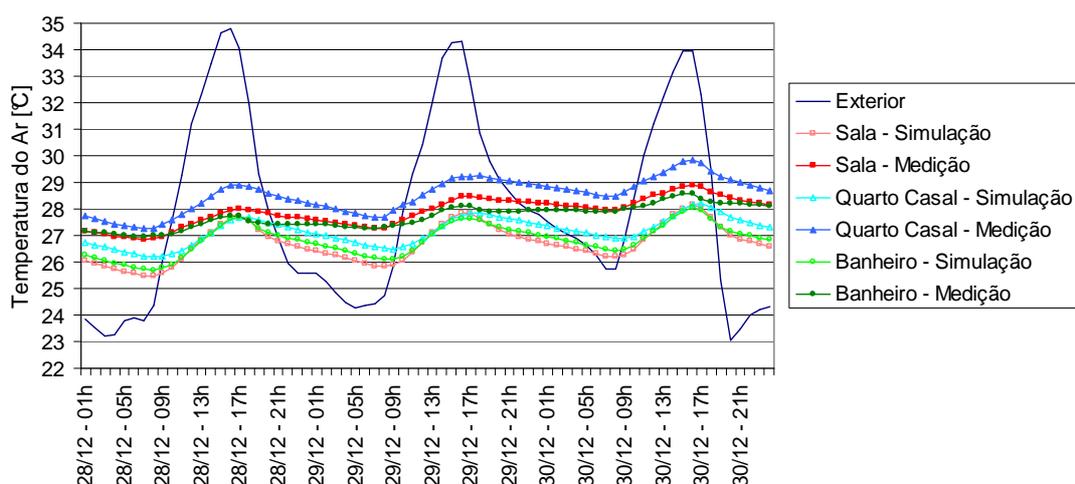


Figura B.6 – Comparação entre simulação 8 (alteração no ganho de calor por equipamentos) e medição em dezembro/2007.

APÊNDICE C – Gráficos da Calibração: Mês de Agosto

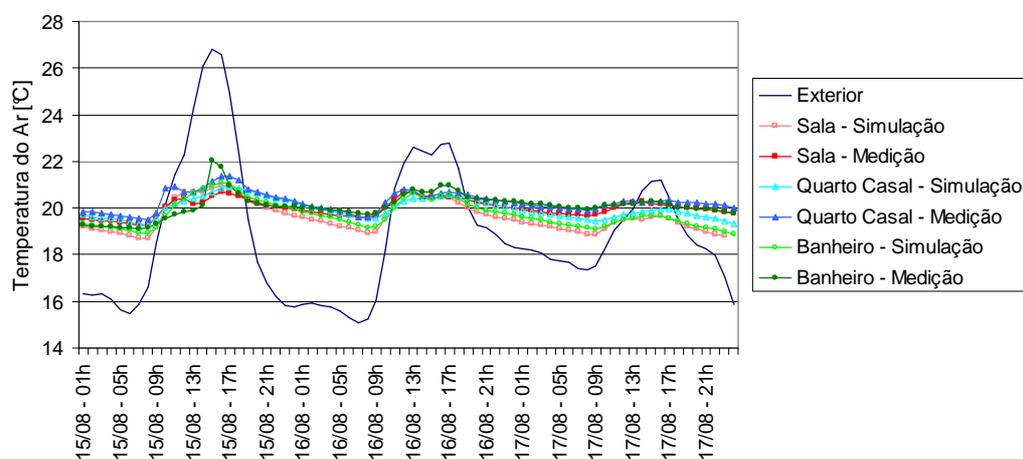


Figura C.1 – Comparação entre simulação 2 (alteração na temperatura do solo) e medição em agosto/2007.

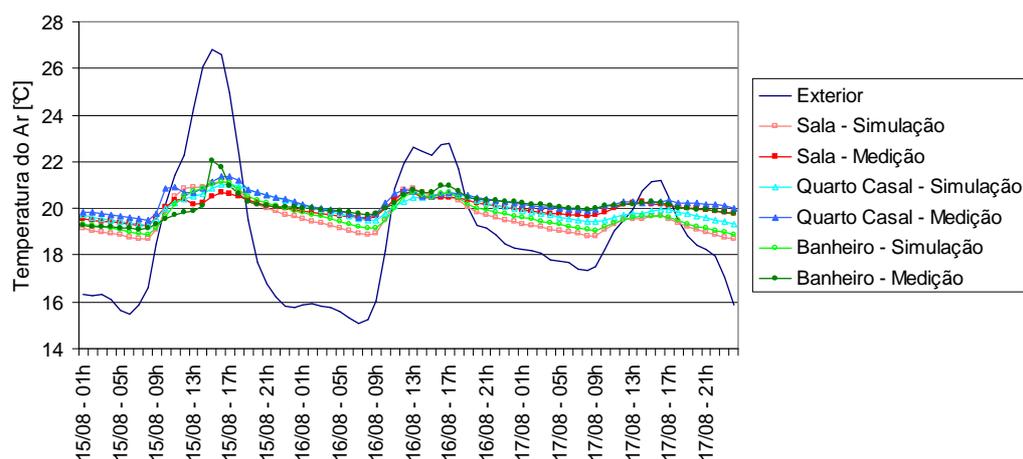


Figura C.2 – Comparação entre simulação 3 (alteração na volumetria da cobertura) e medição em agosto/2007.

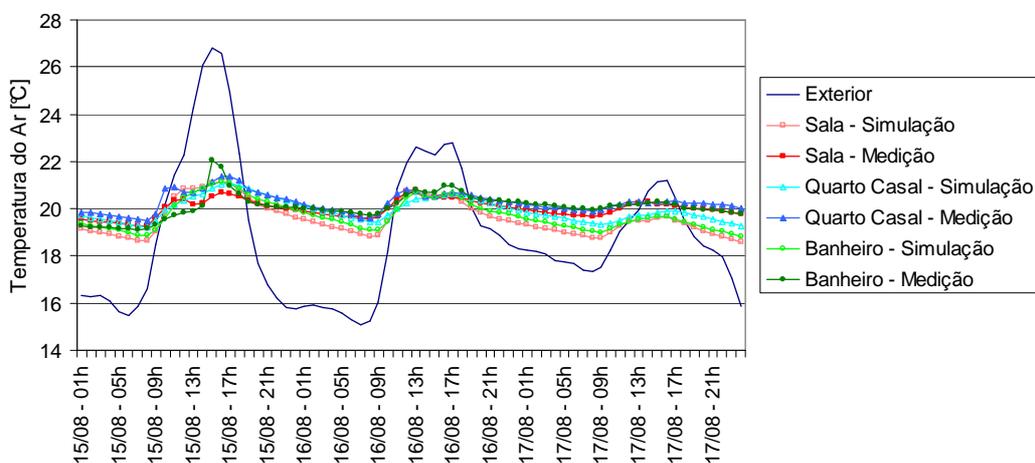


Figura C.3 – Comparação entre simulação 4 (resistência térmica - 10%) e medição em agosto/2007.

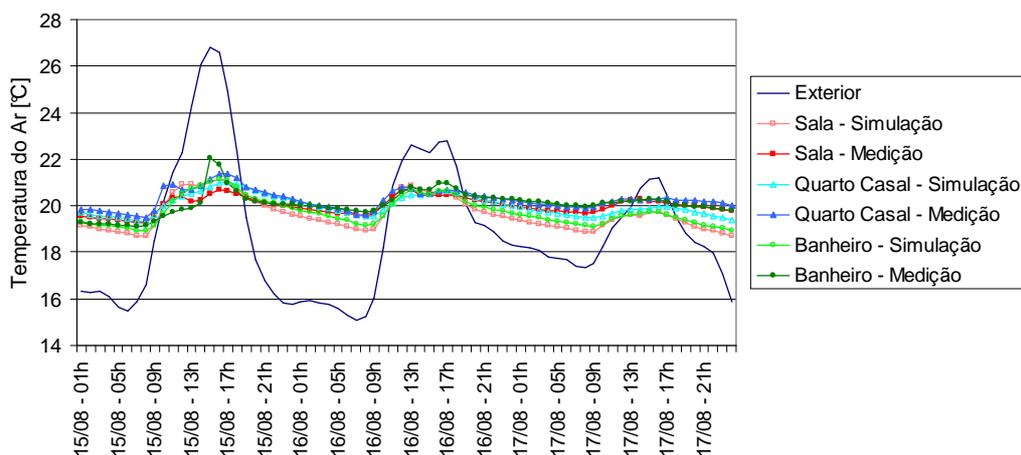


Figura C.4 – Comparação entre simulação 5 (resistência térmica + 10%) e medição em agosto/2007.

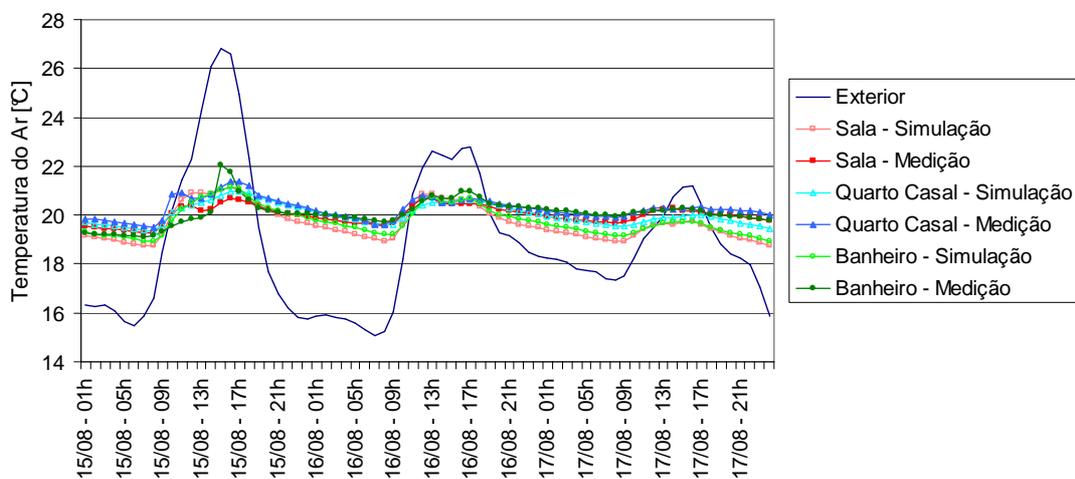


Figura C.5 – Comparação entre simulação 6 (resistência térmica + 20%) e medição em agosto/2007.

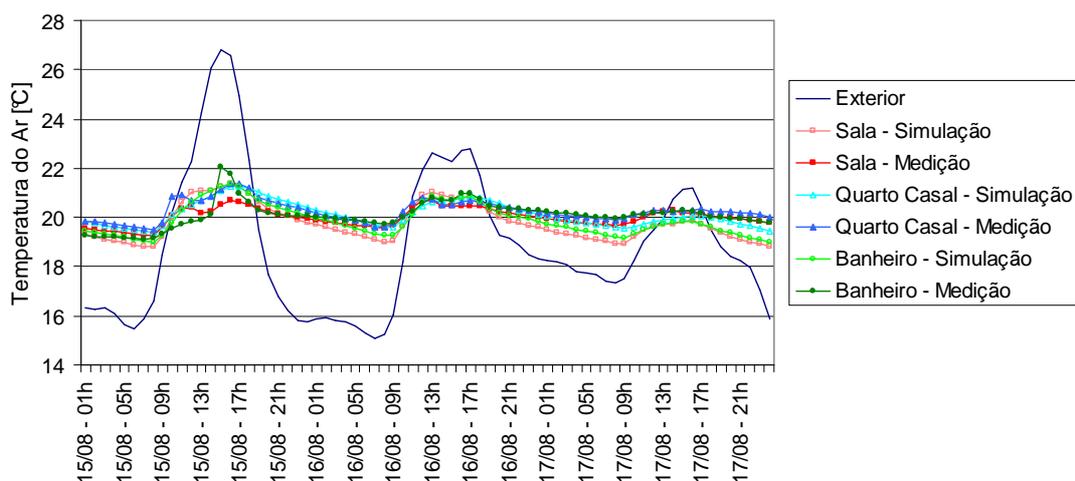


Figura C.6 – Comparação entre simulação 7 (alteração na absortância) e medição em agosto/2007.

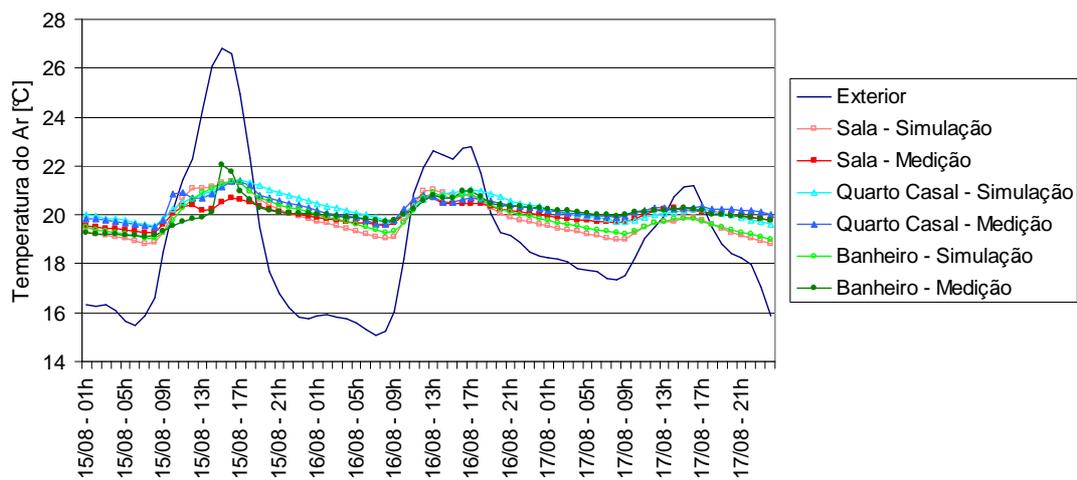


Figura C.7 – Comparação entre simulação 8 (alteração no ganho de calor por equipamentos) e medição em agosto/2007.

APÊNDICE D – Gráficos da Calibração: Mês de Janeiro

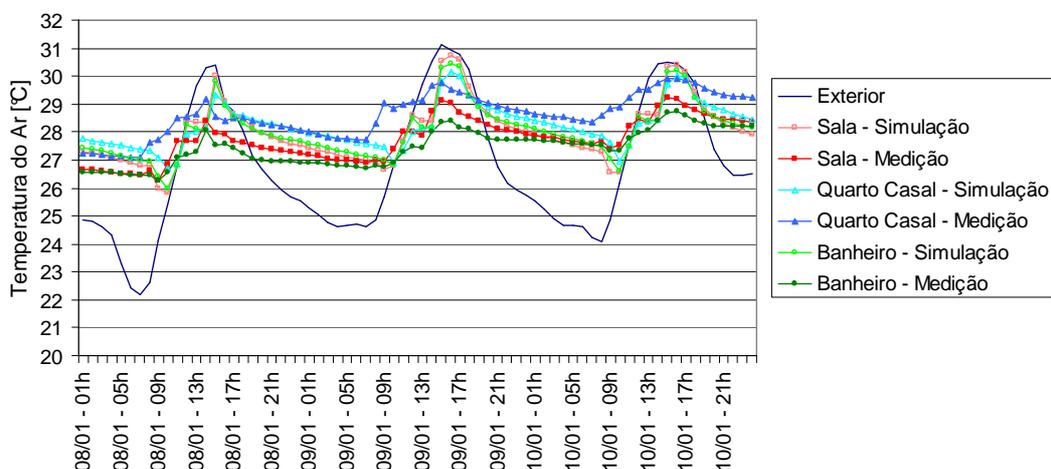


Figura D.1 – Comparação entre simulação 10 (coeficiente de descarga = 0,7) e medição em janeiro/2008.

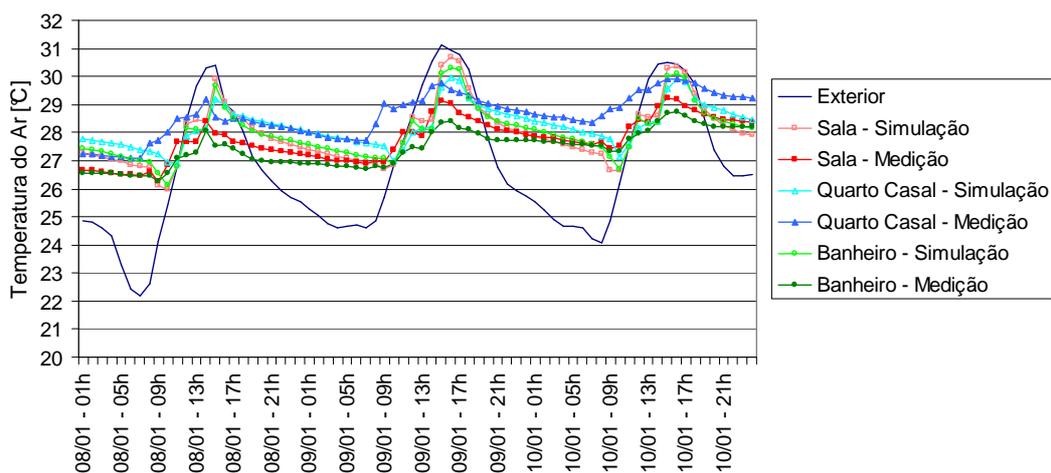


Figura D.2 – Comparação entre simulação 11 (coeficiente de descarga = 0,5) e medição em janeiro/2008.

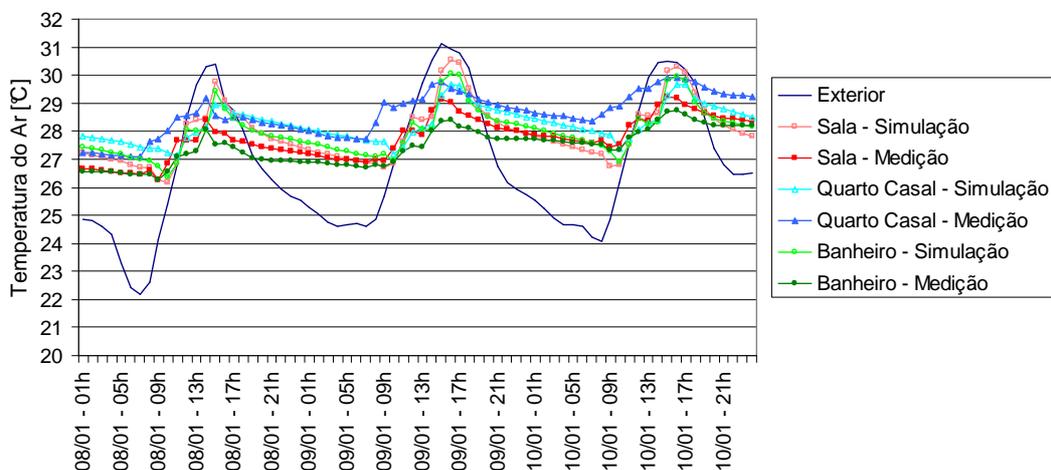


Figura D.3 – Comparação entre simulação 12 (coeficiente de descarga = 0,3) e medição em janeiro/2008.

APÊNDICE E – Gráficos da Calibração: Mês de Setembro

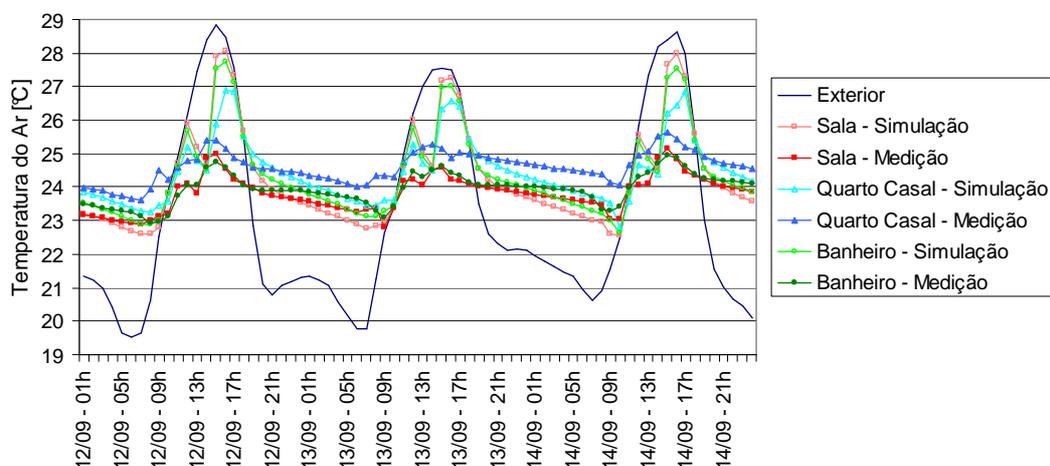


Figura E.1 – Comparação entre simulação 9 (alteração na infiltração de ar) e medição em setembro/2007.

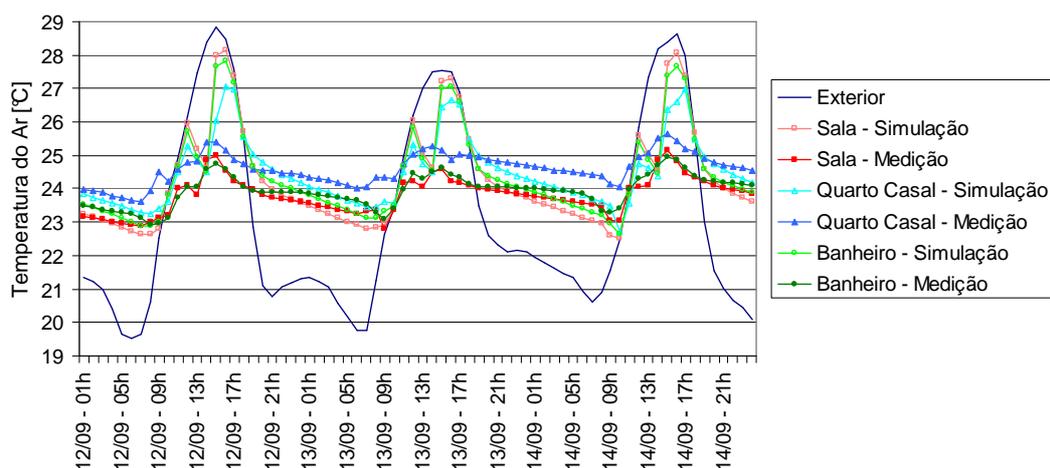


Figura E.2 – Comparação entre simulação 10 (coeficiente de descarga = 0,7) e medição em setembro/2007.

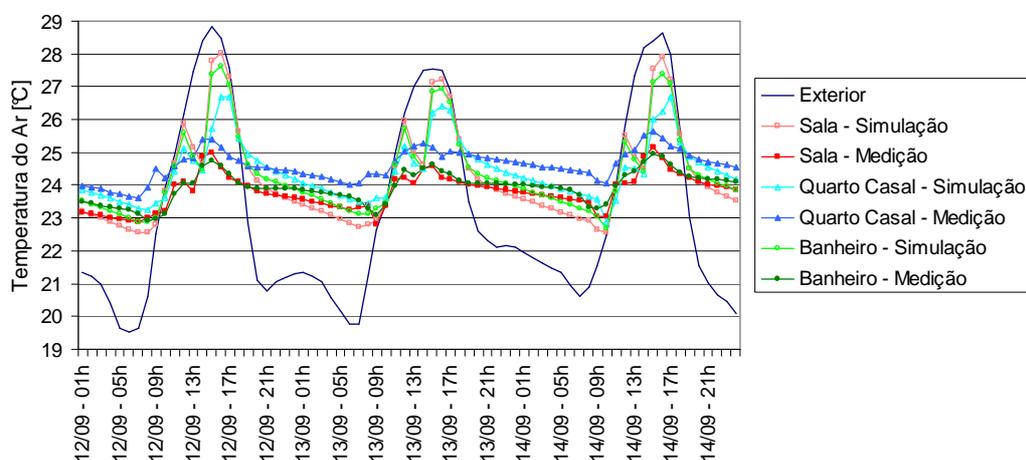


Figura E.3 – Comparação entre simulação 11 (coeficiente de descarga = 0,5) e medição em setembro/2007.

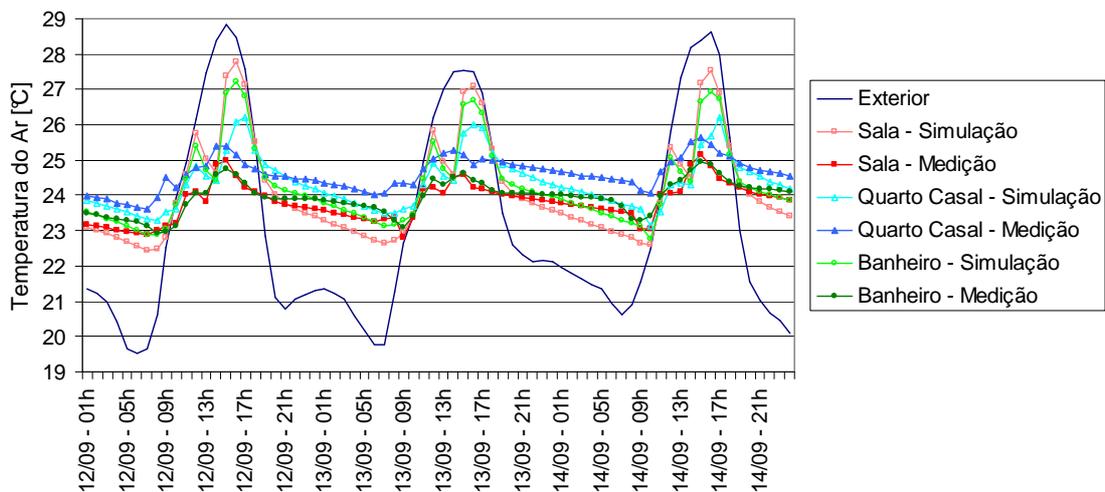


Figura E.4 – Comparação entre simulação 12 (coeficiente de descarga = 0,3) e medição em setembro/2007.

APÊNDICE F – Resultados de Desempenho Térmico da Sala

Tabela F.1 – Porcentagem de horas de conforto e desconforto anuais na sala.

Modelo	Sem Ventilação e Ocupação				Com Ventilação e Ocupação			
	Horas de conforto [%]	Horas de desconforto [%]			Horas de conforto [%]	Horas de desconforto [%]		
		Total	Frio	Calor		Total	Frio	Calor
Modelo Referência	49,6	50,4	22,8	27,6	34,4	65,6	26,5	39,1
Varição Cobertura 1	47,5	52,5	24,6	27,9	31,1	68,9	30,1	38,8
Varição Cobertura 2	52,8	47,2	21,8	25,4	38,9	61,1	23,1	38
Varição Cobertura 3	50,9	49,1	21,9	27,2	36,5	63,5	24,9	38,6
Varição Cobertura 4	53,6	46,4	21,4	25	39,1	60,9	22,8	38,1
Varição Cobertura 5	51,3	48,7	21,8	26,9	36,8	63,2	24,6	38,6
Varição Parede 1	47,8	52,2	24,1	28,1	32,1	67,9	29	38,9
Varição Parede 2	50,9	49,1	22,3	26,8	35,2	64,8	26	38,8
Varição Parede 3	51,6	48,4	22,2	26,2	37,4	62,6	24,4	38,2
Varição Parede 4	43,6	56,4	25,8	30,6	31,9	68,1	29,6	38,5
Varição Parede 5	54,1	45,9	21,7	24,2	39,4	60,6	23,1	37,5
Varição Parede 6	57,4	42,6	20,1	22,5	41,2	58,8	21,7	37,1
Varição Parede 7	45,4	54,6	23,8	30,8	35,1	64,9	26,4	38,5

Tabela F.2 – Porcentagem de horas de conforto e desconforto da sala no **Modelo de Referência**, para ano inteiro, verão e inverno.

Período	Simulação	Horas de conforto [%]	Horas de desconforto [%]		
			Total	Frio	Calor
Ano inteiro	Sem Ventilação e Ocupação	49,6	50,4	22,8	27,6
	Com Ventilação e Ocupação	34,4	65,6	26,5	39,1
Verão	Sem Ventilação e Ocupação	44,6	55,4	1,4	54,0
	Com Ventilação e Ocupação	37,1	62,9	1,7	61,2
Inverno	Sem Ventilação e Ocupação	54,5	45,5	43,8	1,7
	Com Ventilação e Ocupação	31,7	68,3	50,9	17,4

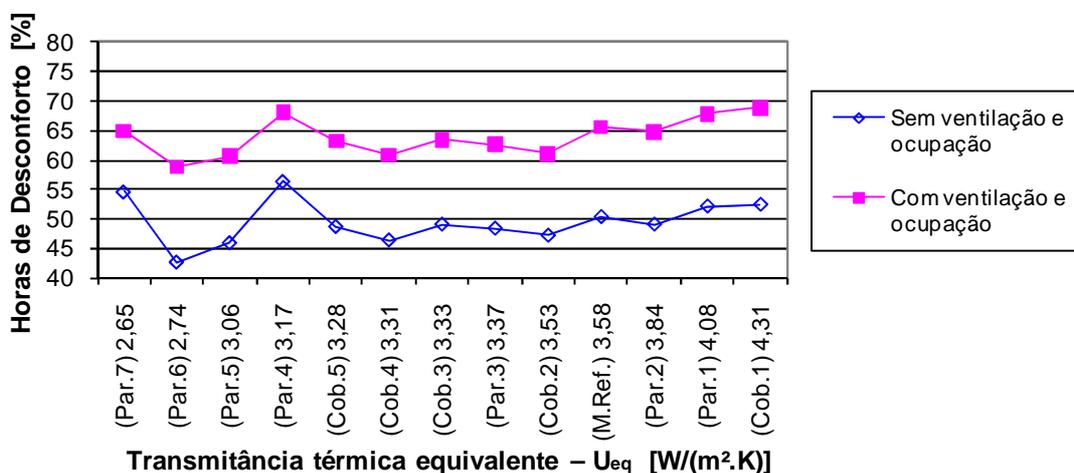


Figura F.1 – Porcentagens de horas de desconforto anuais na sala relacionadas à transmitância térmica equivalente.

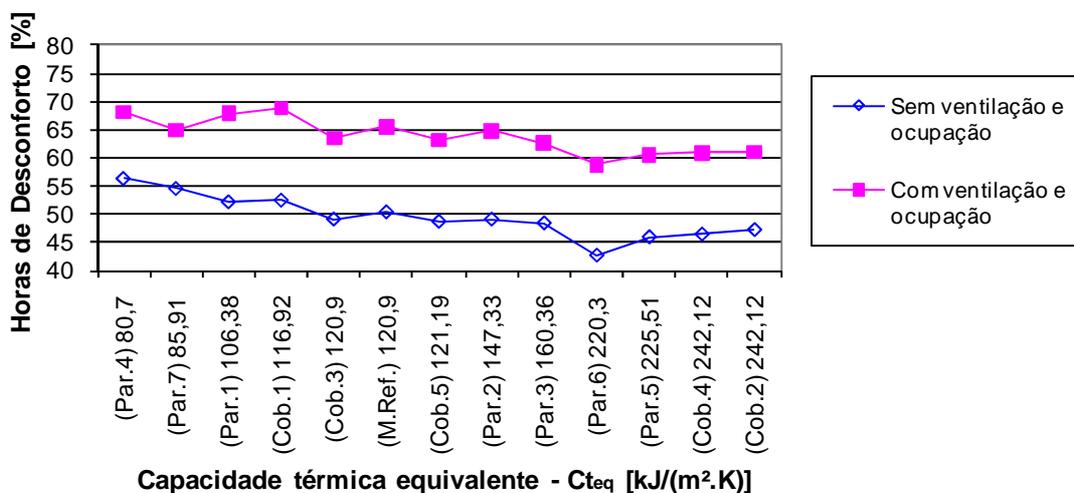


Figura F.2 – Porcentagens de horas de desconforto anuais na sala relacionadas à capacidade térmica equivalente.

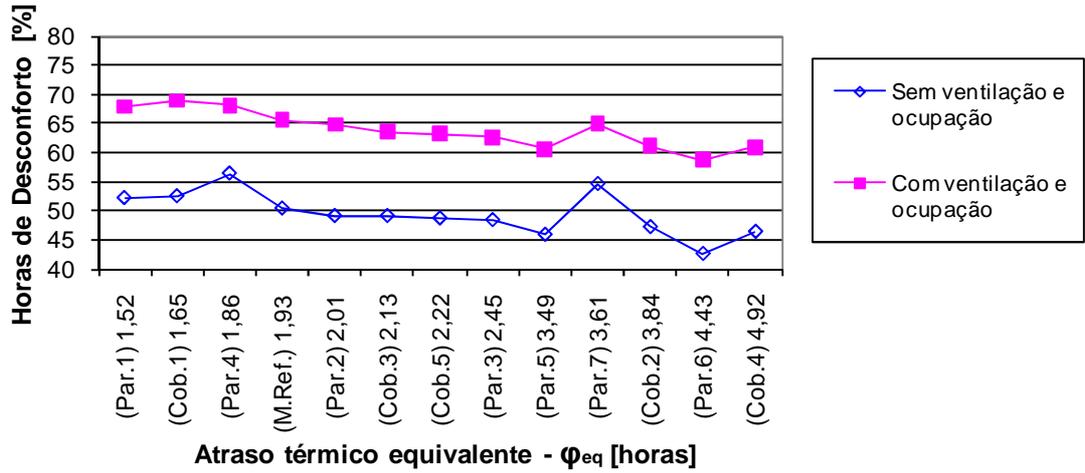


Figura F.3 – Porcentagens de horas de desconforto anuais na sala relacionadas ao atraso térmico equivalente.

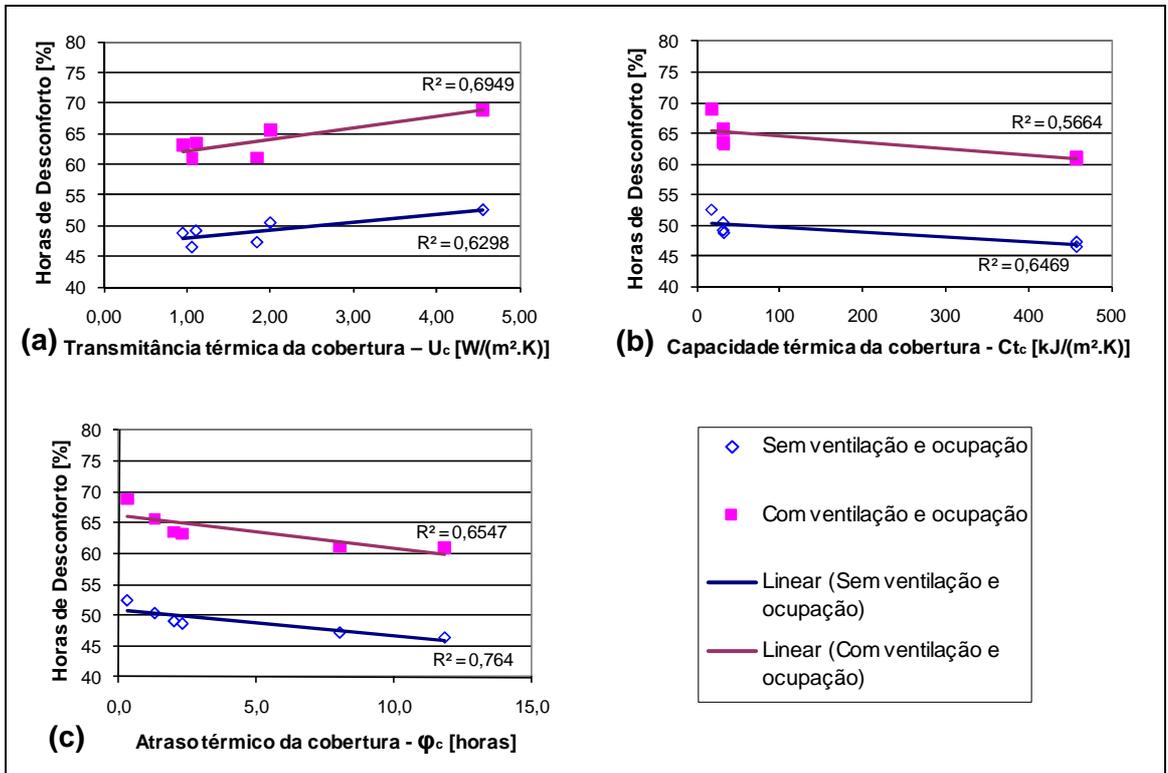


Figura F.4 – Correlação entre a porcentagem de horas de desconforto e as propriedades térmicas da cobertura da sala: transmitância térmica (a), capacidade térmica (b), e atraso térmico (c).

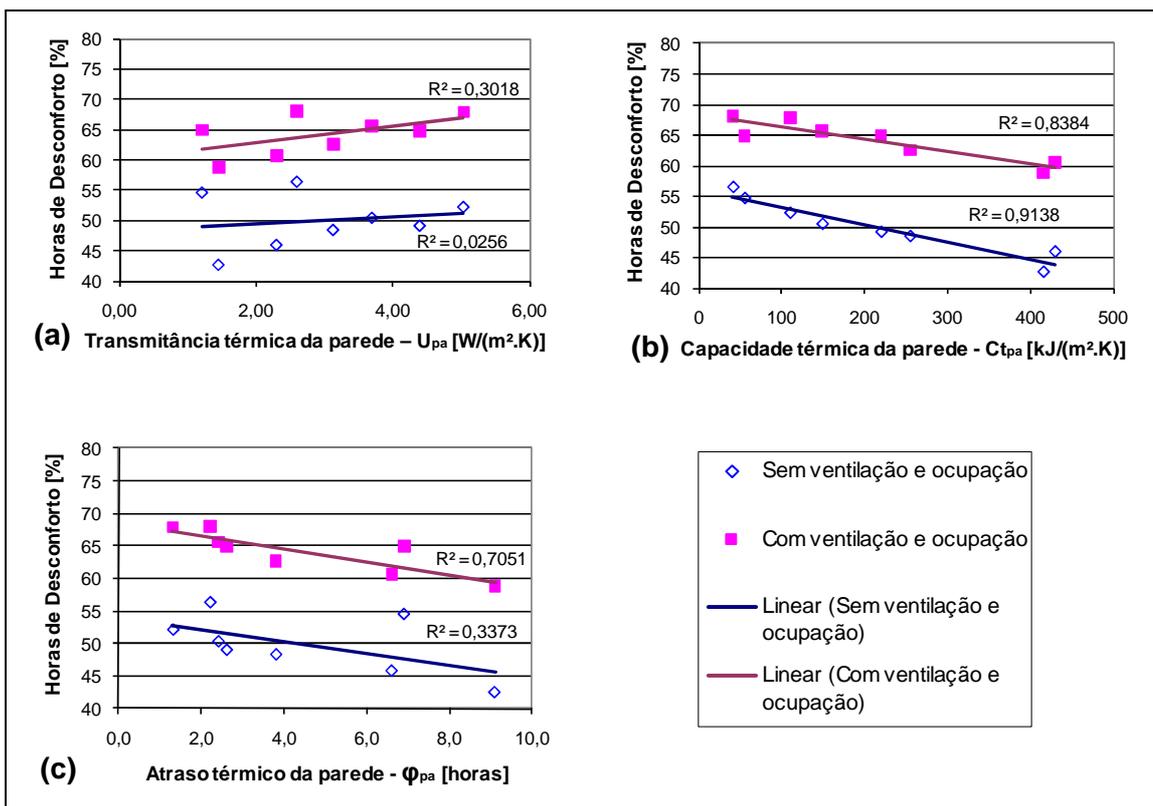


Figura F.5 – Correlação entre a porcentagem de horas de desconforto e as **propriedades térmicas da parede** da sala: transmitância térmica (a), capacidade térmica (b), e atraso térmico (c).

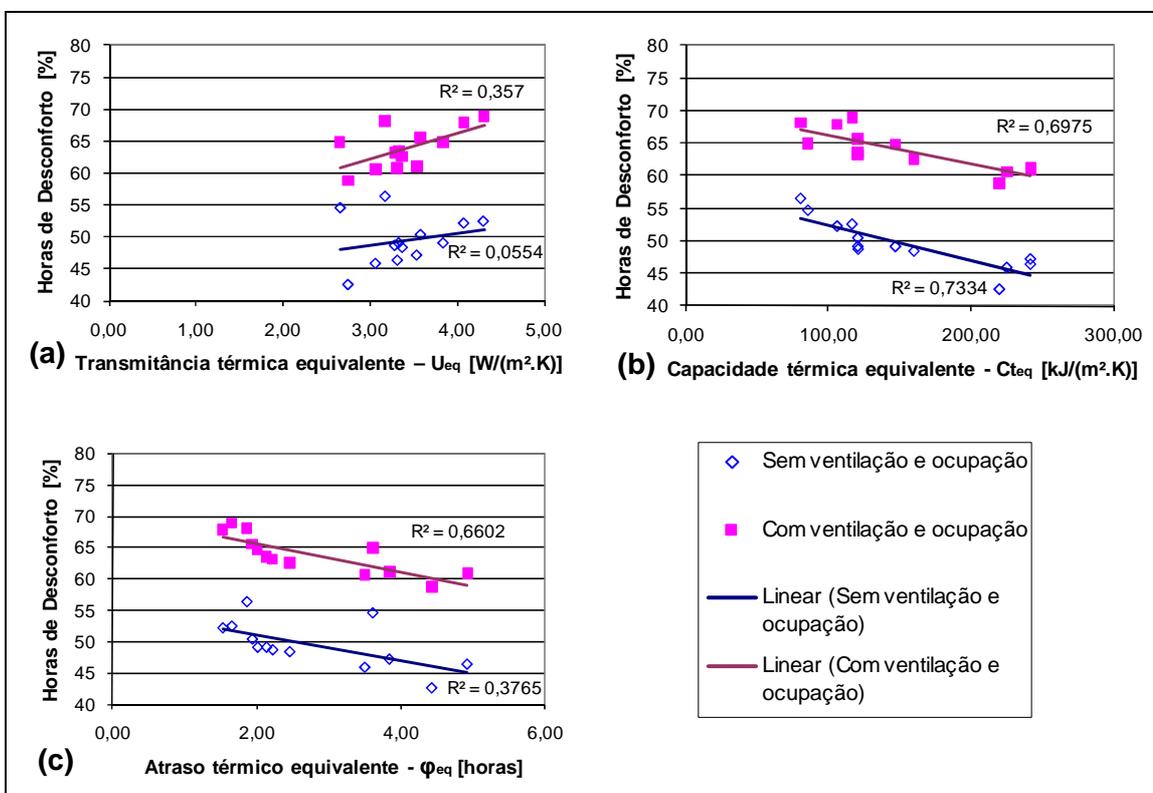


Figura F.6 – Correlação entre a porcentagem de horas de desconforto e as **propriedades térmicas equivalentes** da sala: transmitância térmica (a), capacidade térmica (b), e atraso térmico (c).

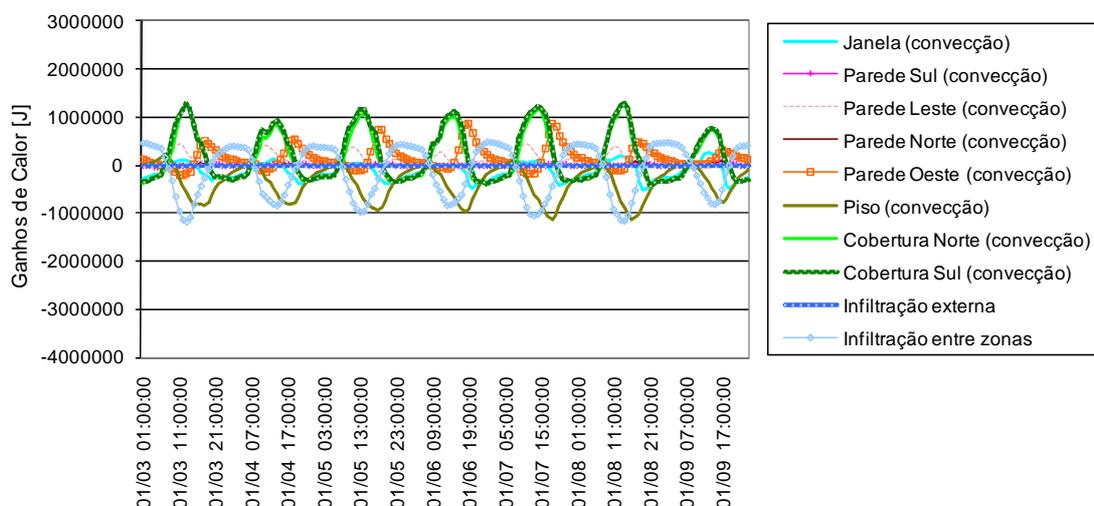


Figura F.7 – Trocas de calor da sala – Modelo Referência sem ventilação e ocupação, nos dias 3 a 9 de janeiro.

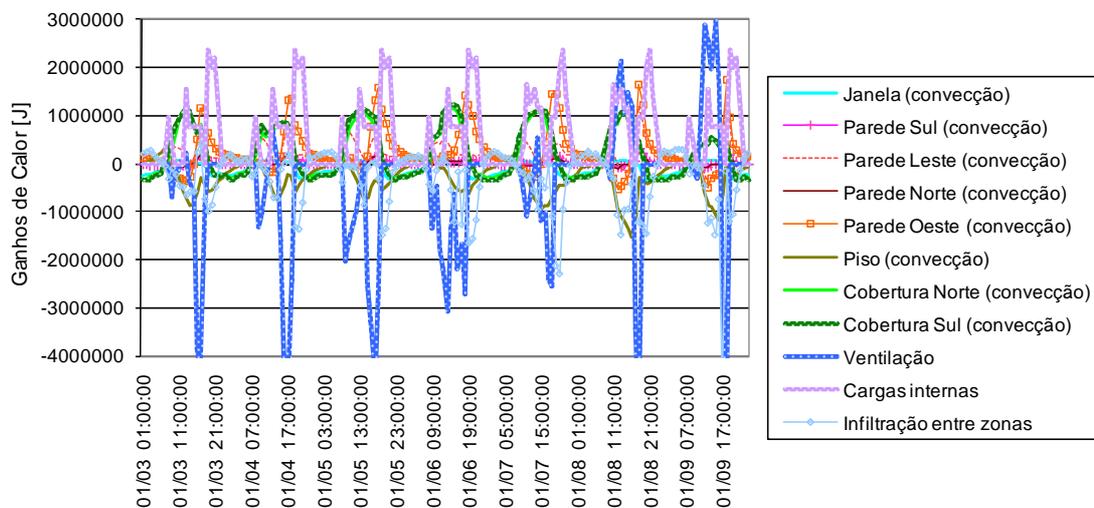


Figura F.8 – Trocas de calor da sala – Modelo Referência com ventilação e ocupação, nos dias 3 a 9 de janeiro.

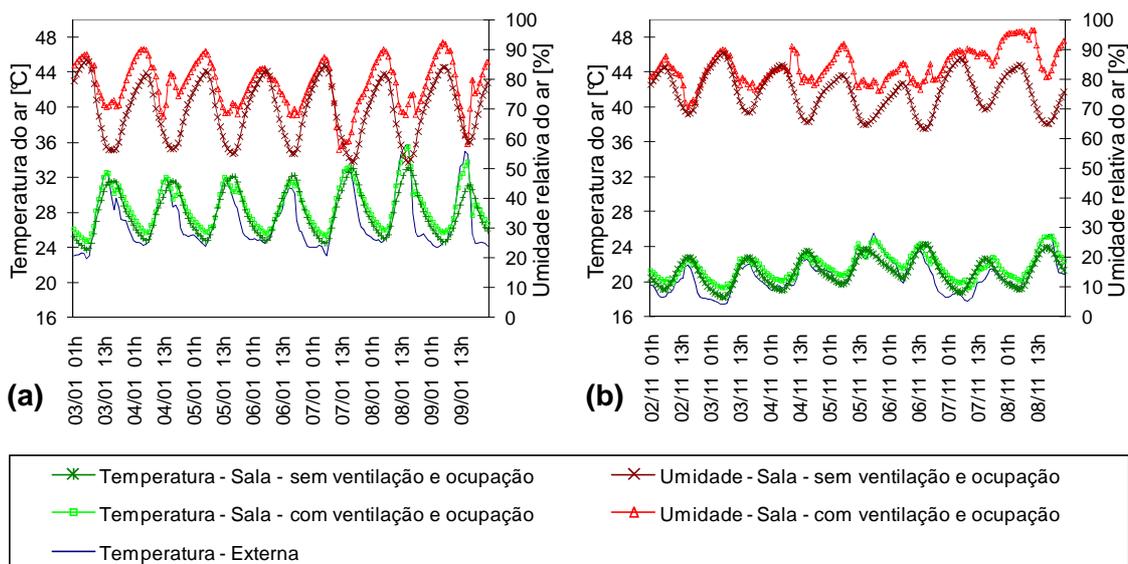


Figura F.9 – Temperatura e umidade relativa do ar no exterior e na sala – **Modelo Referência**: dias 03 a 09 de janeiro (a), e dias 02 a 08 de novembro (b).

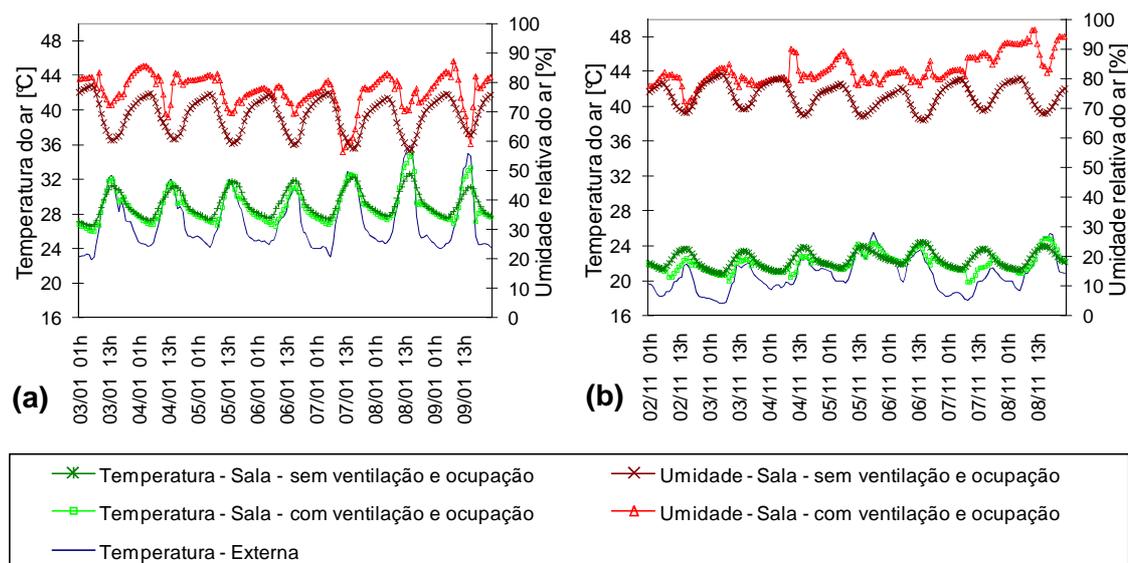


Figura F.10 – Temperatura e umidade relativa do ar no exterior e na sala – **Variação Parede 6**: dias 03 a 09 de janeiro (a), e dias 02 a 08 de novembro (b).