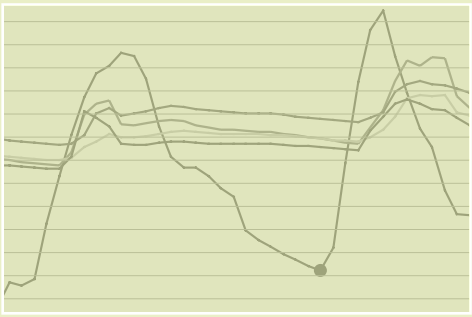
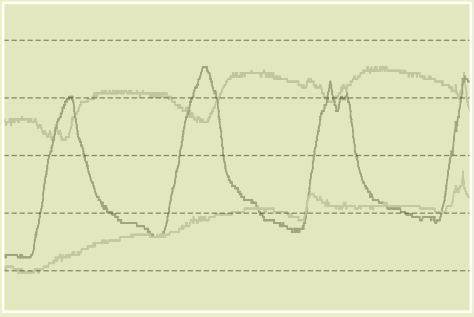
volume 1

Casa Eficiente

Bioclimatologia e Desempenho Térmico





LabEEE

PROCEL EDIFICA
EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES

Eletrobras
Eletrosul

Casa Eficiente:
Bioclimatologia e Desempenho Térmico

Editores:

Roberto Lamberts

Enedir Ghisi

Cláudia Donald Pereira

Juliana Oliveira Batista

FLORIANÓPOLIS

UFSC

2010

LABEEE – LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES

Coordenador
Prof. Dr. Roberto Lamberts

Pesquisadores da Casa Eficiente
Ana Kelly Marinoski
Carlos Eduardo Gonçalves
Christhina Maria Cândido
Cláudia Donald Pereira
Juliana Oliveira Batista
Marcio Andrade
Rosana Debiasi
Sergio Parizotto Filho
Vinicius Luis Rocha

ELETROBRAS

Presidente
José Antônio Muniz Lopes

Diretor de Tecnologia
Ubirajara Rocha Meira

PROCEL - PROGRAMA NACIONAL DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Departamento de Projetos de Eficiência Energética
Fernando Pinto Dias Perrone

Divisão de Eficiência Energética em Edificações
Solange Nogueira Puente Santos

Equipe Técnica
Anselmo Machado Borba
Estefânia Neiva de Mello
Frederico Guilherme Cardoso Souto Maior de Castro
José Luiz Grünewald Miglievich Leduc
Maria Tereza Marques da Silveira
Patrícia Zofoli Dorna
Rebeca Obadia Pontes
Rodrigo da Costa Casella
Viviane Gomes Almeida

ELETROBRAS ELETROSUL

Equipe Técnica
Ediu Campos
Jorge Luis Alves
Henrique Brognoli Martins
Aniceto Carlos Kroker Pelka
Ruy de Castro Sobrosa Neto
Fernando Luiz Bovaroli Machado
Rafael Rabassa Morales
Marcos Aurélio de Jesus
Hugo Rohden Becker
Cassemiro Massaneiro da Rosa

IMAGENS
Anisio Elias Borges (repórter fotográfico)

PROJETO GRÁFICO E DIAGRAMAÇÃO
Virtual Publicidade Ltda | Curitiba-PR

C334 Casa eficiente : Bioclimatologia e desempenho térmico / editores: Roberto Lamberts... [et al.]. – Florianópolis : UFSC/LabEEE; 2010.
v. 1 (123 p.) : il. ; graf. ; tabs.

Inclui bibliografia
ISBN: 978-85-7426-098-3

1. Desempenho térmico – Residências – Avaliação. 2. Habitações – Ventilação. 3. Bioclimatologia. 4. Telhado vegetado. I. Lamberts, Roberto. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Laboratório de Eficiência Energética em Edificações.

CDU: 72:697

Catalogação na publicação por: Onélia Silva Guimarães CRB-14/071

Casa Eficiente

A Universidade Federal de Santa Catarina possui longa tradição de ensino, pesquisa e extensão na área de uso racional de energia, envolvendo vários dos seus departamentos dentre os quais destacam-se a Engenharia Civil, Elétrica, Mecânica, e Arquitetura.

A Casa Eficiente é resultado de uma parceria entre a Universidade Federal de Santa Catarina, a ELETROSUL e a ELETROBRAS para a construção de um centro de demonstrações em eficiência energética.

Durante a metade de cada mês, por um período de dois anos, a Casa funcionou como laboratório possibilitando diversas pesquisas de doutorado, mestrado e iniciação científica. Na outra metade do mês a Casa funcionou como um centro de visitação, expondo ao público, em geral, novas referências em termos de uso eficiente e racional de energia.

Na Casa foram testadas diversas tecnologias ligadas ao aproveitamento da energia solar, adaptações ao clima local, uso eficiente de energia, coleta de água da chuva e sustentabilidade ambiental.

Nestes livros são apresentados os resultados de dois anos de pesquisa. Muitas outras publicações já foram realizadas em congressos e periódicos científicos e outras ainda estão por vir, frutos dos dados levantados pelo projeto e muitos dos quais integram teses e dissertações em andamento.

A Universidade Federal de Santa Catarina acredita que projetos como o da Casa Eficiente representam uma boa maneira de transmitir os conhecimentos gerados pela Universidade para a comunidade. Como instituição que se preocupa tanto em avançar a fronteira do conhecimento como também em disseminar o saber para a sociedade, participar do projeto da Casa Eficiente é altamente gratificante e recompensador.

Prof. Alvaro Toubes Prata
Reitor
Universidade Federal de Santa Catarina

Sociedade eficiente e sustentável

Atuar nos mercados de energia de forma integrada, rentável e sustentável é a missão da Eletrobras, que norteia nossa visão de futuro, indicando nosso objetivo de ser, até 2020, o maior sistema empresarial global de energia limpa, com rentabilidade comparável às das melhores empresas do setor elétrico. Temos a convicção de que essa atuação rentável e sustentável passa pela questão da eficiência energética. Dessa maneira, a Eletrobras investe em pesquisa e desenvolvimento, já tendo inaugurado, inclusive, dois Centros de Eficiência Energética, ambos por meio do Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (Procel): um no Pará, em parceria com a Universidade Federal do Pará (UFPA), e outro em Minas Gerais, com a Universidade Federal de Itajubá.

Outro investimento feito na área é a parceria entre a Universidade Federal de Santa Catarina, a Eletrobras Eletrosul e a Eletrobras, que possibilitou a construção da Casa Eficiente, um centro de demonstrações em eficiência energética, localizado na sede da Eletrobras Eletrosul. Na casa, são testadas modernas técnicas de uso da energia solar para aquecimento, uso eficiente da água e da energia elétrica. Essa iniciativa, que está dentro das ações do Procel Edifica, mostra que a preocupação da Eletrobras com o uso correto e eficiente da energia, bem como com a sustentabilidade, é uma prática empresarial constante, e não apenas discurso.

A Eletrobras acredita que energia mais barata é a utilizada com eficiência e que as boas práticas de eficiência energética devem ser disseminadas na sociedade, a fim de que todas as pessoas saibam valorizar o uso racional da energia elétrica e tragam o conceito de sustentabilidade para suas vidas cotidianas. A Casa Eficiente cumpre essa função pedagógica, indicando o futuro que a nação brasileira deverá trilhar. Um futuro que conjugue desenvolvimento com respeito ao meio ambiente. Igual à atuação da Eletrobras no Brasil e no mundo.

José Antônio Muniz Lopes
Presidente da Eletrobras

A Eficiência e o Futuro

Alinhada à missão da Eletrobras, a Eletrosul, como empresa do Sistema Eletrobras, busca permanentemente fontes renováveis de geração de energia por meio da pesquisa e desenvolvimento e realiza investimentos dentre aquelas fontes já estudadas pelo seu quadro técnico. Podemos citar entre outras, as pesquisas em geração de energia a partir do hidrogênio, do gás metano, das ondas, assim como a geração fotovoltaica e o investimento na energia eólica.

Investir em fontes renováveis não quer dizer esquecer a conservação de energia, pois, é por meio da eficiência energética que evitamos a necessidade de geração no curto prazo. Ao sermos eficientes em relação ao consumo de energia, estamos contribuindo para o desenvolvimento sustentável do país.

Com o intuito de desenvolver ações concretas no sentido de sermos eficientes no consumo de energia elétrica, ao consumo racional da água e a utilização das condicionantes bioclimáticos, a Eletrosul, em parceria com a Universidade Federal de Santa Catarina e a Eletrobras, construiu no pátio de sua Sede, a Casa Eficiente, com o objetivo de servir como laboratório para edificações eficientes e contribuir para a divulgação dos conceitos nela aplicados.

A Casa Eficiente, para a Eletrosul, reflete o compromisso da empresa em desenvolver soluções que tornem os processos produtivos mais eficientes e ambientalmente sustentáveis, deixando sua contribuição como empresa pública, imprescindível para a sociedade, atuando como agente motriz do desenvolvimento do país, certos de que o caminho a ser trilhado para futuro passa pela disseminação destes conceitos.

Eurides Luiz Mescolotto
Presidente da Eletrobras Eletrosul

Sumário

PREFÁCIO 9

RESUMO EXECUTIVO 15

1. INTRODUÇÃO 17

2. CLASSIFICAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO DA CASA EFICIENTE: AVALIAÇÃO SEGUNDO AS NORMAS BRASILEIRAS 19

2.1. Como se avalia o desempenho térmico de uma edificação residencial? 19

2.2. A Casa Eficiente e as normas brasileiras 21

2.2.1. A NBR 15220: Desempenho Térmico de Edificações 21

2.2.2. A NBR 15575: Edificações habitacionais de até cinco pavimentos – Desempenho 29

3. DESEMPENHO DAS ESTRATÉGIAS BIOCLIMÁTICAS DE PROJETO: INÉRCIA TÉRMICA E VENTILAÇÃO NATURAL 37

3.1. Introdução 37

3.2. Compreendendo o efeito da inércia térmica no verão 39

3.2.1. Não ventilar no verão? 39

3.2.2. Ventilar no verão? 42

3.3. A ventilação natural como estratégia bioclimática 47

3.4. Compreendendo a inércia térmica no inverno: aquecimento solar passivo 55

4. VENTILAÇÃO MECÂNICA NOTURNA 59

4.1. Descrição técnica dos insufladores e condições de utilização da ventilação mecânica 60

4.2. Velocidade e distribuição dos fluxos de ar 63

4.3. Efeito da ventilação mecânica noturna no desempenho térmico da Casa Eficiente 66

4.3.1. Parâmetros de análise 68

4.3.2. Caso Base: esquadrias fechadas, sem ventilação mecânica 70

4.3.3. Experimento 1: esquadrias fechadas, com ventilação mecânica 71

4.3.4. Experimento 2: ventilação diurna, com ventilação mecânica 73

4.3.5. Experimento 3: ventilação diurna, sem ventilação mecânica 84

4.4. Conclusões sobre a ventilação mecânica noturna 85

5. TELHADO VEGETADO 89

5.1. Apresentação 89

5.2. Contexto histórico e atual dos telhados vegetados 90

5.3. Tipologias e características físicas 92

5.4. Função térmica e benefícios relacionados 94

5.5. Melhoria do desempenho térmico e economia de energia da edificação 95

5.6. Redução do efeito urbano de ilha de calor 95

5.7. Comportamento térmico do telhado vegetado da Casa Eficiente 96

5.7.1. Descrição física do telhado vegetado e demais coberturas da Casa 96

5.7.2. Instrumentação – variáveis ambientais internas e externas 98

5.7.3. Períodos das análises microclimáticas internas e externas 99

5.7.4. Experimentos adicionais com termografia de infravermelho 99

5.7.5. Desempenho térmico no verão 99

5.7.6. Desempenho térmico no inverno 103

5.7.7. Comparações de diferentes coberturas: telhado vegetado, telhado cerâmico e telhado metálico 106

5.8. Balanços térmicos das estações climáticas 114

5.8.1. Inverno – julho a setembro de 2007 114

5.8.2. Primavera – outubro a dezembro de 2007 116

5.8.3. Verão – janeiro a março de 2008 118

5.8.4. Outono – abril a junho de 2008 120

5.9. Considerações a respeito do telhado vegetado 121

6. CONCLUSÕES 123

REFERÊNCIAS 124

Prefácio

A Casa Eficiente (Figuras 1 a 4), localizada em Florianópolis, SC, é resultado da parceria estabelecida entre a ELETROSUL, ELETROBRAS/PROCEL Edifica e a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), através do Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LabEEE).

FIGURA 1 – Vista Sudoeste da Casa.

Em setembro de 2002, técnicos da ELETROSUL e da ELETROBRAS iniciaram a avaliação de alternativas de investimento em projetos de eficiência energética na construção civil, uma vez que mais da metade do consumo da Energia Elétrica no Brasil se dá nas edificações (BRASIL, 2007), justificando-se a necessidade de investimentos neste setor.

FIGURA 2 – Vista Sudeste da Casa.

Com a criação do Procel Edifica pela ELETROBRAS/PROCEL em 2003, criou-se uma oportunidade para a atuação conjunta de setores como universidades, centros de pesquisa e entidades das áreas governamental, tecnológica, econômica e de desenvolvimento, em benefício da promoção do uso racional da energia elétrica em edificações.

Paralelamente, as negociações entre a ELETROSUL, ELETROBRAS/PROCEL e a UFSC evoluiram, até que, em maio de 2004, foi assinado um convênio de cooperação técnica para a construção da Casa Eficiente, incluindo também ações de *marketing* e divulgação, destacando-se a criação do site www.eletrosul.gov.br/casaeficiente.

O projeto arquitetônico da Casa Eficiente (Figuras 5 a 8) foi concebido pelas arquitetas Alexandra Maciel e Suely Andrade como uma vitrine de tecnologias de ponta, contando com a colaboração de pesquisadores do LabEEE, da Universidade Federal de Santa Catarina. A Casa Eficiente reúne diversas estratégias de adequação climática, com o aproveitamento da ventilação e da luz natural, adotadas como alternativas ao uso da refrigeração e iluminação artificiais. Conta ainda com aproveitamento da energia solar térmica para aquecimento de água e da energia solar luminosa para a geração de eletricidade através de um painel fotovoltaico interligado à rede.

Visando a redução do impacto ambiental e o uso eficiente da água, a Casa Eficiente utiliza água da chuva para fins não potáveis (máquina de lavar roupas, vaso sanitário, tanque e torneira externa). Além disso, ela possui um sistema de reúso de águas, no qual os efluentes recebem tratamento biológico por zona de raízes, as águas negras tratadas são encaminhas para a rede coletora e as águas cinzas tratadas são armazenadas para uso na irrigação do jardim da Casa.

FIGURA 3 – Vista Nordeste da Casa.

FIGURA 4 – Vista Noroeste da Casa.

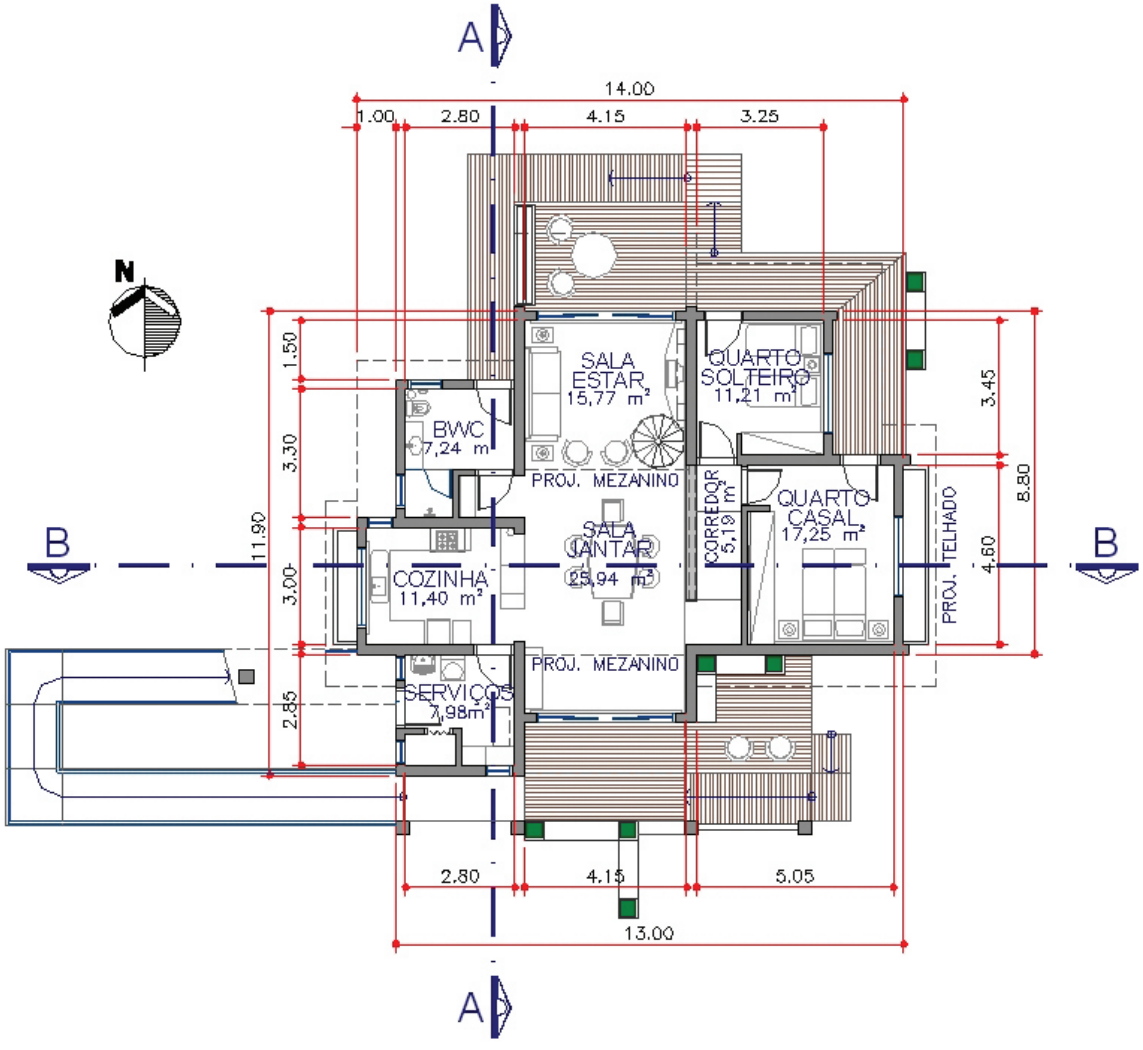


FIGURA 5 – Planta baixa da Casa Eficiente – pavimento térreo.

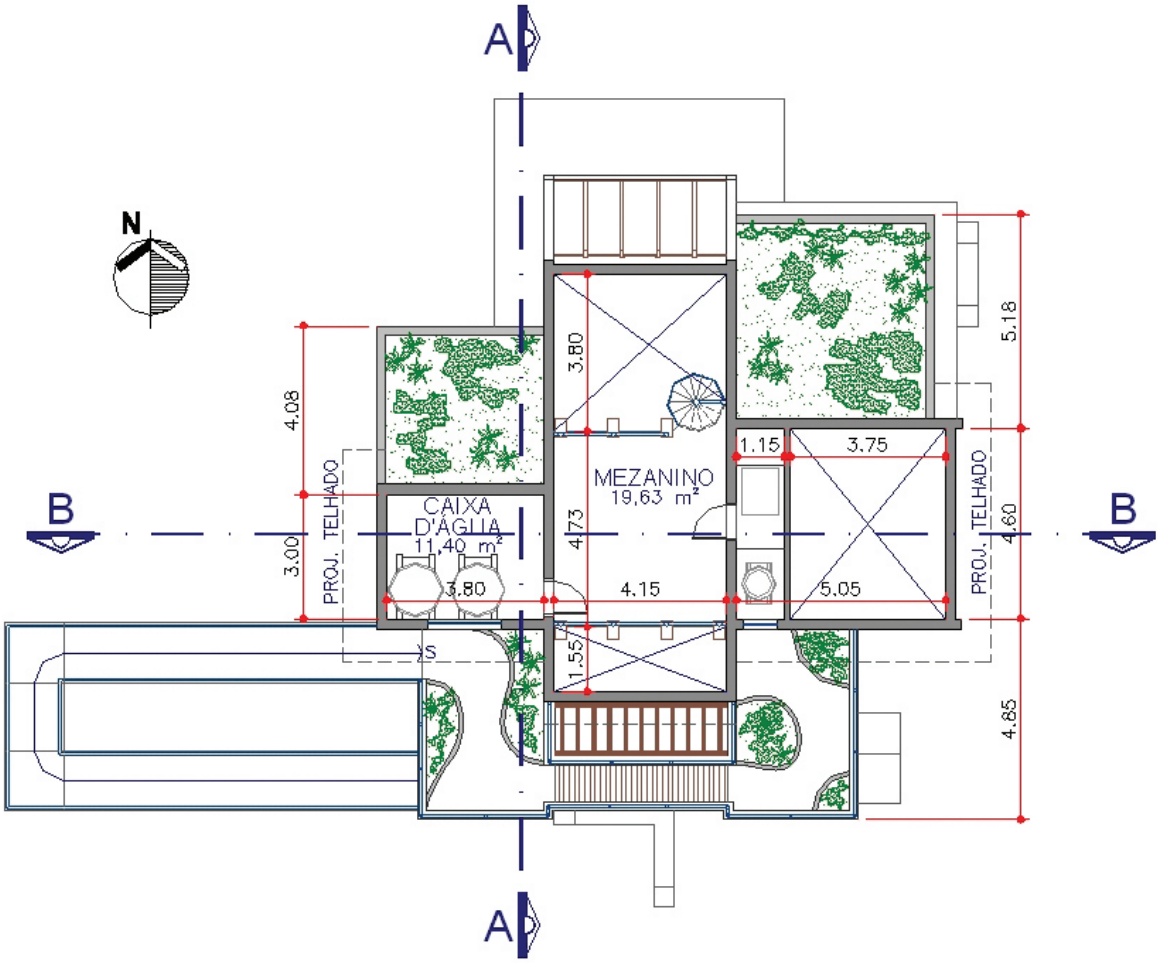


FIGURA 6 – Planta baixa da Casa Eficiente – mezanino.

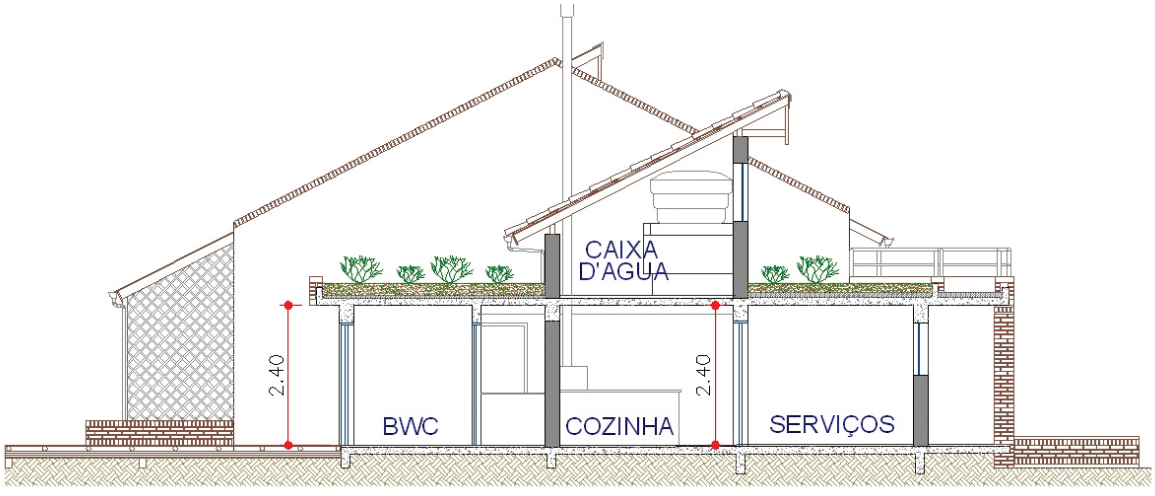


FIGURA 7 – Corte AA.

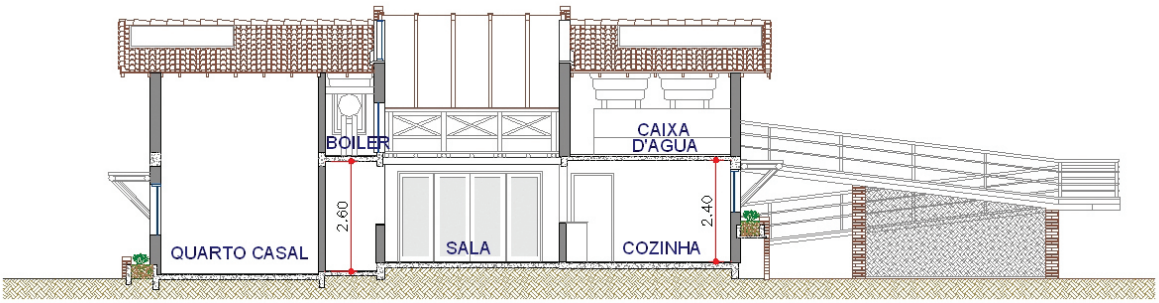


FIGURA 8 – Corte BB.

A concepção do projeto das instalações prediais da Casa Eficiente contemplou, além dos objetivos de sustentabilidade (eficiência energética e uso racional da água), a necessidade de flexibilidade de operação, de manutenção e de seu funcionamento como um laboratório de pesquisa. Contemplou ainda, a necessidade de proporcionar, de maneira didática, a visitação para divulgação dos conceitos adotados, ou seja, além de ser um laboratório é também uma vitrine tecnológica.

Em 29 de março de 2006 a Casa Eficiente foi inaugurada e aberta à visitação, constituindo-se em um espaço destinado à sensibilização pública, objetivando demonstrar como as soluções de projeto podem favorecer o uso eficiente da energia elétrica e da água nas edificações residenciais, reduzindo desperdícios e impactos sobre o meio ambiente.

Considerando-se a Casa Eficiente como um instrumento com potencial para a promoção do desenvolvimento científico e tecnológico, em junho de 2006, foi assinado outro convênio, criando-se o LMBEE – Laboratório de Monitoramento Bioclimático e Eficiência Energética. Para tal, a Casa Eficiente foi equipada com um amplo sistema de monitoramento termo-energético, desenvolvido pelo Laboratório de Meios Porosos e Propriedades Termofísicas (LMPT/UFSC), além de uma estação meteorológica própria.

O LMBEE, formado por uma equipe de pesquisadores da UFSC, desenvolveu experimentos quinzenais na Casa Eficiente nos anos de 2007 e 2008. Nesses dois anos, a Casa foi submetida a um revezamento quinzenal entre as atividades de pesquisa (experimentos controlados) e de visitação pública. Estes experimentos destinaram-se a verificar o desempenho termo-energético da edificação e a eficácia das estratégias de uso racional da água incorporadas ao projeto. Os experimentos foram conduzidos por três grupos de trabalho (GTs): GT-1, Eficácia das estratégias de condicionamento ambiental; GT-2, Potencial de geração solar fotovoltaica interligada à rede elétrica de distribuição e GT-3, Uso racional da água.

Após dois anos e meio de atividades do LMBEE, a ELETROSUL, a ELETROBRAS/PROCEL Edifica e o LabEEE/UFSC apresentam ao público os resultados das pesquisas desenvolvidas na Casa Eficiente, reunidos em quatro publicações técnicas, abordando as seguintes temáticas:

- 1. Bioclimatologia e Desempenho Térmico.
- 2. Consumo e Geração de Energia.
- 3. Uso Racional da Água.
- 4. Simulação Computacional do Desempenho Termo-Energético.

As publicações 1, 2 e 3 foram elaboradas com base no monitoramento das diferentes estratégias e tecnologias empregadas na Casa Eficiente. Já a publicação 4 apresenta os resultados das simulações computacionais realizadas, tanto na fase de projeto quanto após a construção da Casa, possibilitando análises detalhadas do desempenho termo-energético da Casa Eficiente.

É objetivo de todos os parceiros envolvidos neste empreendimento divulgar as lições aprendidas com os trabalhos realizados na Casa Eficiente, a fim de que este projeto cumpra de modo efetivo seu papel de instrumento disseminador de conceitos e boas práticas no setor da construção civil.

Resumo executivo

O presente volume aborda o tema Desempenho Térmico da Casa Eficiente a partir dos resultados do monitoramento desenvolvido pelo LMBEE, aprofundando a investigação acerca do desempenho de estratégias bioclimáticas recomendáveis para o clima de Florianópolis: a ventilação mecânica noturna e o uso de telhado vegetado.

Os desafios de sustentabilidade firmam-se cada vez mais como necessidades urbanas no decorrer da evolução do pensamento técnico-científico. As modificações na biosfera, a exemplo de fenômenos como as ilhas de calor urbano e de aumento da concentração dos gases do efeito estufa despertam a necessidade de se repensar imediatamente o ambiente urbano e as suas edificações.

Avaliar o desempenho térmico de uma edificação significa avaliar a sua resposta física à influência do meio ambiente externo e do seu uso pelos ocupantes, confrontando os resultados com requisitos quantitativos e qualitativos pré-estabelecidos. A resposta da edificação às variáveis climáticas externas (ventilação, insolação, temperatura, umidade) e ao comportamento do usuário (manipulação das esquadrias, acionamento dos sistemas artificiais de iluminação e condicionamento) configura o seu comportamento térmico, expresso através da variação da temperatura e umidade nos ambientes internos. O comportamento térmico da edificação é influenciado, também, pelos ganhos de calor através das superfícies (teto, parede, piso, janelas) e gerado internamente (pessoas e equipamentos), bem como pelo número de renovações de ar propiciado pela ventilação.

Por outro lado, os ocupantes estão sujeitos à influência do comportamento térmico da edificação. Desse modo, adoção de princípios bioclimáticos na fase de projeto, ou seja, estratégias de projeto que buscam aproveitar os condicionantes naturais, principalmente o vento e a insolação, favorecem também o conforto dos usuários nos ambientes internos. Para realizar tais escolhas, é necessário conhecer quais as exigências de cada clima e as opções mais adequadas para adaptar a edificação às solicitações predominantes. Um importante instrumento que arquitetos e demais projetistas podem e devem utilizar como auxílio nas escolhas de projeto é o Zoneamento Bioclimático Brasileiro, apresentado na parte 3 da NBR 15220 (ABNT, 2005). Trata-se de um conjunto de recomendações de projeto bioclimático para diversas regiões do Brasil, abrangendo desde informações relativas às propriedades térmicas de paredes e coberturas quanto dimensões de aberturas para ventilação e necessidade de dispositivos de sombreamento.

Quanto à Casa Eficiente, o projeto arquitetônico foi inteiramente embasado na avaliação das condições climáticas de Florianópolis, visando atingir metas de desempenho térmico satisfatório e, por conseguinte, favorecer as condições de conforto nos ambientes internos. O estudo prévio das características climáticas determinou as soluções de projeto: escolha dos materiais construtivos, orientação das fachadas, disposição das aberturas para ventilação, desenho de protetores solares para sombreamento e definição de estratégias híbridas de condicionamento, a exemplo da ventilação mecânica noturna.

Ao longo do período de monitoramento, o sistema de aquisição de dados instalado na Casa Eficiente registrou, diariamente, valores de temperatura, umidade e fluxos de calor nos ambientes internos, os quais foram confrontados com registros das variáveis ambientais externas, possibilitando uma avaliação

do desempenho térmico da edificação. A infraestrutura disponível para o monitoramento inclui diversos sensores instalados nos ambientes internos, posicionados junto às paredes, coberturas e piso, além de sensores portáteis para registro de temperatura e umidade no centro dos ambientes. Também foram efetuadas medições de velocidade do ar, com auxílio de anemômetros portáteis, e registros termográficos, em que as temperaturas superficiais são identificadas a partir de cores graduadas em uma escala. Foram estabelecidas rotinas para a manipulação das esquadrias, a fim de verificar o impacto de cada padrão de uso no comportamento térmico dos ambientes. Desse modo, foi possível avaliar o desempenho térmico da edificação sob a influência de condições climáticas diferenciadas, fazendo uso da Casa Eficiente como um verdadeiro ambiente de testes, tendo sido realizados diversos experimentos destinados à avaliação do seu desempenho térmico.

Os resultados demonstraram que a combinação entre inércia térmica, ventilação nos períodos adequados e sombreamento resultou na manutenção de temperaturas internas adequadas ao conforto dos usuários, tanto no verão quanto no inverno. Também foram demonstrados efeitos negativos, advindos do uso inadequado da edificação, principalmente no tocante à ausência de proteção solar e admissão da ventilação em períodos quentes no verão. Foi possível, ainda, identificar a necessidade de algumas adaptações no projeto, relativas ao posicionamento das esquadrias, capazes de melhorar o desempenho da ventilação cruzada. Por fim, a ventilação mecânica noturna e o emprego do telhado vegetado demonstraram a viabilidade de estratégias bioclimáticas que apresentam baixo custo de manutenção, mas que causam impactos significativos no desempenho térmico da edificação, podendo minimizar a dependência da utilização de sistemas de condicionamento artificial.

A Casa Eficiente representa um referencial para a elaboração do projeto arquitetônico de residências localizadas em Florianópolis e outras cidades com clima semelhante. Demonstrando resultados e propondo recomendações, a Casa Eficiente contribui para a disseminação dos benefícios da adequação climática, cumprindo seu papel de vitrine tecnológica e apresentando-se como uma significativa contribuição ao cenário nacional.

1. Introdução

Autora:
Juliana Oliveira Batista

O atual modelo de desenvolvimento econômico e os impactos decorrentes do crescimento populacional sobre o meio ambiente demandam a adoção de alternativas sustentáveis para a exploração dos recursos naturais. O entendimento do conceito de sustentabilidade como uma forma de desenvolvimento econômico, que emprega os recursos naturais e o meio ambiente para beneficio das gerações futuras, pode ser aplicado também na construção civil. Além de consumir recursos naturais na extração das matérias-primas, esta atividade produtiva emprega grande quantidade de energia na produção e transporte de materiais, ainda na fase de construção, e também na iluminação e condicionamento ambiental, na fase de uso. Estes consumos são, em grande medida, controlados por decisões de projeto.

A inadequação do projeto às características climáticas locais afeta diretamente o desempenho da edificação, podendo levar à utilização intensa de equipamentos mecânicos de refrigeração e sistemas artificiais de iluminação para garantir o conforto dos usuários, resultando, por conseguinte, no consumo de energia elevado. Por outro lado, a geração e o consumo de energia estão entre os principais contribuintes às mudanças climáticas globais.

Nesse contexto, o uso eficiente da energia apresenta-se como uma das principais dimensões de sustentabilidade a serem obtidas no espaço habitado. No âmbito da construção civil, os termos sustentabilidade, adequação ambiental e eficiência energética se inter-relacionam, de modo que as edificações podem ser utilizadas como instrumento para a disseminação de tais conceitos.

Partindo-se desse princípio, o projeto da Casa Eficiente foi concebido pelas arquitetas Alexandra Albuquerque Maciel e Suely Ferraz de Andrade como uma vitrine de tecnologias de ponta, onde estratégias de adequação ambiental foram associadas a medidas de eficiência energética visando à obtenção do conforto térmico, redução no consumo de energia e menor impacto ambiental. Neste volume são descritas e avaliadas as estratégias incorporadas ao projeto com a finalidade de promover a sua adequação ao clima local, a partir da análise do desempenho térmico da edificação.

Após a Introdução, o Capítulo 2 aborda os procedimentos de avaliação de desempenho térmico de edificações adotados pelas normas brasileiras, a NBR 15220-3 (ABNT, 2005c) e a NBR 15575 (ABNT, 2008), utilizando como exemplo a Casa Eficiente.

No Capítulo 3, são apresentados os resultados de diversos experimentos realizados sob condições de verão e de inverno, realizados com o intuito de testar o efeito de alterações das condições de ventilação e exposição à radiação solar no desempenho térmico da Casa Eficiente.

No Capítulo 4, são apresentados os resultados dos experimentos de avaliação da eficácia da ventilação mecânica no período noturno, estratégia de condicionamento híbrida, que busca incrementar os efeitos de atraso e amortecimento das temperaturas internas com o auxílio de equipamentos mecânicos caracterizados pelo baixo consumo de energia elétrica.

Já no Capítulo 5, o objetivo é investigar o desempenho térmico do telhado vegetado. Este componente construtivo representa uma escolha capaz de reduzir a transmissão de calor através da cobertura, superfície que se encontra mais exposta à radiação solar dentre aquelas que compõem a envoltória, sendo, portanto, uma das principais responsáveis pelos ganhos de calor em edificações térreas.

O Capítulo 6 apresenta as conclusões relativas às análises apresentadas, evidenciando as contribuições da Casa Eficiente para a demonstração do potencial de soluções inovadoras para o projeto de habitações unifamiliares.

2. Classificação do desempenho térmico da casa eficiente: avaliação segundo as normas brasileiras

Autores:
Juliana Oliveira Batista
Roberto Lamberts

Neste capítulo são apresentadas as normas brasileiras destinadas à avaliação do desempenho térmico de edificações residenciais, aplicando-as à Casa Eficiente através de avaliação prescritiva (NBR 15220-3) e classificação do desempenho mediante monitoramento e simulação (NBR 15575).

2.1. Como se avalia o desempenho térmico de uma edificação residencial?

Segundo Pereira e Neto (1988), avaliar o desempenho térmico de uma edificação significa avaliar seu comportamento térmico frente a requisitos pré-estabelecidos, para atender as necessidades térmicas do usuário frente às ações climáticas às quais a edificação está sujeita.

Convém salientar a distinção entre desempenho térmico e comportamento térmico. O comportamento térmico é caracterizado pela resposta física que a edificação apresenta quando submetida às solicitações do clima externo (variáveis climáticas) e às condições de uso dos ambientes, destacando-se a geração de calor interno advindo da presença de pessoas e equipamentos no interior dos ambientes. Esta resposta pode ser identificada observando-se fatores como a variação da temperatura e umidade do ar interno ou dos fluxos de calor transmitidos através das vedações (paredes e cobertura, principalmente). Quando tais fatores são confrontados com parâmetros de referência, ou seja, pré-requisitos que enfocam o atendimento das exigências dos usuários quanto ao comportamento da edificação em uso, tem-se uma avaliação do desempenho térmico.

No caso de uma edificação residencial, a exemplo da Casa Eficiente, o seu comportamento térmico é determinado, principalmente, em função das condições ambientais externas. Em residências, a ocupação é menor do que em um edifício comercial, de modo que há menos geração de calor interno advindo de pessoas, computadores e sistemas de iluminação artificial, por exemplo. Nesse caso, os ganhos de calor através das superfícies externas (paredes e cobertura) e das aberturas existentes (superfícies envidraçadas), assim como as condições de exposição à insolação e à ventilação, são os principais fatores determinantes do desempenho térmico de uma residência. Portanto,

o projeto de habitações apresenta um grande potencial para a incorporação de estratégias bioclimáticas, favorecendo o melhor aproveitamento da luz e da ventilação natural, assim como identificando quais os materiais construtivos mais adequados para adaptar a edificação ao contexto climático no qual a mesma se insere.

O projeto da Casa Eficiente foi concebido a partir da incorporação de princípios da arquitetura bioclimática. As soluções arquitetônicas foram desenvolvidas com o intuito de favorecer o melhor aproveitamento dos condicionantes climáticos locais, desde a escolha dos materiais construtivos, com o uso intensivo da inércia e do isolamento térmico para evitar ganhos de calor excessivos no verão e reduzir as perdas no inverno. Desse modo, buscou-se dispor as aberturas nas fachadas para favorecer o aproveitamento dos ventos predominantes no verão, utilizando-se barreiras para bloquear os ventos de inverno e protetores solares para evitar a insolação indesejável (dispositivos de sombreamento). Além disso, foi empregada a ventilação mecânica noturna como estratégia de resfriamento da temperatura interna no verão.

Entretanto, deve-se considerar que os padrões de uso e ocupação também interferem no comportamento térmico de uma residência, na medida em que o modo como os usuários manipulam os dispositivos de controle da ventilação e da insolação interfere nos ganhos e perdas de calor pela edificação. Uma vez que a Casa Eficiente é uma vitrine de tecnologias aberta à visitação, que também funciona como laboratório de pesquisa, seus padrões de uso e ocupação não são representativos do que acontece em uma residência real. Buscou-se então representar situações variadas durante os experimentos, visando reproduzir situações semelhantes àquelas que ocorreriam caso a edificação fosse ocupada e utilizada como uma residência convencional, possibilitando uma ampla avaliação do desempenho térmico da Casa Eficiente, com base em medições de variáveis representativas, tais como a temperatura e a umidade relativa do ar.

Mas, para avaliar o desempenho térmico de uma edificação, existem outros procedimentos que podem ser adotados ainda na fase de projeto, ou após a construção. Uma alternativa de avaliação é a simulação computacional do sistema construtivo utilizado, observando-se o enquadramento dos resultados dentro de limites ou parâmetros de conforto térmico ajustados para a população local (BARBOSA et al., 2003). Um exemplo de parâmetro que pode ser utilizado é o total de horas anuais em que as temperaturas internas obtidas por simulação ou monitoramento apresentam-se fora dos limites de temperatura da zona de conforto (BARBOSA et al., 2003). Tem-se ainda a avaliação por prescrição, na qual são definidos limites para as características termofísicas dos materiais construtivos, assim como recomendações para o dimensionamento de aberturas para ventilação e existência de dispositivos de sombreamento que visam à adequação do projeto às condições climáticas de um determinado local.

Neste capítulo, será abordada a avaliação de desempenho da Casa Eficiente com base em duas normas aplicáveis à habitação, vigentes no Brasil: a NBR 15220 – Desempenho Térmico de Edificações, que em sua parte 3 apresenta as diretrizes do Zoneamento Bioclimático Brasileiro (ABNT, 2005c), e a NBR 15575 – Edificações Habitacionais de até cinco pavimentos – Desempenho (ABNT, 2008), que trata de diversos requisitos de desempenho para edifícios habitacionais (estrutural, acústico, lumínico, entre outros), dentre eles o desempenho térmico.

2.2. A Casa Eficiente e as normas brasileiras

2.2.1. A NBR 15220: Desempenho Térmico de Edificações

A NBR 15220-3 (ABNT, 2005c) apresenta o Zoneamento Bioclimático Brasileiro e as Diretrizes Construtivas para Habitações Unifamiliares de Interesse Social. De acordo com esta classificação, o Brasil foi subdividido em oito zonas, cujas exigências climáticas se assemelham (Figura 2.1).

As diretrizes construtivas são específicas para cada zona bioclimática e a avaliação é prescritiva, realizada com base na verificação do atendimento de cada parâmetro identificado pela norma, a saber:

- tamanho das aberturas para ventilação (expressas como percentual de área de piso);
- proteção das aberturas;
- vedações externas, parede externa e cobertura, informando o tipo de vedação (leve ou pesada, refletora ou isolada);
- estratégias de condicionamento térmico passivo.

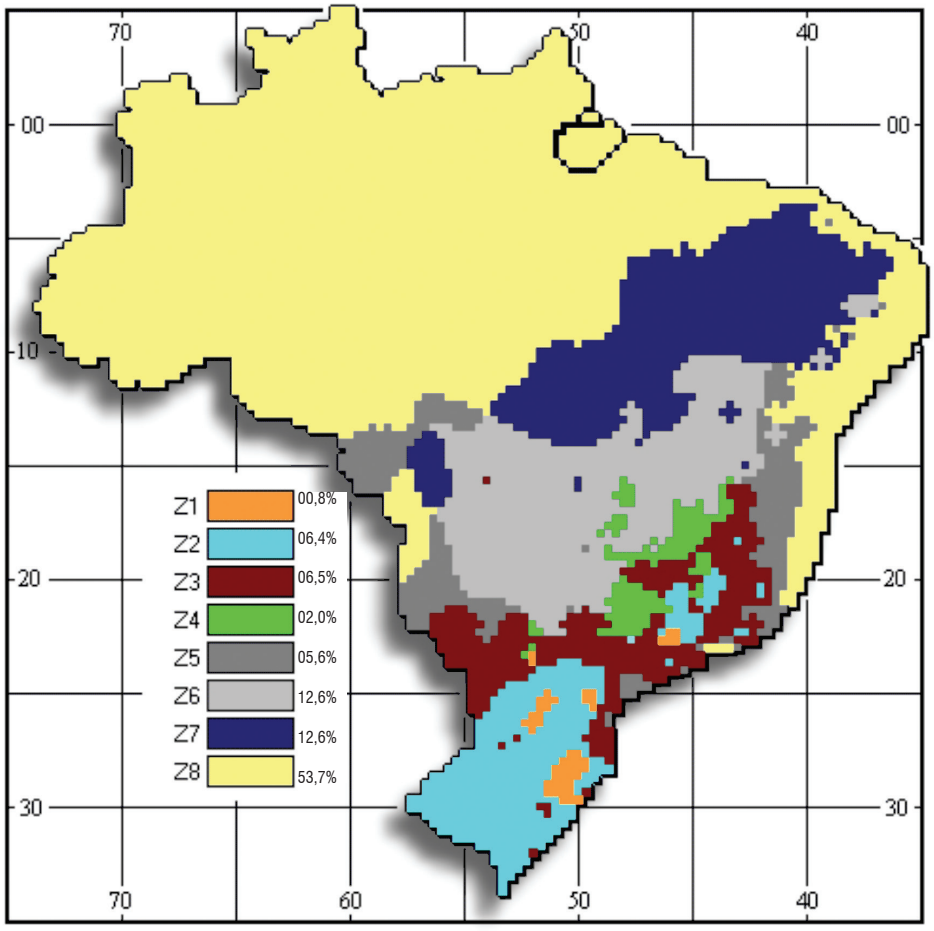


FIGURA 2.1 – Zoneamento bioclimático brasileiro. (Fonte: ABNT, 2005c).

Embora a norma faça referência à habitação de interesse social, as recomendações e diretrizes que expressa visam à otimização do desempenho térmico e são fundamentadas em estratégias de adaptação da edificação ao clima. Portanto, a NBR 15220-3 é uma importante referência normativa para a prescrição de estratégias bioclimáticas a serem incorporadas no projeto de edificações. As estratégias de condicionamento ambiental recomendadas pela NBR 15220-3 são baseadas na carta bioclimática de Givoni (1992) e nas planilhas de Mahoney (KOENIGSBERGER et al., 1977).

A classificação de cada cidade em uma determinada zona depende das estratégias bioclimáticas, que são definidas previamente, tendo sido utilizadas as planilhas de Mahoney para a definição dos limites das propriedades térmicas dos elementos construtivos (paredes e coberturas): Fator Solar, Atraso Térmico e Transmitância Térmica (ABNT, 2005a). Também são indicados percentuais de área de piso relativos às aberturas para ventilação, classificando-as em pequenas, médias ou grandes.

Transmitância térmica (U) é uma propriedade dos componentes construtivos relacionada à permissão da passagem de energia, medida em W/m²K. Está relacionada à espessura do componente e à condutividade térmica dos seus materiais constituintes, e representa sua capacidade de conduzir maior ou menor quantidade de energia por unidade de área e de diferença de temperatura.

Atraso térmico (φ) indica o tempo transcorrido entre uma variação térmica em um meio e sua manifestação na superfície oposta de um componente construtivo. Por exemplo: o tempo transcorrido entre o pico de temperatura máxima do ar externo e a temperatura máxima do ar em um ambiente interno.

Fator solar (FSo): em componentes opacos, representa o quociente da taxa de radiação solar transmitida através do componente pela taxa da radiação solar total incidente sobre a superfície externa do mesmo.

A Casa Eficiente, por estar localizada em Florianópolis-SC, está inserida na zona bioclimática 3 (Figura 2.2). Neste caso, as diretrizes construtivas recomendadas pela NBR 15220-3 são relativas a três aspectos principais. O primeiro deles trata das estratégias de condicionamento térmico passivo. Para o verão, é recomendada a ventilação cruzada. Para o inverno, são recomendados o aquecimento solar da edificação e o uso de vedações internas pesadas (inércia térmica).

O segundo aspecto apresentado na norma é relativo ao dimensionamento das aberturas para ventilação e o sombreamento dessas aberturas. As áreas são definidas em função da área de piso do ambiente, variando entre 15 e 25%. A recomendação quanto ao sombreamento é permitir sol durante o inverno.

Por fim, são definidas as propriedades térmicas das vedações externas. No caso das paredes, que devem ser leves e refletoras, o valor limite da transmitância térmica (U) é igual a 3,60 W/m² K. O atraso térmico (φ) deve ser igual ou inferior a 4,3h e o fator solar (FSo) deve ser menor ou igual a 4%.

Quanto à cobertura, que deve ser leve e isolada, o valor limite da transmitância térmica (U) é igual a 2,00 W/m² K. O atraso térmico (ϕ) deve ser igual ou inferior a 3,3h e o fator solar (FSo) deve ser menor ou igual a 6,5%.

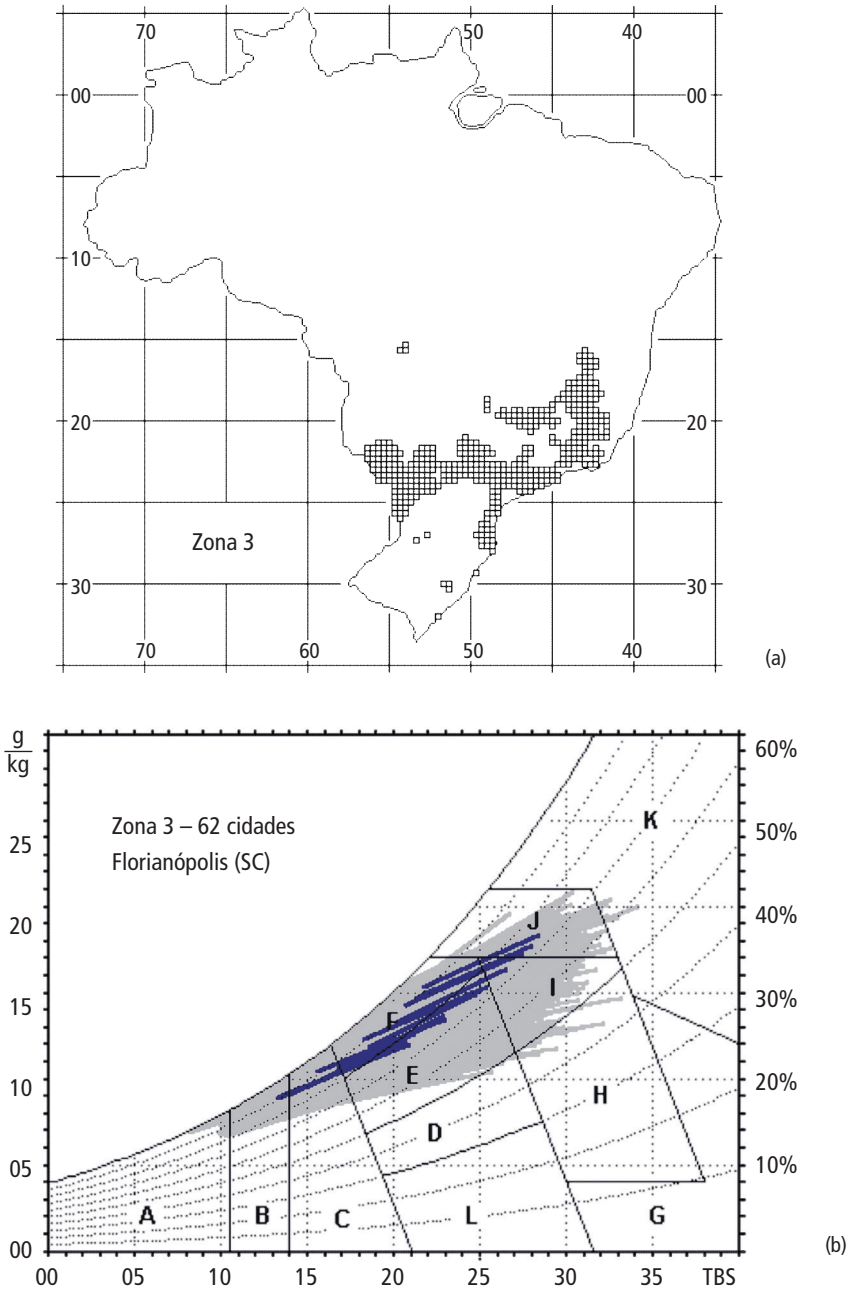
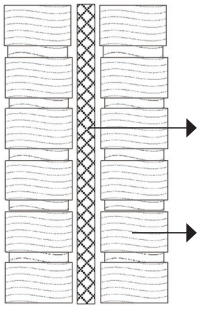


FIGURA 2.2 – (a) Zona Bioclimática 3 e (b) Carta Bioclimática apresentando as normas climatológicas de cidades da zona 3, destacando a cidade de Florianópolis-SC.

De acordo com estas recomendações, a Casa Eficiente foi submetida à análise prescritiva, com relação às estratégias de condicionamento térmico passivo. Foram calculados os valores de transmitância térmica, atraso térmico e fator solar para as paredes e coberturas, utilizando-se os procedimentos de cálculo descritos na própria NBR 15220, parte 2 (ABNT, 2005b), adotando-se como referência os valores de propriedades térmicas dos materiais apresentados na mesma norma, não tendo sido realizadas medições

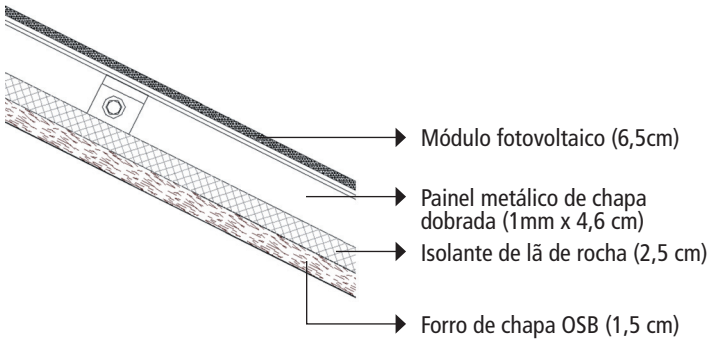
in loco destes parâmetros. Foram empregados três tipos de cobertura com a finalidade de comparar o desempenho térmico das mesmas: cobertura em telha metálica, telha cerâmica e telhado vegetado (Figura 2.3). As Figuras 2.4 a 2.7 indicam os valores das propriedades térmicas correspondentes às paredes e aos diferentes tipos de cobertura, indicando-se também os valores recomendados pela NBR 15220-3.

FIGURA 2.3 – Tipos de cobertura empregadas: (1) metálica, (2) cerâmica e (3) telhado vegetado.



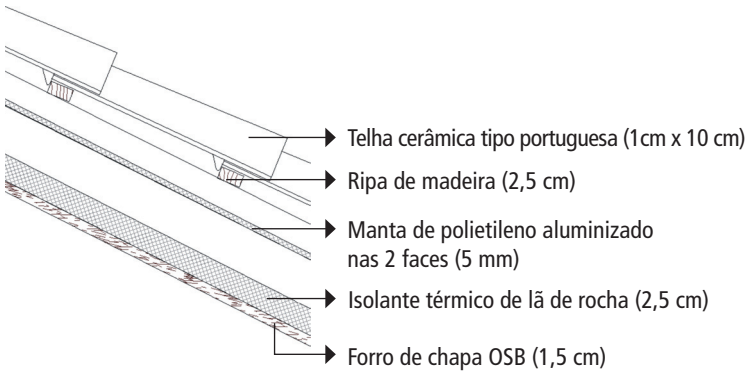
Paredes duplas de tijolo maciço e lã de rocha	
Valores usados na Casa Eficiente	**Referências NBR 15220-3**
Transmitância (U)	
1,06 W/m² K	≤3,6
Atraso térmico (ϕ)	
8,6 h	≤4,3
Fator Solar (FSo)	
2,8%	≤4,0

FIGURA 2.4 – Propriedades termofísicas das paredes externas e recomendações construtivas (NBR 15220-3).



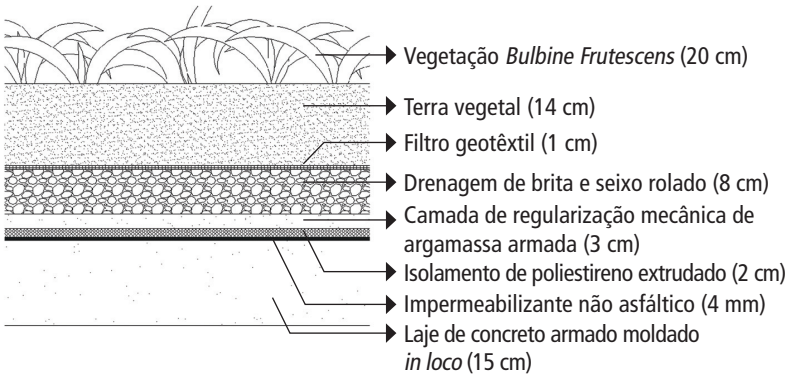
Cobertura em telha metálica	
Valores usados na Casa Eficiente	**Recomendações NBR 15220-3**
Transmitância (U)	
0,87 W/m² K	≤2
Atraso térmico (φ)	
3,8 h	≤3,3
Fator Solar (FSo)	
0,7%	≤6,5

FIGURA 2.5 – Propriedades termofísicas da cobertura metálica e recomendações construtivas (NBR 15220-3).



Cobertura em telha cerâmica	
Valores usados na Casa Eficiente	**Recomendações NBR 15220-3**
Transmitância (U)	
0,57 W/m² K	≤2
Atraso térmico (φ)	
4,9 h	≤3,3
Fator Solar (FSo)	
1,5%	≤6,5

FIGURA 2.6 – Propriedades termofísicas da cobertura cerâmica e recomendações construtivas (NBR 15220-3).



Telhado vegetado	
Valores usados na Casa Eficiente	**Recomendações NBR 15220-3**
Transmitância (U)	
0,82 W/m² K	≤2
Atraso térmico (φ)	
10,9 h	≤3,3
Fator Solar (FSo)	
1,3%	≤6,5

FIGURA 2.7 – Propriedades termofísicas do telhado vegetado e recomendações construtivas (NBR 15220-3).

Com relação às aberturas, a avaliação foi realizada com relação à incidência de radiação solar e à área de ventilação disponível. Na Casa Eficiente, todas as portas e janelas dos ambientes de maior permanência (sala, quartos e cozinha) possuem dispositivos de sombreamento, fixos e móveis. Para as janelas do quarto de casal e da cozinha, foram projetados dispositivos fixos constituídos por uma estrutura em eucalipto e bambu, à qual foi incorporada uma cobertura vegetal com trepadeiras, conforme ilustrado nas Figuras 2.8(a) a e 2.8(b). As Figuras ilustram, também, os dispositivos móveis de sombreamento: persianas de enrolar incorporadas às esquadrias de PVC, na face exterior das aberturas. Estes dispositivos móveis são manipulados individualmente no interior do ambiente e possibilitam o bloqueio total da insolação quando completamente desenroladas, oferecendo ao usuário a possibilidade de obstruir também a passagem da luz natural, caso necessário.

(a)

(b)

FIGURA 2.8 – Dispositivos fixos e móveis de sombreamento posicionados em aberturas nas fachadas Leste e Oeste: (a) janela quarto de casal, fachada Leste e (b) janela da cozinha, fachada Oeste.

Os beirais também foram aproveitados para o sombreamento das aberturas (Figuras 2.9(a) e 2.9(b)), tendo sito feito um estudo prévio para o dimensionamento de todos os dispositivos fixos, com o auxílio de máscaras de sombra, ilustradas na Figura 2.10. Conforme se pode observar, nos horários de temperatura mais elevada, entre 9h e 15h, as aberturas estão sombreadas, enquanto no inverno a entrada de sol é permitida, de acordo com a recomendação da NBR 15220-3.

A Tabela 2.1 indica as áreas de abertura e os percentuais relativos às áreas de piso de cada ambiente. De acordo com a NBR 15220-3, as aberturas médias indicadas para a zona bioclimática 3 devem possuir áreas mínimas equivalentes a 15% da área do piso ambiente e áreas máximas equivalentes a 25%. Comparando-se estes percentuais com os valores indicados na Tabela 1 verifica-se que apenas a sala de estar/jantar possui a área de abertura adequada.

Convém salientar que o projeto original da Casa Eficiente previa esquadrias de correr feitas sob medida, com área efetiva de ventilação correspondente a 100% da abertura. Além disso, as portas externas dos quartos foram projetadas para que sua parte superior pudesse ser aberta, complementando a área de ventilação necessária e ampliando, também, o alcance da ventilação cruzada. Entretanto, durante a obra as esquadrias foram substituídas por modelos pré-fabricados em PVC, com janelas de correr e portas com folhas únicas, devido a restrições relativas à licitação de compra do

modelo especificado inicialmente. As Figuras 2.11(a) a 2.11(g) ilustram as aberturas existentes nos diversos ambientes.

(a)

(b)

FIGURA 2.9 – Aberturas nas fachadas e beirais utilizados como dispositivos fixos de sombreamento: (a) Fachada Norte (portas externas dos quartos) e fachada Leste (janela do quarto de solteiro) e (b) Fachada Norte (porta de acesso à sala de estar).

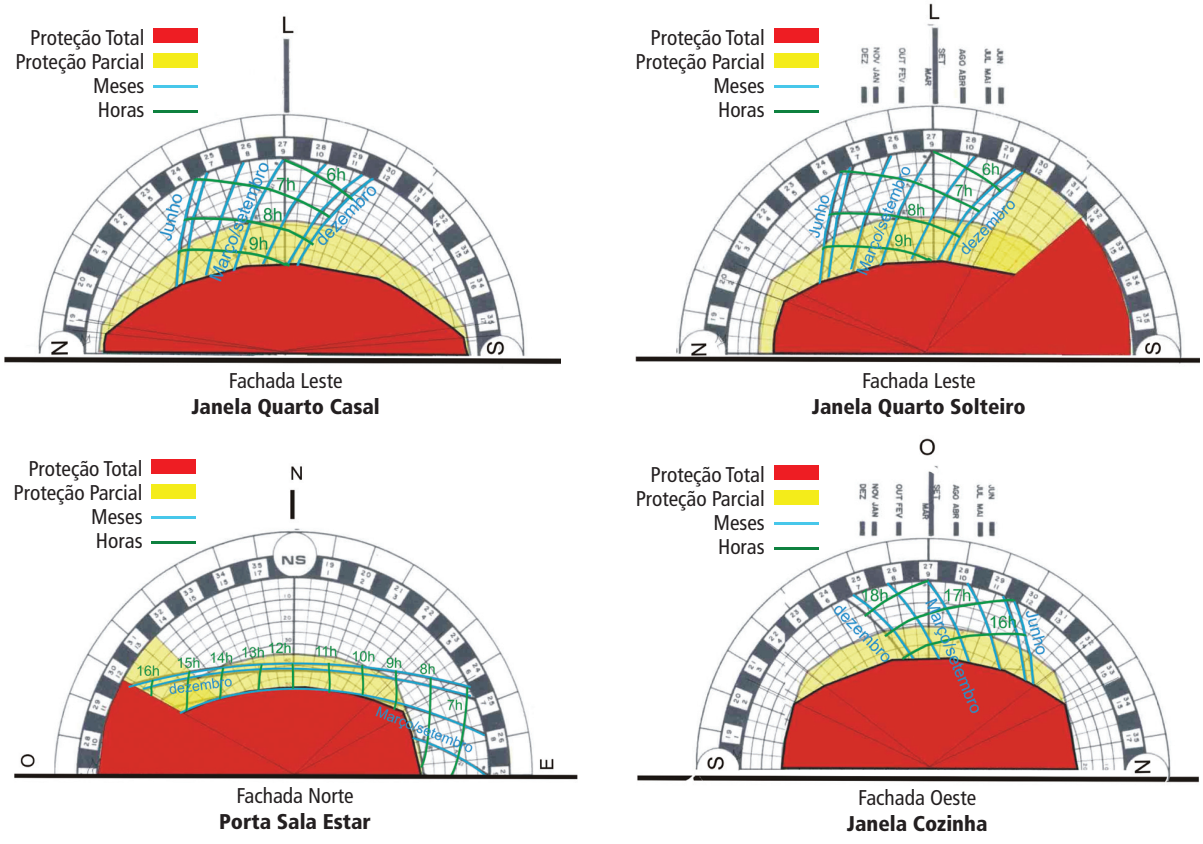


FIGURA 2.10 – Máscaras de sombra correspondentes às aberturas da Casa Eficiente.

TABELA 2.1 – Áreas de abertura dos cômodos da Casa Eficiente.

Ambiente	Área de piso (m²)	Área efetiva de ventilação (m²)	Percentual da área de piso (%)
Sala de estar/jantar	41,71	7,50	18
Quarto de casal	17,25	1,00	6
Quarto de solteiro	11,21	1,00	9
Cozinha	11,4	1,03	9
Área de serviço	7,98	0,50	6
Banheiro	9,50	0,50	6

OBS.: Com exceção da sala de estar/jantar, as áreas efetivas de ventilação foram caluladas considerando-se apenas as janelas dos ambientes (as áreas das portas externas não foram contabilizadas).

A análise prescritiva no projeto possibilitou verificar se os materiais especificados são adequados às exigências da norma para a zona bioclimática 3, onde se localiza a cidade de Florianópolis. Os resultados desta análise podem ser sintetizados com relação aos seguintes aspectos:

- **Propriedades térmicas dos materiais:** com exceção do atraso térmico, as demais propriedades térmicas de todos os componentes construtivos apresentam-se adequadas às recomendações da norma. Entretanto, convém esclarecer que em todos os componetes (paredes e coberturas) buscou-se obter um atraso térmico elevado, a fim de se investigar o efeito da maximização da inércia térmica como estratégia de condicionamento passivo em Florianópolis. O Capítulo 3 apresenta os resultados do monitoramento térmico da Casa Eficiente, podendo-se verificar em que medida o comportamento térmico dos componentes construtivos influenciou o desempenho térmico da edificação.
- **Aberturas para ventilação e sombreamento das aberturas:** com relação à configuração final das aberturas, as áreas efetivas disponíveis para ventilação foram consideradas inadequadas, sendo equivalentes a menos de 15% das áreas de piso dos ambientes internos. A única exceção neste caso foi a sala de estar/jantar, considerada adequada. Já com relação ao sombreamento, as aberturas de todos os ambientes de permanência prolongada atenderam satisfatoriamente as recomendações da norma: sombreamento no verão e entrada de sol no inverno.
- **Estratégias de condicionamento passivo:** na Casa Eficiente foram incorporadas todas as estratégias de condicionamento passivo recomendadas pela NBR 15220-3: ventilação cruzada, aquecimento solar da edificação e uso de inércia térmica. Utilizou-se também a ventilação mecânica nos quartos, com a finalidade de incrementar o resfriamento da envoltória no período noturno, tirando partido da inércia térmica da construção. Atendendo-se às prescrições da norma neste quesito, o desempenho das estratégias mencionadas durante a fase de uso da edificação é investigado detalhadamente nos capítulos seguintes.

(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

(f)

(g)

FIGURA 2.11 – Portas e janelas existentes nos diversos ambientes da Casa Eficiente: (a) sala de estar, (b) sala de jantar, (c) área de serviço, (d) cozinha, (e) quarto de casal, (f) janela do quarto de solteiro e (g) porta externa.

2.2.2. A NBR 15575: Edificações habitacionais de até cinco pavimentos – Desempenho

A NBR 15575: Edificações habitacionais de até cinco pavimentos – Desempenho é uma norma lançada em 2008 que engloba diversos requisitos, de modo que a avaliação da edificação contempla os diversos sistemas que a compõem. O escopo desta norma é abrangente, definindo-se requisitos de desempenho mínimo obrigatório para alguns sistemas das edificações, considerando-se as necessidades dos usuários e as condições de exposição da edificação, ao longo de uma vida útil mínima obrigatória. O desempenho térmico é um dos requisitos qualitativos de desempenho, sendo os critérios de avaliação os valores máximos

de temperatura interna no verão e os valores mínimos de temperatura interna no inverno. Na NBR 15575, o desempenho térmico pode ser classificado e é um dos requisitos que deve ser contemplado adequadamente pelos sistemas de vedações verticais internas e externas, assim como pelos sistemas de cobertura.

A norma estabelece três procedimentos de avaliação: prescritiva (semelhante à NBR 15220-3); simulação computacional e medição. Quando se utiliza a medição, a temperatura do ar é monitorada nas edificações ou protótipos construídos, considerando-se os dias típicos de projeto de inverno e verão, específicos de cada local (ABNT, 2008). A classificação dos níveis de desempenho é feita de acordo com a adequação do projeto aos critérios estabelecidos pela norma, em três categorias: nível M (mínimo), I (intermediário) ou S (superior).

Com relação às fachadas, a norma define apenas os requisitos mínimos que devem ser atendidos, referentes à classificação de nível de desempenho mínimo: as propriedades termofísicas transmitância e capacidade térmica, de acordo com a absortância da superfície externa. Para a Casa Eficiente, localizada na zona bioclimática 3, os valores dessas propriedades encontram-se enumerados na Tabela 2.2, sendo que os valores destacados na cor verde indicam os limites estabelecidos pela norma. De acordo com os valores apresentados, as fachadas são consideradas adequadas aos limites estabelecidos pela NBR 15575.

TABELA 2.2 – Propriedades termofísicas das fachadas e recomendações construtivas (NBR 15575).

Componente	Absortância (α)	Transmitância térmica (U)	Capacidade térmica (CT)	Nível de classificação do desempenho
Recomendações NBR 15575 (ABNT, 2008) – Fachadas	≤ 0,6	≤ 3,7 W/ m² K	≥ 130 kJ / m² K	MÍNIMO (pelo menos)
	> 0,6	≤ 2,5 W/ m² K		
Fachadas	0,65 (tijolo aparente)	1,07 W/ m² K	315,8 kJ / m² K	MÍNIMO

Com relação às coberturas, são indicados parâmetros para classificação do nível de desempenho como mínimo (M), intermediário (I) e superior (S), determinado de acordo com a transmitância térmica, em função da absortância. A norma também recomenda que elementos com capacidade térmica maior ou igual a 150 kJ/(m² K) não sejam empregados sem isolamento térmico ou sombreamento. A Tabela 2.3 compara os valores de referência da NBR 15575 com os valores calculados para os três tipos de cobertura existentes na Casa Eficiente. Nestes casos, a classificação do projeto foi considerada de nível intermediário para a cobertura cerâmica existente no quarto de casal e de nível superior para as demais, tendo sido atendido o critério relativo à capacidade térmica, pois todas as coberturas possuem isolamento térmico (Figuras 2.5 a 2.7).

Com relação às áreas de abertura, as recomendações da norma só se aplicam aos ambientes de longa permanência: salas, cozinhas e quartos. É obrigatória a existência de dispositivos de sombreamento nas janelas dos quartos, de forma a permitir o controle do sombreamento, ventilação e escurecimento, a critério do usuário, como por exemplo, venezianas. Nestes casos, a norma recomenda aberturas médias, com área efetiva de ventilação equivalente a 8% de área de piso dos ambientes, no mínimo. Observando-se os dados da Tabela 2.1 verifica-se que apenas o quarto de casal não atenderia este critério, pois possui área efetiva de abertura para ventilação equivalente a 6% da área do piso.

Por fim, uma vez que todas as esquadrias possuem dispositivos de controle da insolação e ventilação, o nível mínimo de aceitação é contemplado.

TABELA 2.3 – Propriedades termofísicas das coberturas e recomendações construtivas (NBR 15575).

Componente	Absortância (α)	Transmitância térmica (U)	Nível de classificação do desempenho
Recomendações NBR 15575 (ABNT, 2008) – Coberturas	≤ 0,6	≤ 2,3 W/ m² K	MÍNIMO
		≤ 1,5 W/ m² K	INTERMEDIÁRIO
		≤ 1,0 W/ m² K	SUPERIOR
	> 0,6	≤ 1,5 W/ m² K	MÍNIMO
		≤ 1,0 W/ m² K	INTERMEDIÁRIO
		≤ 0,5 W/ m² K	SUPERIOR
Cobertura cerâmica (quarto de casal)	0,65	0,57 W/ m² K	INTERMEDIÁRIO
Cobertura metálica (sala de estar/jantar)	0,20	0,87 W/ m² K	SUPERIOR
Telhado vegetado (quarto de solteiro)	0,55	0,82 W/ m² K	SUPERIOR

A NBR 15575 apresenta, ainda, os procedimentos de medição e de simulação. O procedimento de medição consiste na medição da temperatura de bulbo seco no centro dos quartos e salas, a 1,20 m do piso, no dia considerado dia típico de projeto, no verão e no inverno. Esses dias são determinados em função da temperatura máxima e da temperatura mínima típicas da localidade onde será feita a medição. A NBR 15575 apresenta valores de temperatura a serem considerados como referência para a seleção do dia típico das capitais brasileiras, obtidos a partir das Normais Climatológicas. No caso de Florianópolis-SC, as temperaturas típicas de verão e inverno são, respectivamente, iguais a 28,4ºC e 13,3ºC. Portanto, na análise de desempenho por medição, o dia selecionado deve corresponder a um dia típico de projeto, de verão ou de inverno, precedido por pelo menos um dia com características semelhantes. A recomendação da norma é trabalhar com uma sequência de três dias e analisar os dados do terceiro dia, a fim de garantir que a edificação entrou em regime permanente.

Regime permanente: quando uma edificação entra em regime permanente, significa que as condições térmicas das superfícies internas (temperatura e fluxo de calor) atingiram uma situação de equilíbrio, mantendo os mesmos padrões de comportamento após uma sequência de dias com características semelhantes quanto à variação da temperatura, umidade e insolação.

A classificação do desempenho é efetuada quando se comparam os valores máximos e mínimos das temperaturas internas e externas registradas nos dias típicos de verão e de inverno, respectivamente, conforme indicado na Tabela 2.4. A classificação mínima é atribuída no verão, quando a temperatura máxima interna ($T_{i,máx}$) é inferior à máxima externa ($T_{e,máx}$). Já no inverno, o nível mínimo é atribuído quando a temperatura mínima interna ($T_{i,min}$) é 3ºC mais elevada do que a temperatura mínima externa ($T_{e,min}$).

TABELA 2.4 – Critérios para classificação do nível de desempenho de edificações no verão e inverno, com base no procedimento de medição (NBR 15575).

Nível de classificação do desempenho	Critérios para comparação entre temperaturas internas e externas	
	Verão: temperaturas máximas	Inverno: temperaturas mínimas
Mínimo	Ambiente interno ≤ exterior	Ambiente interno ≥ (exterior + 3ºC)
Intermediário	Ambiente interno ≤ (exterior - 2ºC)	Ambiente interno ≥ (exterior + 5ºC)
Superior	Ambiente interno ≤ (exterior - 4ºC)	Ambiente interno ≥ (exterior + 7ºC)

Com relação à instrumentação utilizada para o monitoramento da Casa Eficiente, as medições de temperatura do ar nos ambientes internos foram realizadas com o auxílio de sensores portáteis, armazenadores de dados (data loggers) do tipo Hobo (Figura 2.12). Estes equipamentos armazenam os valores medidos, que são posteriormente transferidos para computador através de um programa computacional específico. Em cada ambiente foi instalado um Hobo, posicionado a 1,8 m de altura em relação ao piso. Os Hobos foram programados para adquirir as informações em intervalos de 5 minutos. Posteriormente, foram calculadas médias horárias dos valores de temperatura, possibilitando a comparação com os valores da temperatura externa registrados pela miniestação meteorológica instalada ao lado da Casa Eficiente (Figura 2.13).

Hobo é um equipamento do tipo data logger, capaz de medir e armazenar dados de temperatura do ar e umidade relativa do ar. Os Hobos utilizados nestas pesquisas são da marca *Onset Computer Corporation*, modelo Hobo U12, como os mostrados na Figura 2.12. Para medição de temperatura, sua resolução é de 0,03°C, com precisão de ±0,35°C

FIGURA 2.12 – Sensores do tipo Hobo.

FIGURA 2.13 – Miniestação meteorológica da Casa Eficiente.

2.2.2.1. Classificação do desempenho térmico no verão

Além do critério de seleção baseado na temperatura máxima diária, a seleção do dia típico também levou em consideração as condições de ventilação às quais os ambientes internos encontravam-se sujeitos. Conforme será discutido no Capítulo 3, a manipulação das esquadrias interfere diretamente na quantidade de ventilação admitida no interior da edificação, influenciando o comportamento térmico dos componentes construtivos. Por este motivo, foram realizados diversos experimentos na Casa Eficiente, variando-se as condições de manipulação das esquadrias e observando-se o efeito sobre as temperaturas internas, resultantes de períodos de ventilação diferenciados. Buscou-se então selecionar um dia no qual a Casa Eficiente foi mantida sob condições de ventilação representativas do uso real de uma residência ocupada, com as janelas abertas pela manhã e pela tarde, e fazendo uso da ventilação mecânica noturna nos quartos de casal e de solteiro, estratégia incorporada ao projeto com vistas a favorecer o resfriamento dos componentes da envoltória (ver Capítulo 4).

Envoltória: fazem parte da envoltória todas as superfícies externas que compõem a edificação: paredes, cobertura e aberturas. É através desses componentes que se realizam as trocas térmicas com o ambiente externo, de modo que os materiais constituintes da envoltória devem ser criteriosamente selecionados em função de suas propriedades térmicas e exigências do clima onde a edificação será inserida.

Por fim, considerando-se tais aspectos e as recomendações da norma, selecionou-se o dia 27/01/08 como dia típico dentre os dados disponíveis. Nesta data, a temperatura máxima externa foi igual a 27,5ºC, sendo precedida por dois dias com temperaturas máximas iguais a 27,2ºC e 26,9ºC. A Figura 2.14 ilustra a variação das temperaturas internas e externas entre os dias 25 e 27/01, indicando-se as temperaturas máximas externas diárias. Comparando-se estes valores com as temperaturas máximas registradas nos ambientes internos, obtiveram-se os resultados apresentados na Tabela 2.5.

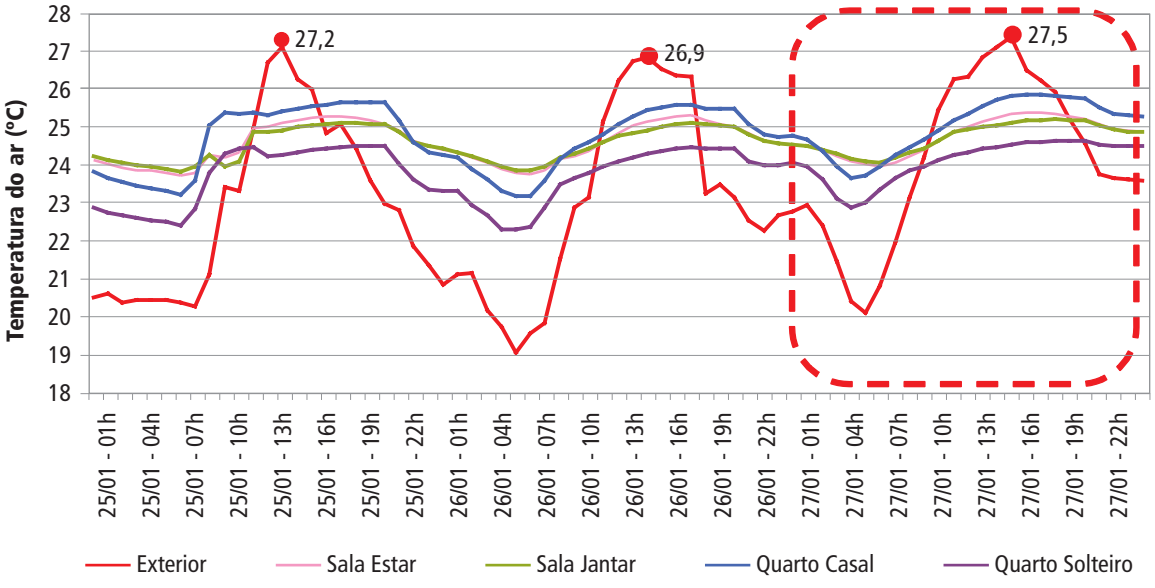


FIGURA 2.14 – Dia típico selecionado para classificação do desempenho térmico no verão (27/01/2008).

TABELA 2.5 – Classificação do nível de desempenho dos ambientes no dia típico de verão.

Dados	Ambientes				
	Ambiente externo	Sala estar	Sala jantar	Quarto casal	Quarto solteiro
Temperaturas máximas (ºC)	27,5	25,5	25,3	26,0	24,7
Diferença em relação à temperatura externa	–	-2,0	-2,2	-1,5	-2,8
Nível de desempenho	–	Intermediário	Intermediário	Mínimo	Intermediário

De acordo com os dados da Tabela 2.5, verifica-se que os ambientes obedeceram ao critério de classificação intermediário, com exceção do quarto de casal, que foi classificado com nível de desempenho mínimo.

2.2.2.2. Classificação do desempenho térmico no inverno

Quanto ao dia típico de inverno, foi selecionado o dia 07/06/08, cuja temperatura externa mínima foi igual a 13,7ºC (Figura 2.15), sendo a temperatura mínima típica de inverno igual a 13,3ºC. Nesta data, todas as esquadrias da Casa Eficiente foram mantidas fechadas, a fim de se evitar a perda de calor para o ambiente externo.

A Tabela 2.6 indica as temperaturas mínimas alcançadas nesta data. Em comparação ao ambiente externo, as temperaturas mínimas internas apresentaram diferenças de mais de 5ºC, obtendo-se as classificações intermediária e superior.

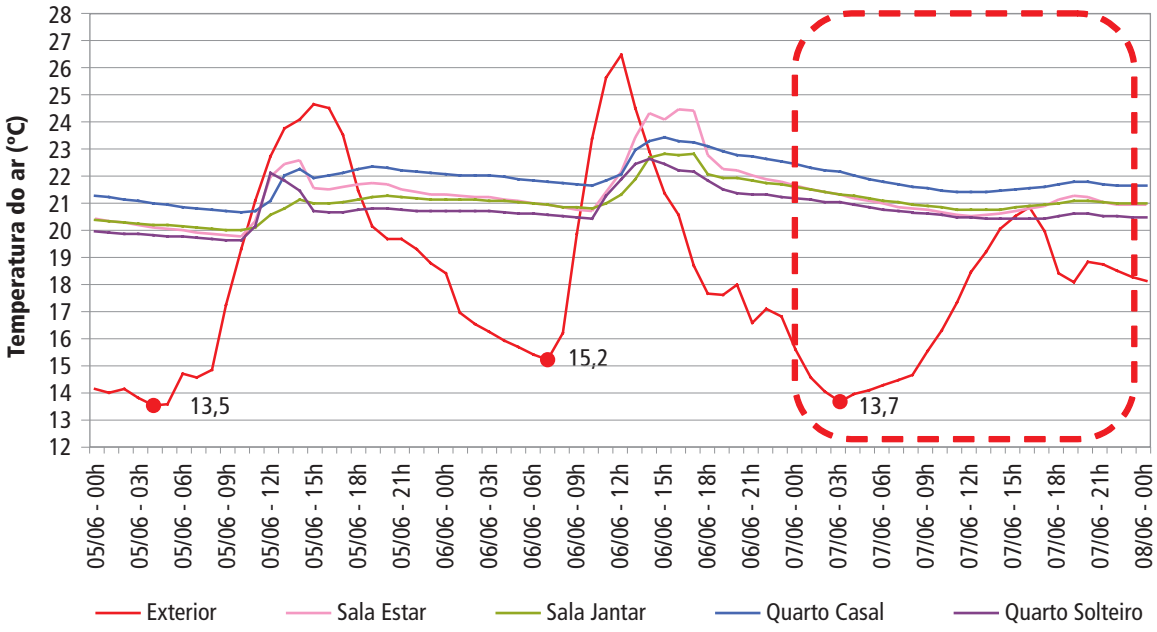


FIGURA 2.15 – Dia típico selecionado para classificação do desempenho térmico no inverno (07/06/2008).

TABELA 2.6 – Classificação do nível de desempenho dos ambientes no dia típico de inverno.

Dados	Ambientes				
	Ambiente externo	Sala estar	Sala jantar	Quarto casal	Quarto solteiro
Temperaturas mínimas (°C)	13,7	20,5	20,7	21,4	20,4
Diferença em relação à temperatura externa	–	6,8	7,0	7,7	6,7
Nível de desempenho	–	Intermediário	Superior	Superior	Intermediário

De acordo com o procedimento de medição definido pela NBR 15575, a Casa Eficiente teve seu desempenho térmico classificado de forma diferenciada para cada ambiente interno. Os resultados da classificação também foram diferenciados nos períodos de verão e inverno, destacando-se a sala de jantar e o quarto de casal (Tabela 2.7) como os únicos ambientes classificados com nível superior, o que ocorreu apenas no inverno. Entretanto, o quarto de casal foi o único ambiente classificado com nível mínimo no verão.

TABELA 2.7 – Síntese dos resultados de classificação do nível de desempenho térmico.

Nível de classificação do desempenho	Ambientes/Classificações			
	Sala estar	Sala jantar	Quarto casal	Quarto solteiro
Nível de desempenho: verão	Intermediário	Intermediário	Mínimo	Intermediário
Nível de desempenho: inverno	Intermediário	Superior	Superior	Intermediário

Convém salientar que o procedimento de medição fornece uma indicação do desempenho térmico dos ambientes internos de uma edificação, que está sujeito também a outros fatores intervenientes, além das condições climáticas externas. Ou seja, além do critério de seleção do dia típico, baseado nos valores de temperatura máxima no verão e mínima no inverno, a medição deve ser realizada em situações que reproduzam os padrões de uso reais da residência, a fim de evitar classificações equivocadas.

Os dias típicos de verão e de inverno foram selecionados após a análise de todo o conjunto de dados disponível, resultante do monitoramento desenvolvido ao longo dos anos de 2007 e 2008. De posse de um extenso conjunto de dados, devidamente acompanhados dos registros de uso e ocupação da residência, puderam-se escolher duas datas representativas de condições ideais de utilização das esquadrias, dispositivos de sombreamento e o uso combinado da ventilação natural e da ventilação mecânica no período noturno. Os resultados satisfatórios obtidos com a medição refletem também os benefícios da escolha criteriosa dos materiais que constituem as superfícies externas da edificação (paredes, cobertura, aberturas para ventilação), os quais obtiveram classificação satisfatória quando avaliados pelo método prescritivo da NBR 15575.

Porém, mesmo um projeto bioclimático pode ter seu desempenho térmico prejudicado quando as estratégias de condicionamento que incorpora não são utilizadas adequadamente. Outros experimentos realizados pelo LMBEE demonstraram que o desempenho térmico desta edificação pode se alterar completamente quando as rotinas de abertura das esquadrias são modificadas. Os resultados destes experimentos serão apresentados nos Capítulos 3 e 4 desta publicação e avaliam o impacto do uso inadequado da ventilação natural e da insolação.

3. Desempenho das estratégias bioclimáticas de projeto: inércia térmica e ventilação natural

Autores:
Juliana Oliveira Batista
Roberto Lamberts
Christhina Maria Cândido

O objetivo deste capítulo consiste em descrever o comportamento térmico da Casa Eficiente como resultado de diferentes condições de ocupação e uso. Através da análise de variáveis ambientais (temperatura, umidade relativa e velocidade do ar) em períodos de verão e de inverno, podem ser identificados subsídios úteis para o projeto de residências localizadas em climas semelhantes ao de Florianópolis-SC.

3.1. Introdução

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

No verão, o clima de Florianópolis é caracterizado por temperaturas elevadas, sendo o mês de fevereiro considerado o mais quente do ano, cuja temperatura média corresponde a 29ºC (GOULART, 1993). Entretanto, a temperatura máxima pode ultrapassar os 36ºC no mês de janeiro. Já a umidade do ar é elevada, apresentando valores superiores a 80% durante todo o ano. Nas situações de calor, o objetivo é manter as temperaturas internas inferiores às temperaturas externas e evitar os ganhos de calor indesejáveis, para não prejudicar o conforto dos usuários das edificações. As altas temperaturas e a umidade relativa elevada demandam o emprego da ventilação cruzada no verão, enquanto a presença da radiação solar requer o sombreamento das aberturas. Se por um lado a ventilação é bem-vinda nos dias quentes e úmidos, deve-se bloquear a entrada da insolação, para evitar ganhos de calor adicionais. Outro modo de reduzir os ganhos de calor é através do isolamento térmico, com o uso de materiais isolantes que possuam elevada resistência térmica nas paredes e, principalmente, na cobertura, a superfície mais exposta à radiação solar, para reduzir a transmissão do calor do exterior para o interior. Pode-se ainda empregar de forma combinada o isolamento com a inércia térmica, ou seja, com materiais que possuam elevada capacidade térmica, possibilitando o atraso e o amortecimento do fluxo de calor que é transmitido pelos componentes opacos. Nesse caso, porém, é necessária precaução com o uso da ventilação, pois caso a temperatura externa esteja mais elevada que a temperatura interna, há prejuízo imediato ao conforto térmico dos ocupantes, com a elevação da temperatura do ar interno. Além disso, o calor pode ser acumulado na envoltória e posteriormente transmitido para os ambientes internos.

Capacidade térmica é uma propriedade dos componentes construtivos que indica a quantidade de calor necessária para elevar sua temperatura em uma unidade, por cada unidade de área. Quanto maior a capacidade térmica dos componentes de uma edificação (paredes e cobertura), maior sua inércia térmica e, por conseguinte, maior o amortecimento dos picos de temperatura internos em relação aos valores correspondentes no ambiente externo.

Considerando-se tais aspectos, percebe-se a importância de se incorporar ao projeto arquitetônico mecanismos que possibilitem manipular as condições de ventilação e iluminação natural sem prejudicar o conforto dos usuários, e estes devem manipular as aberturas e os dispositivos de sombreamento nos horários adequados.

No inverno, a queda nas temperaturas e a incidência de ventos com velocidade elevada nos períodos frios, praticamente em todas as orientações, demandam a adoção de outras estratégias para manter condições adequadas de conforto nos ambientes internos (GOULART, 1993). Assim como no verão, não basta um projeto adequado: as condições de uso também afetam o desempenho térmico da edificação. O mês de julho é considerado o mês mais frio, cuja temperatura mínima média corresponde a 13ºC. Nesse caso, recomenda-se o aproveitamento da insolação para aquecimento solar passivo, devendo-se restringir a ventilação para evitar as perdas de calor. No inverno, o uso da massa térmica para aquecimento é uma estratégia com elevado potencial de aplicação: pode-se acumular o calor nas paredes e coberturas, desde que sejam constituídas por materiais com elevada capacidade térmica, controlando-se as condições de ventilação e insolação para preservar as temperaturas mais elevadas nos ambientes internos.

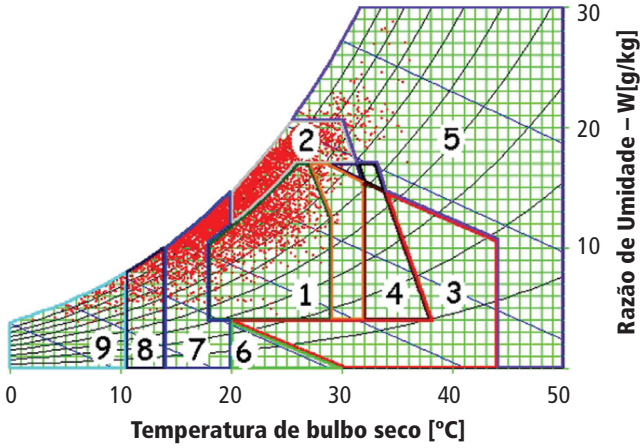
A análise bioclimática, necessária para a definição de soluções arquitetônicas capazes de promover a adaptação do projeto ao clima, requer a análise de diversas variáveis ambientais: temperatura e umidade relativa do ar, insolação, incidência e velocidade dos ventos predominantes. Diversas ferramentas podem ser utilizadas para a realização desta análise, a exemplo da carta solar, destinada à análise da incidência da insolação nas aberturas e da carta psicrométrica. Sobre a carta psicrométrica são delimitadas diversas zonas, correspondentes aos limites da zona de conforto e aos limites de aplicação de cada estratégia. Inserindo-se os dados referentes às variáveis climáticas de um determinado local, é possível identificar quais as estratégias bioclimáticas mais adequadas para favorecer o conforto térmico.

Zona de conforto: as zonas de conforto limitam os parâmetros físico-ambientais, definindo limites nos quais o conforto térmico é estabelecido. Podem ser representadas através de nomogramas e cartas bioclimáticas. Vários pesquisadores já se dedicaram a identificar limites para a zona de conforto, destacando-se Olgyay (1968), Watson e Labs (1983) e Givoni (1992), entre outros. Para Givoni (1992), o limite máximo da zona de conforto para países de clima tropical, a exemplo do Brasil, pode ultrapassar os 29ºC, para velocidades do ar da ordem de 2 m/s.

A Figura 3.1 ilustra a carta de Florianópolis, onde foram inseridos dados referentes às 8.760 horas do ano climático de referência. Para cada uma das estratégias bioclimáticas indicadas há um percentual de horas relativo ao total de horas do ano climático de referência. Para Florianópolis, as principais estratégias são a ventilação, com 35,5%, para resfriamento, e a inércia térmica e aquecimento passivo para ganho de calor, com 35,4%.

As estratégias bioclimáticas mais recomendáveis para o clima de Florianópolis foram incorporadas ao projeto da Casa Eficiente e puderam ser testadas *in loco* a partir do monitoramento térmico desenvolvido

pela equipe do LMBEE. Os resultados apresentados a seguir demonstram como ocorrem diversos fenômenos que caracterizam o desempenho térmico de uma edificação residencial, no verão e no inverno.



1) Conforto – 20,8%
2) Ventilação – 35,5%
4) Ventilação/massa térmica para resfriamento / resfriamento evaporativo – 0,9%
5) Condicionamento artificial – 1,7%
7) Massa térmica para aquecimento / aquecimento solar passivo – 35,4%
8) Aquecimento solar passivo – 3,8%
9) Aquecimento artificial – 1,5%

FIGURA 3.1 – Carta bioclimática de Florianópolis.

3.2. Compreendendo o efeito da inércia térmica no verão

Edificações cujos elementos construtivos possuem uma elevada capacidade de armazenamento de calor, a exemplo da Casa Eficiente, podem tirar proveito do efeito da inércia térmica nos períodos quentes para favorecer uma menor elevação da temperatura interna. O efeito da inércia térmica ocorre quando os picos de temperatura em relação aos valores máximos e mínimos verificados no ambiente externo são amortecidos. Desse modo, a temperatura interna tem sua amplitude reduzida (diferença entre os valores máximos e mínimos) e varia com valores próximos à temperatura média externa do período. Para que esta estratégia obtenha resultados satisfatórios, é de fundamental importância considerar também quais as condições de ventilação à qual a edificação está sujeita.

A seguir, serão apresentados os resultados de dois experimentos de controle da ventilação na Casa Eficiente. No primeiro, a edificação foi mantida completamente fechada, com todas as suas janelas sombreadas pelas persianas e sem ocupação. No segundo experimento, as esquadrias foram mantidas abertas pela manhã e pela tarde, permitindo a entrada da ventilação, inclusive nos horários mais quentes do dia.

3.2.1. Não ventilar no verão?

Observando-se a variação da temperatura externa e da temperatura interna no quarto de casal da Casa Eficiente entre os dias 27/12 e 31/12 de 2007 (Figura 3.2), pode-se observar o efeito da inércia térmica no verão: o amortecimento e o atraso dos picos de temperatura no ambiente interno em relação ao ambiente externo.

Nesses dias, a Casa Eficiente foi mantida completamente fechada, com todas as suas janelas sombreadas pelas persianas e sem ocupação. Foram registradas temperaturas externas máximas superiores a 34ºC, enquanto as temperaturas internas mantiveram-se entre 26,7 ºC e 28,9ºC. A temperatura média externa para esta sequência de dias foi igual a 27,3ºC, ou seja, a temperatura interna manteve-se próxima

à média externa. Tomando-se como exemplo o dia 28/12, quando a temperatura externa máxima foi igual a 34,8 ºC às 15h, o amortecimento no pico de temperatura máxima foi de 6,8ºC, registrando-se a temperatura máxima interna igual a 28 ºC. Isto ocorre 2h após o registro da temperatura máxima externa, indicando a ocorrência de atraso térmico na temperatura interna.

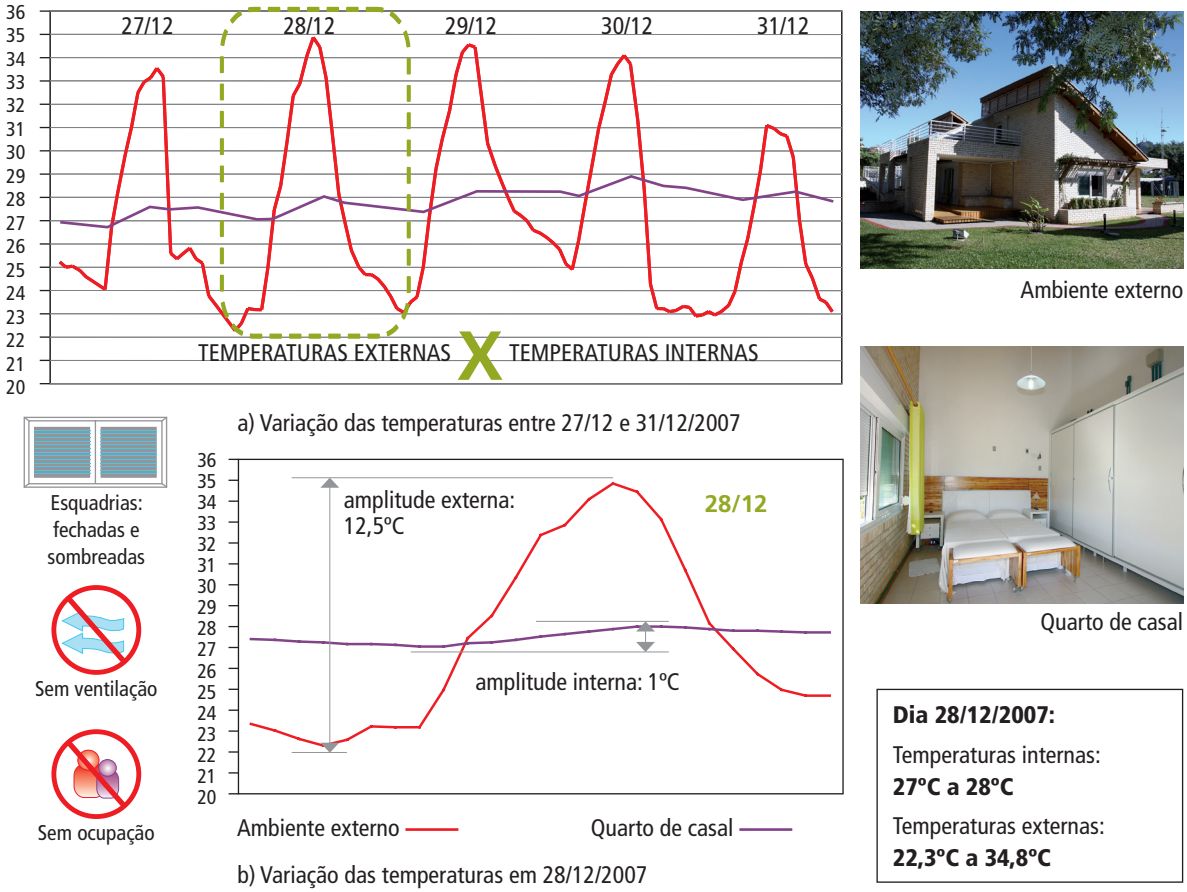


FIGURA 3.2 – Variação das temperaturas durante o período 27/12 a 31/12/07 (esquadrias permanentemente fechadas, assim como as persianas).

Estes efeitos foram obtidos devido a diversos fatores. Em primeiro lugar, graças às características construtivas da Casa Eficiente, que além de possuir componentes com elevada inércia térmica, possui também isolamento de lã de rocha no interior das paredes duplas de tijolo maciço, assim como na cobertura de telha cerâmica do quarto de casal (composta ainda por manta refletiva de alumínio e forro de madeira). Tais características dificultam a transmissão dos fluxos de calor do exterior para o interior. Mas, além disso, as condições de uso no período, quando a edificação permaneceu desocupada, com todas as suas janelas e portas fechadas e totalmente sombreadas, mantendo-se as persianas externas também fechadas a fim de evitar quaisquer ganhos de calor, foram fundamentais para maximizar o efeito da inércia térmica.

Observando-se as temperaturas externas registradas no período noturno, é possível identificar o potencial de aplicação de outra estratégia bioclimática: a ventilação noturna. Em ambientes naturalmente ventilados, a temperatura das superfícies internas tende a se aproximar da temperatura externa, devido às trocas de calor por convecção, de modo que essa estratégia é bem-vinda quando as temperaturas externas são inferiores

às internas. Conforme ilustrado na Figura 3.3, no intervalo entre 21h e 7h (destacado em azul), as temperaturas externas são menores que as temperaturas internas. Com o emprego da ventilação noturna, favorecer-se-ia o resfriamento das superfícies internas nesses horários, evitando o acúmulo de calor na envoltória e facilitando a absorção de uma nova onda de calor no dia subsequente. Além disso, o fluxo de ar direcionado para os usuários favoreceria o conforto térmico exatamente no período em que o quarto estaria ocupado.

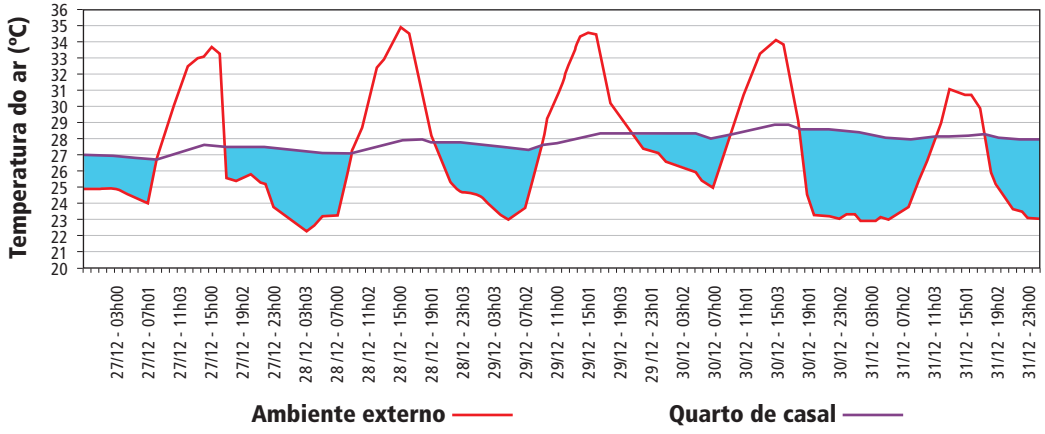


FIGURA 3.3 – Variação das temperaturas do ar externo e interno (quarto de casal). Em destaque, diferenças de temperatura no período noturno.

Entretanto, exatamente nesses horários verifica-se a ocorrência de calmaria, ou seja, ausência de vento. Na Figura 3.4 estão indicadas as frequências de ocorrência de calmaria, ao longo das horas do dia, nos dias mais quentes do ano (meses de outubro a março). Observa-se que a frequência de ocorrência é maior entre 19h e 7h, mantendo-se superior a 25%.

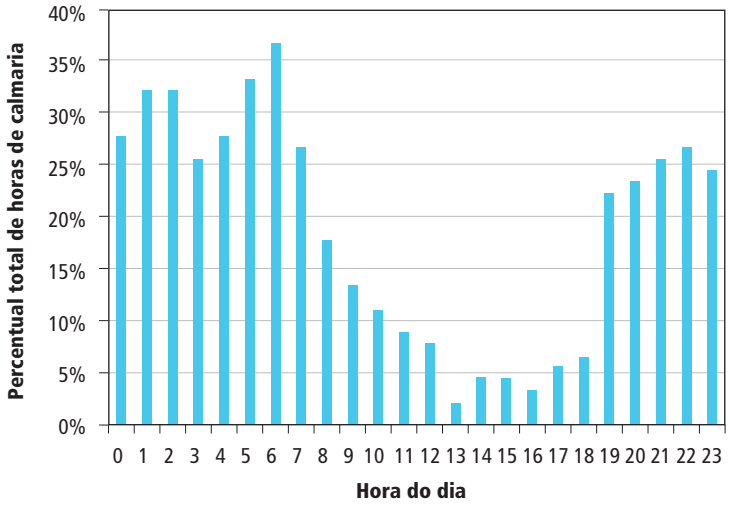


FIGURA 3.4 – Frequência horária de ocorrência de calmarias de vento em Florianópolis (período: outubro a março). Fonte: TRY Florianópolis (LabEEE, 2008).

Arquivo climático TRY (Test Reference Year) ou Ano Climático de Referência é constituído por dados climáticos relativos a um ano real que melhor representa as condições climáticas de uma determinada localidade. O TRY é selecionado a partir de procedimentos estatísticos e contém dados horários de temperatura, umidade relativa, radiação, ventilação, entre outras variáveis, podendo ser utilizado também em simulações de modelos computacionais.

Como alternativa para aproveitar esse potencial de resfriamento tem-se como opção a ventilação mecânica noturna, que consiste na ventilação forçada com o auxílio de insufladores, equipamentos destinados a insuflar o ar externo e introduzi-lo no interior dos ambientes. Esta estratégia também foi aplicada na Casa Eficiente e sua eficácia será avaliada no Capítulo 4.

Convém salientar que o experimento ora apresentado representa a condição ideal para o aproveitamento da inércia térmica. Entretanto, em uma residência efetivamente ocupada, mesmo com características construtivas semelhantes, as situações normais de uso seriam diferenciadas, devido à sua ocupação pelos usuários e à admissão da ventilação e da radiação através da abertura das janelas. Tais interferências também foram observadas no monitoramento da Casa Eficiente, conforme será discutido a seguir.

3.2.2. Ventilar no verão?

Nos períodos quentes, o uso da ventilação pode prejudicar o desempenho térmico de edificações construídas com materiais de elevada inércia térmica, como é o caso da Casa Eficiente. Isto acontece porque os componentes construtivos, principalmente paredes e cobertura, armazenam o calor advindo do exterior.

Quando uma edificação está sob a influência da ventilação natural, as superfícies internas mantêm contato com os fluxos de ar, cujas temperaturas correspondem à temperatura externa. Na sequência, ocorrem trocas de calor entre a superfície e o ar nas proximidades, principalmente por convecção. Caso a temperatura externa seja superior às temperaturas internas, a tendência é que essas trocas de calor resultem na elevação das temperaturas superficiais internas com o acúmulo de calor na parede.

Convecção é um mecanismo de transferência de calor que ocorre nos fluidos (ar, água, etc.). Nas edificações, pode ocorrer devido às trocas de calor entre as superfícies da edificação e o ar em movimento, introduzido pela ventilação natural.

A Figura 3.5 ilustra a incidência dos ventos e suas respectivas velocidades no entorno da Casa Eficiente, no período compreendido entre 7 e 11/01/2008. Nesse período, a ventilação natural foi empregada pela manhã (entre 9h e 12h) e à tarde (entre 14h e 17h) incluindo os horários nos quais a temperatura externa atingiu seus valores máximos. Com relação à incidência dos ventos, foram identificadas como direções predominantes a Noroeste e a Norte, com velocidades predominantes nos intervalos acima de 0 até 6 m/s, conforme ilustrado na Figura 3.5. Sob tais condições, as salas de estar e jantar eram os ambientes mais expostos à influência da ventilação. Observa-se também que as velocidades mais frequentes do vento concentraram-se nas faixas até 4 m/s, identificando-se calmarias (velocidades = 0) em apenas 1% do período considerado (intervalo entre 9h e 17h).

Quando se avalia a incidência dos ventos predominantes, deve-se observar também a incidência da radiação solar. Em dias ensolarados, com a incidência da radiação direta há uma tendência para a elevação da temperatura do ar externo que, uma vez em movimento, irá penetrar na edificação e contribuir para o aumento da temperatura interna, caso esta esteja mais baixa em relação ao ambiente interno. Além disso, a penetração da radiação direta contribui para a elevação da temperatura interna e para o acúmulo de calor nos componentes da envoltória, sendo que na Casa Eficiente, todas as aberturas possuem dispositivos de sombreamento que bloqueiam a penetração da radiação direta nos horários mais quentes do dia (Figura 2.10).

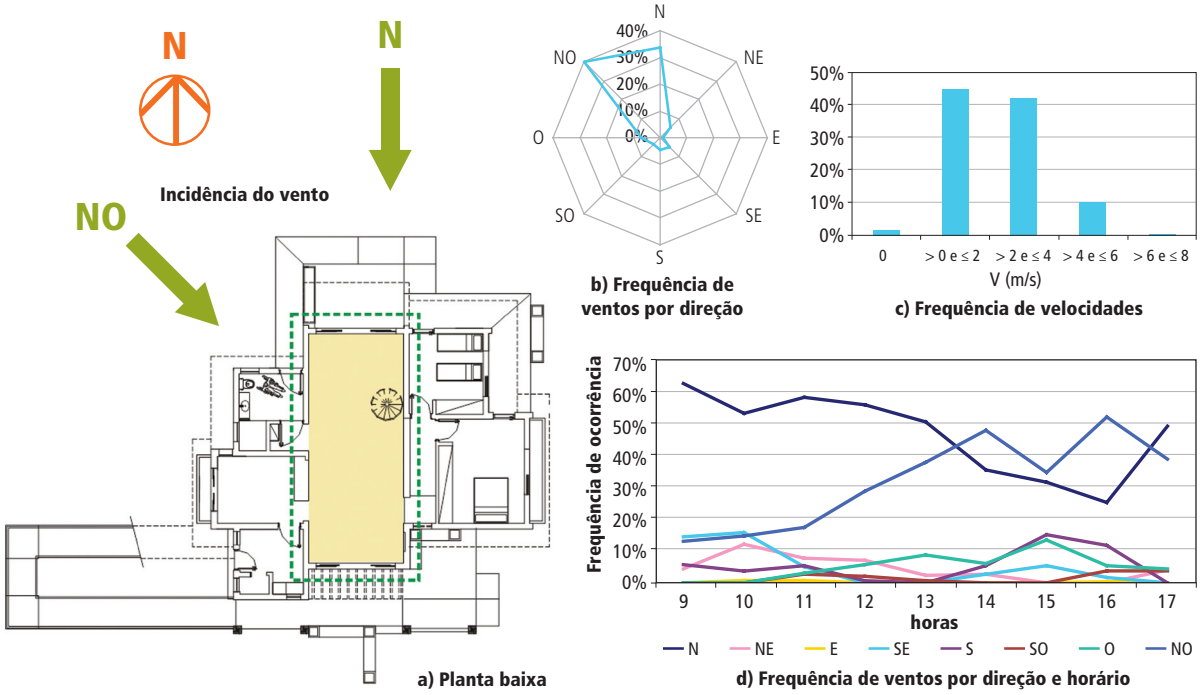


FIGURA 3.5 – Caracterização da incidência dos ventos predominantes: (a) em relação à Casa Eficiente; (b) frequência por direção, (c) por velocidades e (d) por direção e horário.

Para o período em análise, a Figura 3.6 indica os valores da radiação incidente no plano horizontal, variando entre 500 e 1100 Wh/m^2, coincidindo com os valores do arquivo climático de Florianópolis. Tais dados indicam a ocorrência de dias ensolarados, de modo que a radiação entre os dias 7 e 11/1 representou uma contribuição significativa para os ganhos de calor aos quais a edificação está sujeita.

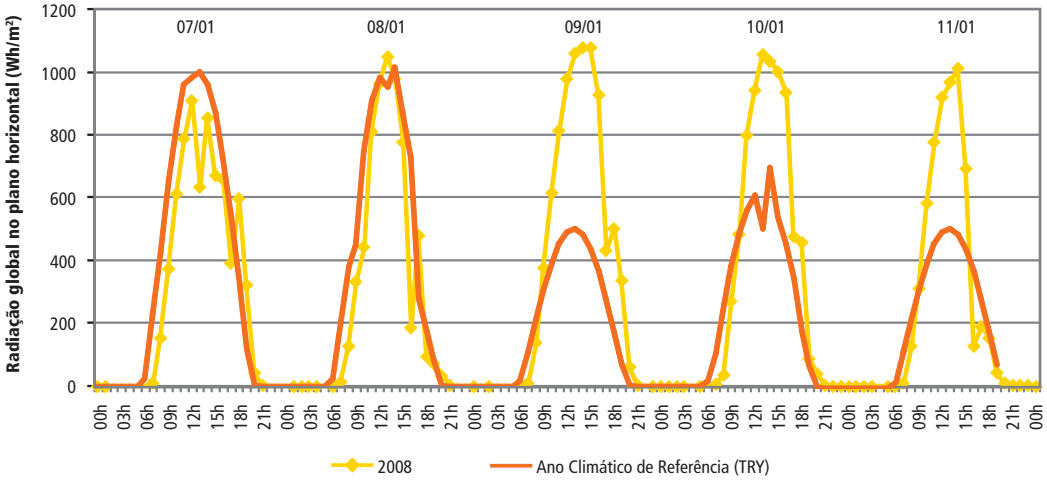


FIGURA 3.6 – Radiação global sobre o plano horizontal: registros de 2008 e do ano climático de referência (TRY). Período: 7 a 11/1.

Pode-se obter uma indicação do impacto da ventilação nos períodos quentes ao se observar a variação das temperaturas internas, comparando-as ao limite máximo da zona de conforto, utilizando-se como referência o valor indicado por Givoni (1992) para países tropicais: 29ºC. A Figura 3.7 ilustra a variação

das temperaturas internas e externas no período considerado. Tomando-se como referência as temperaturas registradas no dia 10/1, destacado no gráfico, observa-se que as temperaturas internas ultrapassam o limite de 29ºC, verificando-se o efeito negativo da admissão da radiação e da ventilação nos períodos quentes.

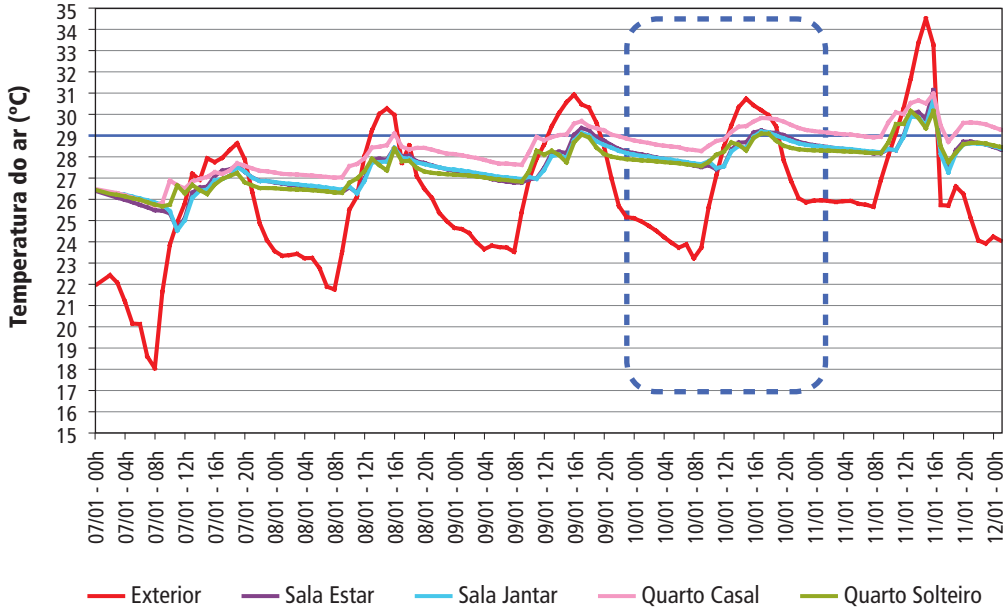
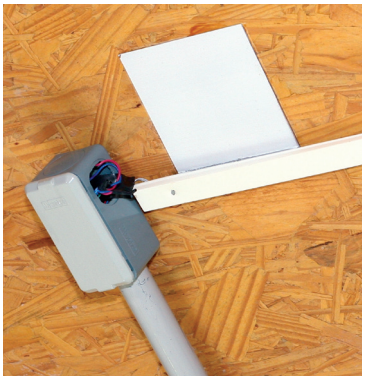


FIGURA 3.7 – Variação das temperaturas externas e internas no período de 7 a 11/01/2008.

Quanto ao acúmulo de calor na envoltória em decorrência da ventilação, podem-se ilustrar as trocas de calor entre os componentes construtivos e o ar interno com base no comportamento térmico das salas de estar e jantar. Nestes ambientes, as temperaturas superficiais internas e externas e o fluxo de calor, medido em W, são mensurados através de sensores posicionados na parede lateral (orientação Oeste) e no teto da sala de estar, Figuras 3.8(a) e 3.8(b), e no piso da sala de jantar (Figura 3.8(c)).

Com relação às temperaturas superficiais externas (Figura 3.9), verifica-se que a parede Oeste e a cobertura da sala de jantar apresentam valores mínimos e máximos semelhantes, sendo que as temperaturas máximas da cobertura são atingidas por volta das 12h, enquanto o mesmo ocorre por volta das 16h na parede Oeste.

(a)


(b)

(c)

FIGURA 3.8 – Fluxímetros destinados à medição do fluxo de calor, posicionados nas salas de estar e jantar: (a) parede Oeste, (b) teto e (c) piso.

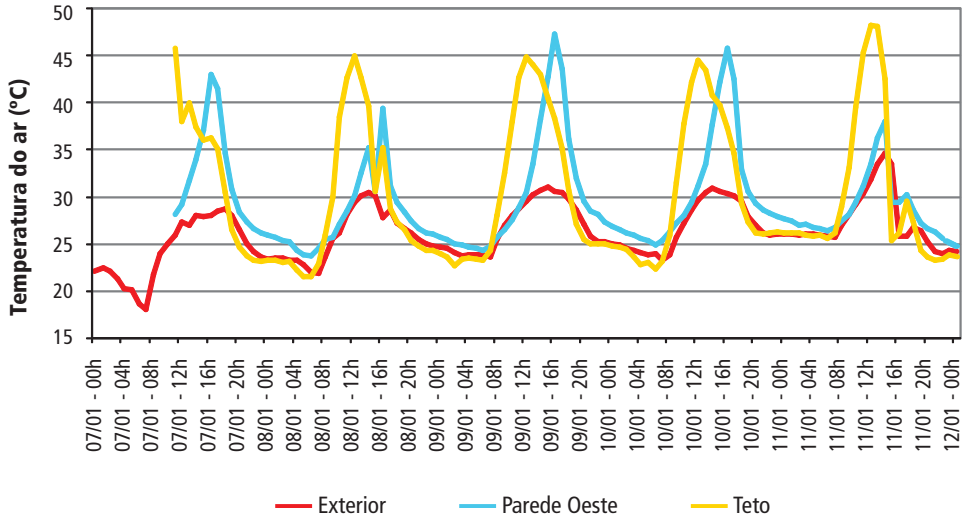


FIGURA 3.9 – Variação das temperaturas externas e superficiais externas no período de 7 a 11/01/2008: sala de estar, parede Oeste e teto.

Entretanto, a parede Oeste, por apresentar capacidade térmica maior, acumula o calor recebido entre 10h e 18h (em amarelo, na Figura 3.10) e transmite-o para o ambiente interno à noite (em azul, na Figura 3.10). Já a cobertura, superfície mais exposta à radiação solar, transmite calor para o ar ambiente (fluxos positivos, destaque em amarelo), entre 9h e 20h (Figura 3.11). Ou seja, nesses horários ocorre transmissão contínua do calor para o ambiente interno, ao invés de acúmulo de calor neste componente. À noite, o sentido dos fluxos de calor sofre uma inversão e a cobertura passa a absorver o calor interno, conforme indicado pelos fluxos negativos representados na Figura 3.11 (destaque em azul).

O piso apresenta comportamento diverso das outras superfícies, funcionando durante as 24h diárias como componente responsável pela absorção de calor (fluxos sempre negativos), conforme indicado na Figura 3.12. Tal comportamento se deve ao fato desta superfície não estar exposta à insolação, sendo que o contato com a terra, que possui uma elevada inércia térmica, favorece que a mesma mantenha temperaturas mais baixas em relação aos demais componentes da envoltória da edificação (paredes e cobertura). Por conseguinte, a temperatura superficial interna do piso permanece estabilizada, com amplitudes diárias inferiores a 1ºC, conforme indicado na Figura 3.12.

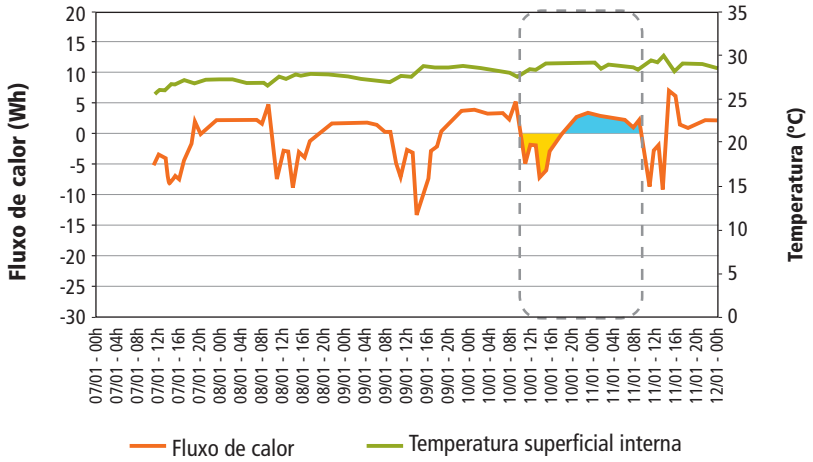


FIGURA 3.10 – Variação das temperaturas superficiais internas e fluxos de calor no período de 7 a 11/01/2008: sala de estar, parede Oeste.

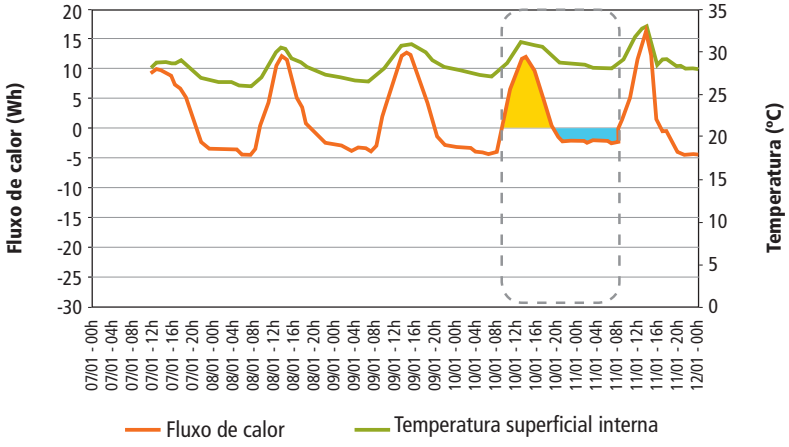


FIGURA 3.11 – Variação das temperaturas superficiais internas e fluxos de calor no período de 7 a 11/01/2008: sala de estar, cobertura.

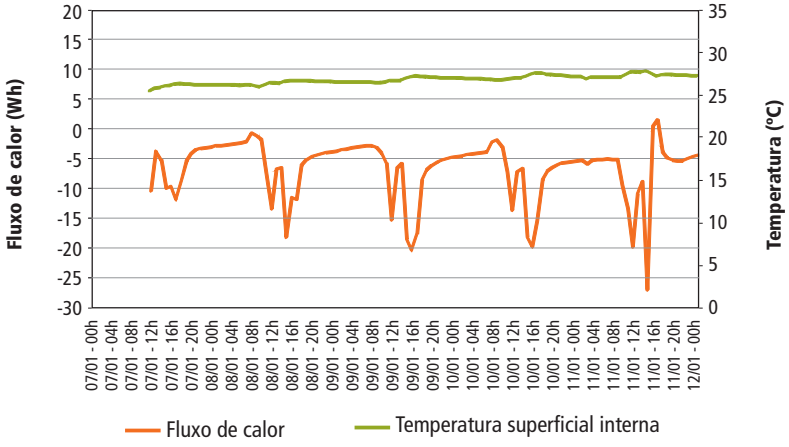


FIGURA 3.12 – Variação das temperaturas superficiais internas e fluxos de calor no período de 7 a 11/01/2008: sala de jantar, piso.

Por fim, pode-se observar também que o efeito da exposição contínua à ventilação e à radiação quando a temperatura externa é elevada tem efeito cumulativo em edificações com elevada inércia térmica, como é o caso da Casa Eficiente. Uma vez que a edificação foi mantida sob as mesmas condições de operação durante uma sequência de dias ensolarados, caracterizados por ventos frequentes e temperaturas externas elevadas, a temperatura média interna sofreu uma elevação gradual, de modo que a cada dia este valor aumentava em relação ao dia anterior, conforme ilustrado na Figura 3.13.

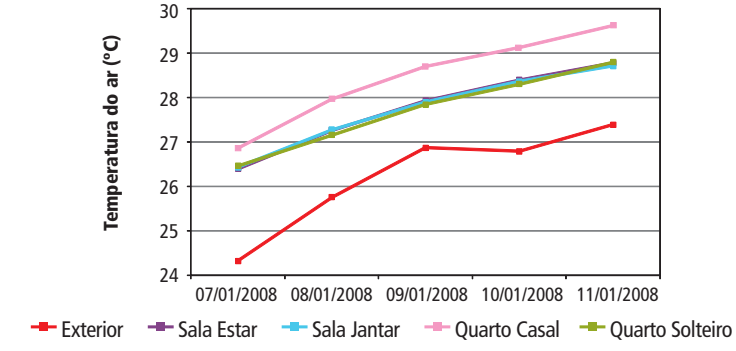


FIGURA 3.13 – Variação das temperaturas médias externa e internas no período de 7 a 11/01/2008.

Conforme o exemplo ilustrado na Figura 3.13, sob efeito da inércia térmica, a temperatura do ar interno tende a acompanhar a variação da temperatura média externa do período considerado. Observando-se os dados do arquivo climático de Florianópolis, verifica-se que a temperatura média mensal é igual a 24,8ºC (GOULART, 1993), e que o intervalo no qual as temperaturas médias horárias do ar ultrapassam este valor encontra-se entre 9h e 17h (Tabela 3.1), sendo este o período mais quente do dia. No caso do período em análise, tomando-se como exemplo o dia 10/1 (Figura 3.14), verifica-se que exatamente no intervalo entre 11h e 15h as temperaturas internas sofrem elevações de 1ºC até 2ºC, sendo que as amplitudes diárias das temperaturas internas variam entre 2ºC e 3ºC nos diversos ambientes.

TABELA 3.1 – Temperaturas médias horárias no mês de janeiro: arquivo climático TRY de Florianópolis. (Fonte: adaptado de PAPST, 1999).

Hora	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Temperatura média (ºC)	22,7	22,6	22,6	22,5	22,3	22,4	23,4	24,6	25,7	26,8	27,7	28,4
Hora	**13**	**14**	**15**	**16**	**17**	**18**	**19**	**20**	**21**	**22**	**23**	**24**
Temperatura média (ºC)	28,6	28,4	27,9	26,8	26,1	24,7	24,2	23,8	23,6	23,3	23	22,7

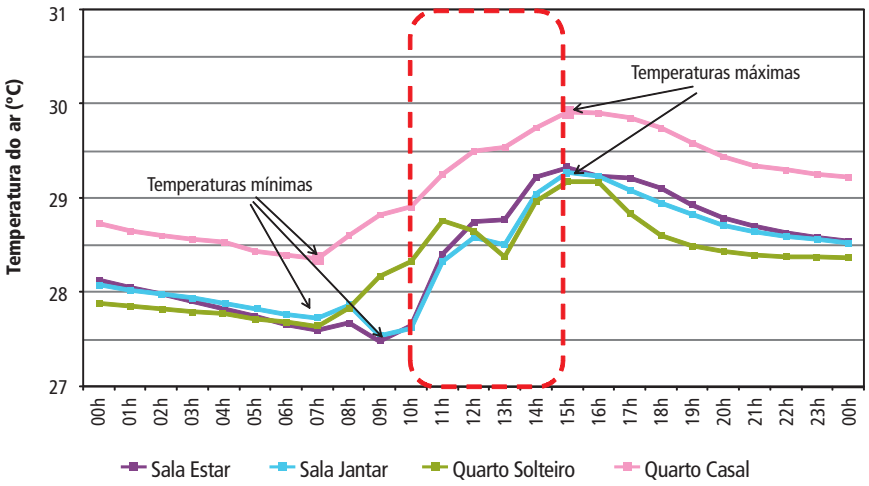


FIGURA 3.14 – Variação das temperaturas médias internas no dia 10/01/2008.

De acordo com o que foi demonstrado no experimento realizado na Casa Eficiente, cuja envoltória possui elevada inércia térmica, nos horários mais quentes do dia (entre 11h e 15h), as temperaturas internas estão sujeitas a uma maior elevação, devendo-se restringir o emprego da ventilação natural. Tais resultados demonstram que estas estratégias de condicionamento térmico devem ser utilizadas no verão de forma combinada, de modo que o emprego de uma não prejudique o desempenho da outra.

3.3. A ventilação natural como estratégia bioclimática

O papel da ventilação natural como estratégia bioclimática na Casa Eficiente deve ser compreendido de acordo com as exigências de conforto térmico específicas de cada período do ano. Conforme já mencionado nos itens anteriores, uma vez que a edificação possui uma elevada inércia térmica, o controle das condições

de ventilação é essencial para garantir que as condições de conforto térmico nos ambientes internos sejam mantidas. Desse modo, no verão a ventilação deve ser restringida nos horários em que a temperatura externa é mais elevada (entre 11h e 15h), enquanto no inverno a ventilação não deve ser empregada excessivamente, para evitar as perdas de calor da estrutura, o que resulta no resfriamento da temperatura interna.

Todavia, a função da ventilação não se resume à remoção da carga térmica da edificação. Manter a qualidade do ar interno, através de taxas de renovação de ar adequadas, e promover o resfriamento fisiológico dos usuários são finalidades que se complementam (CÂNDIDO, 2006). Com relação ao conforto térmico, ao favorecer a evaporação do suor, o movimento do ar reduz a temperatura efetiva, ampliando o limite de conforto térmico. Para facilitar a compreensão, imaginemos dois ambientes semelhantes, ocupados pela mesma quantidade de pessoas e possuindo os mesmos equipamentos (eletrodomésticos e iluminação artificial), apresentando a mesma configuração construtiva (forma da edificação e materiais empregados) e orientados para a mesma direção. Se ambos os ambientes possuem a mesma temperatura do ar, mas um deles encontra-se totalmente fechado e outro sob influência da ventilação natural, os usuários deste estarão sujeitos ao efeito refrescante da ventilação, resultante da evapotranspiração do suor, devido ao movimento do ar sobre a pele, propiciando condições de conforto mais favoráveis em relação ao ambiente não ventilado.

Entretanto, a avaliação do desempenho da ventilação natural é uma tarefa complexa, pois lida com um fenômeno que possui um comportamento extremamente variável: o vento, o ar em movimento. O vento apresenta velocidade e direção que não são constantes, além de estar sujeito a interferências que também devem ser consideradas pelo projetista, embora seja difícil quantificar com precisão o efeito das mesmas. Um exemplo disso é a influência do entorno edificado, que altera tanto a direção quanto a velocidade do vento que incide na edificação: distribuição espacial dos edifícios e altura dos mesmos, inclinações de beirais e telhados, existência de cercas e muros e a presença da vegetação (BITTENCOURT e CÂNDIDO, 2006).

Já com relação à ventilação nos ambientes internos, três fatores principais determinam a configuração dos fluxos de ar: o tamanho e a localização das aberturas de entrada e saída do ar; o tipo e a configuração das aberturas e a localização de outros componentes, tais como divisórias internas, marquises e brises (BITTENCOURT e CÂNDIDO, 2006).

Considerando-se a importância dos aspectos aqui mencionados, a avaliação do desempenho da ventilação natural na Casa Eficiente ora apresentada está restrita a aspectos qualitativos referentes à distribuição dos fluxos de ar no interior dos ambientes. Para tal, foram selecionados aqueles ambientes que apresentam maiores períodos de ocupação nas residências (salas de estar/jantar e quartos). São apresentadas, também, alternativas para o posicionamento das aberturas de entrada e saída do vento, com base em simulações computacionais simplificadas[1].

O projeto arquitetônico da Casa Eficiente adotou como premissa o aproveitamento da ventilação natural, tendo sido utilizados os seguintes critérios para a definição do posicionamento das aberturas (portas e janelas):

- Orientação das aberturas para os ventos dominantes no verão (Norte e Nordeste);
- Posicionamento das aberturas em paredes opostas, para favorecer a ventilação cruzada;

1 As simulações aqui apresentadas possuem caráter simplificado e didático. O programa computacional utilizado considera o fluxo do vento laminar, desconsiderando as turbulências verificadas na prática. Uma investigação mais aprofundada pode ser realizada com a utilização de programas de simulação baseados na Dinâmica dos Fluidos Computadorizada (CFD) (CHOW, 2003, apud CÂNDIDO, 2006).

- Preocupação com os dispositivos de fechamento das aberturas, devido às baixas temperaturas durante o inverno (vidros duplos e persianas incorporadas às esquadrias);
- Preocupação com os ventos provenientes do Sul, para minimizar o desconforto no inverno: utilização de barreiras para diminuir a velocidade e ausência de aberturas na fachada Sul.

Considerando-se tais premissas de projeto, a investigação acerca do desempenho real da ventilação cruzada depende de uma análise da distribuição dos fluxos de ar, proporcionada pelas aberturas de entrada e saída do vento nos diversos ambientes. Além da disposição dessas aberturas na fachada, as possibilidades de manipulação das esquadrias e a combinação entre as mesmas interferem na distribuição dos fluxos de ar nos ambientes internos. Na Casa Eficiente, as janelas de correr possuem duas folhas, ambas com a possibilidade de abertura, sendo que a área útil para o aproveitamento da ventilação é de 50% do vão. No caso das portas das salas de estar e jantar, é possível manter o vão central totalmente aberto (Figura 3.15).

FIGURA 3.15 – Tipologias de esquadrias existentes na Casa Eficiente: (a) Porta Sul (sala de jantar) e (b) Janela Leste (quarto de solteiro).

Foram avaliados os quartos e a sala de estar/jantar, variando-se a posição das esquadrias a fim de verificar o impacto das diferentes combinações de aberturas na distribuição do fluxo de ar nos ambientes. Foram realizadas medições da velocidade do ar mantendo-se abertas as portas interna e externa de cada quarto, enquanto as janelas eram manipuladas conforme ilustrado na Figura 3.16 (condição 1 e condição 2). Também foi realizada uma terceira medição da velocidade do ar, denominada condição 3, quando foi mantida aberta apenas a porta interna de cada quarto, enquanto as janelas permaneceram abertas conforme a condição 1 ilustrada na Figura 3.16 (a). No caso das salas de estar e jantar, as portas existentes nas fachadas Norte e Sul foram mantidas abertas durante todos os experimentos.

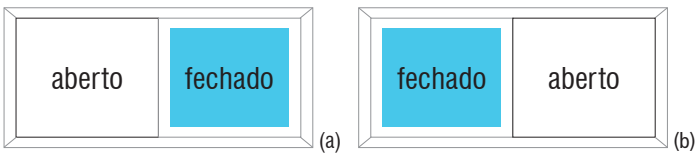


FIGURA 3.16 – Condições de abertura das janelas durante a realização dos experimentos nos quartos: (a) condição 1 e (b) condição 2.

Para caracterizar a distribuição do fluxo de ar no interior dos ambientes, foram realizados experimentos com uma máquina geradora de fumaça (Figura 3.17). Com o auxílio deste equipamento, foi registrado o percurso do fluxo de ar no interior dos ambientes, assim como as zonas de formação de vórtices (zonas

de recirculação do ar), permitindo uma análise qualitativa do desempenho da ventilação cruzada proposta no projeto.

Os experimentos foram realizados no dia 26/10/06. Durante as medições, a direção Norte foi predominante para o vento no exterior da edificação (Figura 3.18). De acordo com o arquivo climático de Florianópolis, essa direção é predominante ao longo de todo o ano (Figura 3.19).

FIGURA 3.17 – Máquina de fumaça utilizada nos experimentos.

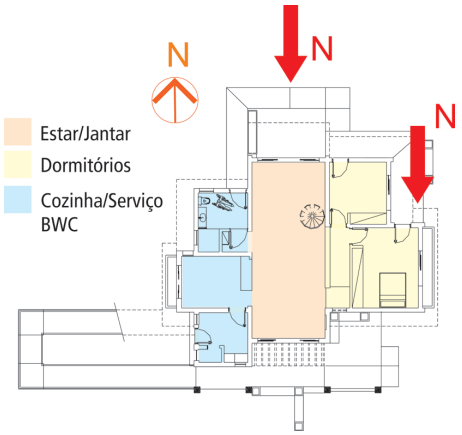


FIGURA 3.18 – Incidência predominante dos ventos durante os experimentos (26/10/06).

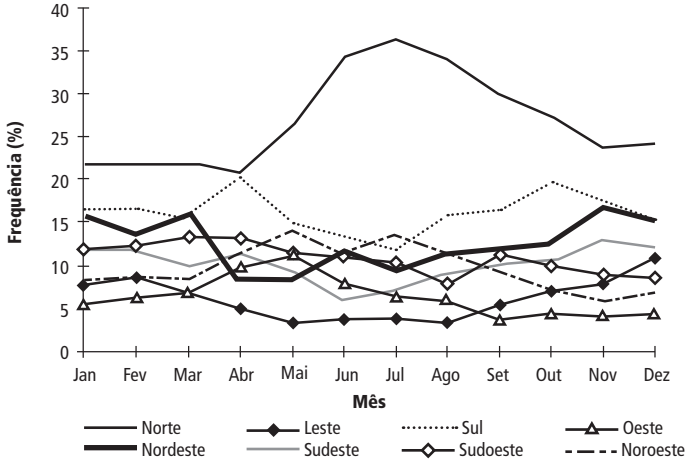


FIGURA 3.19 – Frequência de ocorrência de vento em Florianópolis, por direção.

Os resultados expostos a seguir demonstram a distribuição do fluxo de ar obtido pela utilização da máquina de fumaça nas salas de estar/jantar e nos quartos, para a incidência do vento Norte.

Com o auxílio da máquina de fumaça e mantendo-se as esquadrias abertas, pôde-se identificar visualmente as áreas onde ocorreu uma maior concentração do fluxo de ar (Figura 3.20). Em seguida, foram posicionados os instrumentos de medição da velocidade do ar em dois pontos para cada ambiente, com o intuito de mensurar a velocidade do ar em cada um, obtendo-se uma indicação da distribuição dos fluxos de ar. A Figura 3.21 ilustra a distribuição dos fluxos de ar nas salas de jantar e estar.

Considerando-se a incidência Norte e mantendo-se ambas as portas abertas, observa-se a concentração do fluxo de ar insuflado na faixa central do ambiente e a formação de zonas de vórtices nas laterais dos mesmos. Os pontos de medição para a velocidade do vento, portanto, foram dispostos na faixa central das salas.

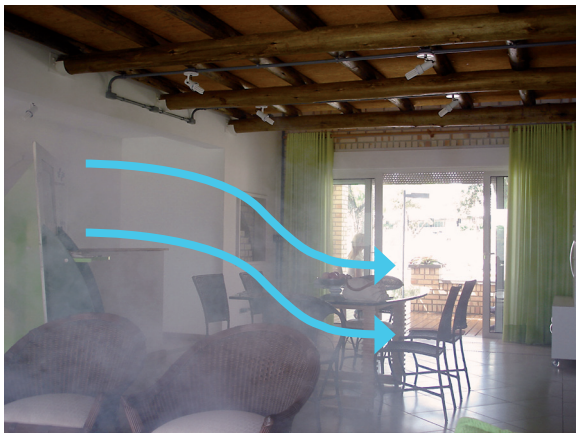


FIGURA 3.20 – Representação do fluxo de ar identificado durante o experimento.

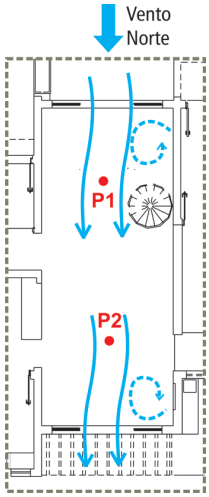


FIGURA 3.21 – Planta baixa ilustrativa da distribuição do fluxo de ar nas salas de jantar e estar.

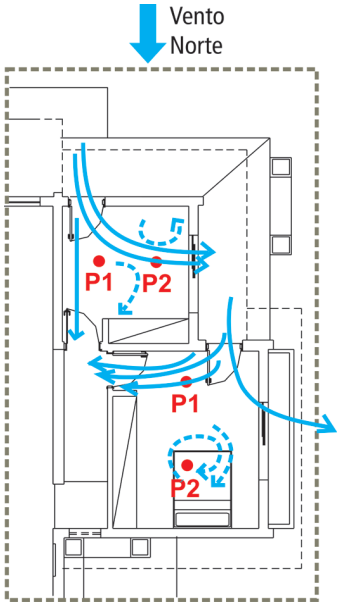
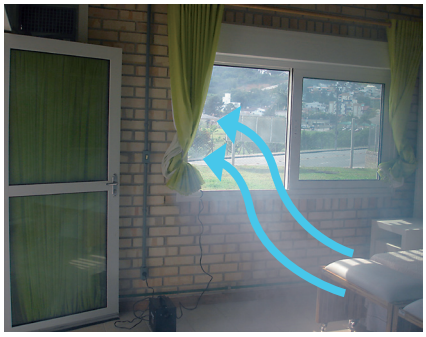


FIGURA 3.22 – Planta baixa ilustrativa da distribuição do fluxo de ar nos quartos.

Quanto aos quartos, constatou-se o direcionamento do fluxo de ar para as portas voltadas para o corredor e a formação de zonas de vórtices (zonas de recirculação do ar) onde estão localizadas as camas (Figura 3.22). Na condição 1, quando as portas externas encontram-se abertas, observou-se uma melhor distribuição dos fluxos de ar no quarto de casal (Figura 3.23(a)). No quarto de solteiro, a condição 2 apresentou uma melhor distribuição dos fluxos de ar (Figura 3.23(b)).



(a)

(b)

FIGURA 3.23 – Representação do fluxo de ar identificado nos quartos: (a) quarto de casal e (b) quarto de solteiro2.

Com as portas externas fechadas (Condição 3), verificou-se que a penetração dos fluxos de ar ocorreu de forma mais restrita, ampliando-se as zonas de recirculação em ambos os quartos (Figuras 3.24 e 3.25).

Associadas aos experimentos desenvolvidos com a máquina de fumaça, foram realizadas, simultaneamente, medições internas da velocidade do vento, nos pontos escolhidos de acordo com a distribuição

do fluxo de ar observada. Para tal, foram utilizados anemômetros posicionados a uma altura de 0,75 m em relação ao piso (Figura 3.26).

(a)

(b)

FIGURA 3.24 – Representação do fluxo de ar identificado nos quartos: (a) quarto de solteiro e (b) quarto de casal.

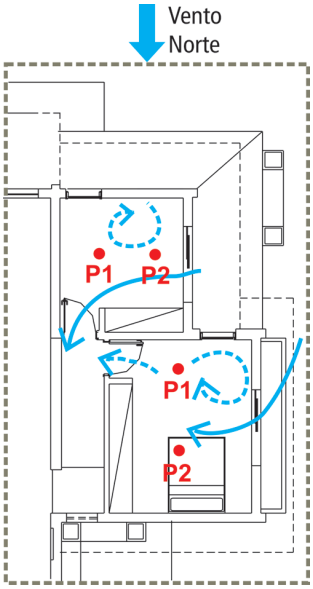


FIGURA 3.25 – Planta baixa ilustrativa da distribuição do fluxo de ar nos quartos.

FIGURA 3.26 – Medição da velocidade do ar no quarto de casal, efetuada com anemômetro.

Os valores de velocidade do ar registrados no interior dos ambientes analisados encontram-se enumerados na Figura 3.27. Verifica-se uma diferença de até 57% na velocidade do ar no ponto P2 (menor concentração do fluxo de ar) em relação ao ponto P1 (maior concentração do fluxo de ar).

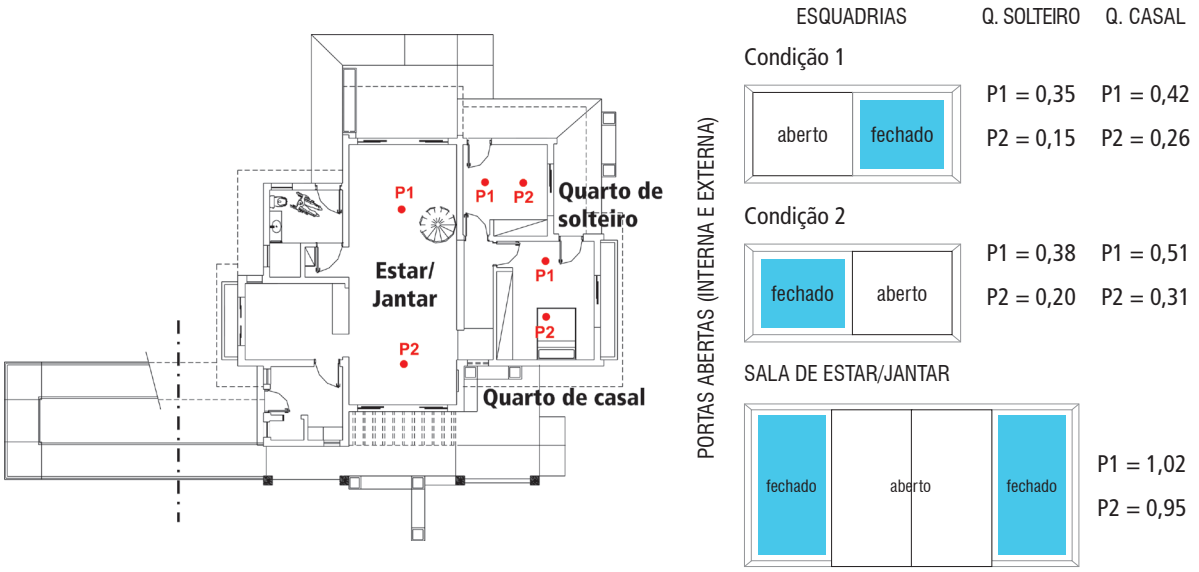


FIGURA 3.27 – Planta baixa indicando os pontos de medição e valores registrados de velocidade do ar (em m/s) nos quartos e sala de estar/jantar.

Na sala de estar/jantar, mantendo-se ambas as portas abertas, os valores de velocidade do ar registradas nos pontos P1 e P2 foram respectivamente iguais a 1,02 e 0,95 m/s, indicando uma distribuição mais uniforme do fluxo de ar neste ambiente do que aquela verificada nos quartos.

Sob tais condições, pôde-se constatar que a solução adotada no projeto para a disposição das esquadrias dos quartos resultou em uma distribuição dos fluxos de ar pouco uniforme, principalmente no quarto de casal. Neste ambiente, o alinhamento entre as aberturas (portas externa e interna e janela Leste) tende a concentrar o fluxo de ar nesta região, quando todas as esquadrias encontram-se abertas, dificultando a incidência na área ocupada pelas camas. Portanto, modificações na disposição das aberturas favoreceriam a melhor distribuição dos fluxos de ar. Uma alternativa para avaliar outras possibilidades é a realização de simulações computacionais, as quais foram realizadas com o auxílio do programa Fluxovento (CARVALHO et al., 2005).

Foram simulados os dois quartos da Casa Eficiente, de modo que o modelo computacional apresenta as mesmas características físicas da edificação. Foram adotados os seguintes parâmetros de análise:

- Plano de referência situado a uma altura de 0,75 m em relação ao piso, correspondente à altura de superfícies de trabalho utilizadas pelos usuários do ambiente, de acordo com a NBR 9050 (ABNT, 2004).
- Incidência dos ventos pelo quadrante Norte, sendo este predominante em Florianópolis e com maior potencial de aproveitamento para a ventilação dos ambientes internos (GOULART, 1993).

Comparando-se a distribuição dos fluxos de ar observada nos experimentos realizados com a máquina de fumaça e as simulações computacionais realizadas com o programa Fluxovento, verifica-se semelhança entre os resultados, conforme demonstrado na Figura 3.28.

A Figura 3.28 ilustra a simulação da ventilação natural atuando nos quartos, considerando-se as portas externas e internas abertas, representando a condição 1 monitorada durante os experimentos descritos anteriormente.

Convém salientar que trata-se de uma simulação simplificada, mas com base nos resultados é possível simular alternativas de modificação nas esquadrias, capazes de favorecer uma distribuição mais uniforme dos fluxos de ar nesses ambientes. As Figuras 3.29 e 3.30 ilustram outras alternativas simuladas, podendo-se verificar o efeito resultante de modificações na tipologia e disposição das aberturas quanto à distribuição dos fluxos de ar.

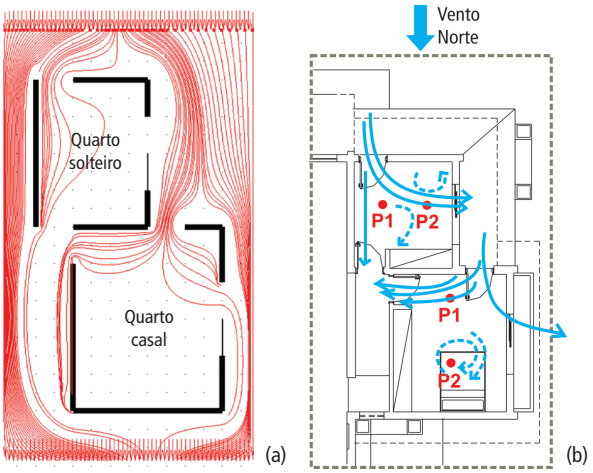


FIGURA 3.28 – Representação da distribuição dos fluxos de ar nos quartos (incidência de vento Norte): (a) simulação e (b) medições *in loco*.

As simulações ilustradas na Figura 3.29 representam o efeito resultante da modificação do posicionamento da janela do quarto de casal. Na alternativa (a) foram empregadas janelas de correr, semelhantes àquelas existentes na Casa Eficiente. Na alternativa (b), foram utilizadas janelas de abrir (100% do vão), observando-se que neste caso os fluxos de ar se distribuem de modo mais uniforme no quarto de casal.

As simulações ilustradas na Figura 3.30 representam o efeito resultante da modificação do posicionamento das janelas de ambos os quartos, dispostas nas extremidades opostas das fachadas orientadas a Leste. Na alternativa (a) foram empregadas janelas de correr e na alternativa (b), janelas de abrir. Observa-se que a distribuição dos fluxos de ar foi mais uniforme quando as esquadrias de abrir são utilizadas (Figura 3.30(b)), em comparação com a situação ilustrada na Figura 3.30(a), promovendo, também, maior penetração do vento no quarto de solteiro.

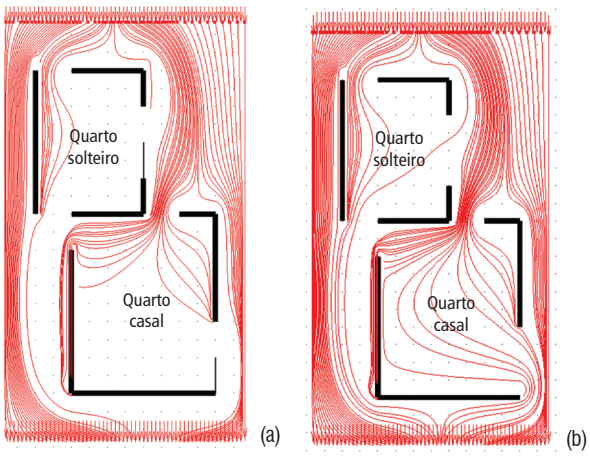


FIGURA 3.29 – Alteração no posicionamento da janela do quarto de casal: (a) esquadria de correr e (b) esquadria de abrir.

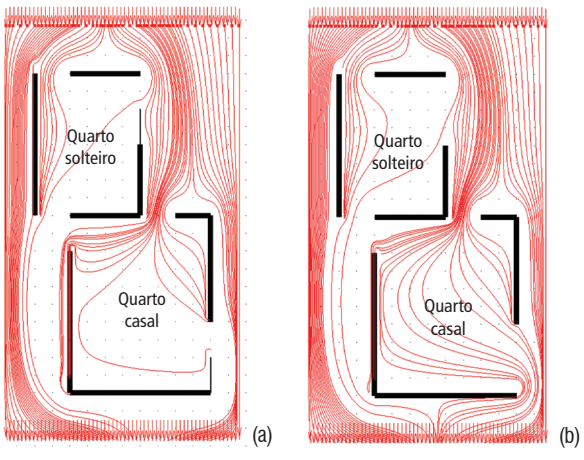


FIGURA 3.30 – Alteração no posicionamento das janelas de ambos os quartos: (a) esquadria de correr e (b) esquadria de abrir.

Convém salientar que os resultados ora apresentados correspondem a uma indicação do comportamento da ventilação natural na Casa Eficiente. Uma vez que não havia uma ocupação real que configurasse uma situação semelhante a uma residência, não foram realizados experimentos específicos relacionados às condições de conforto térmico sob diferentes condições de ventilação. Esse tipo de experimento é realizado geralmente com base em questionários dirigidos aos ocupantes dos ambientes, acompanhado do monitoramento da temperatura, umidade e velocidade do ar.

Os resultados ora apresentados limitam-se a demonstrar a influência da disposição e tipologia das aberturas sobre o aproveitamento da ventilação cruzada. Para tal, considerou-se apenas uma direção de vento predominante, a direção Norte, que apresenta a maior frequência de ocorrência durante todo o ano, dentre todas as possibilidades existentes. As medições e as simulações realizadas indicaram que a disposição das aberturas poderia ser melhorada, favorecendo a penetração da ventilação cruzada e contribuindo para o melhor aproveitamento deste recurso como estratégia de resfriamento no verão.

3.4. Compreendendo a inércia térmica no inverno: aquecimento solar passivo

Sob condições de inverno, a função dos componentes construtivos que possuem elevada inércia térmica é a de reter o calor armazenado no interior da edificação, evitando que as temperaturas se reduzam tanto quanto a temperatura externa. Para que isto ocorra, é necessário maximizar a admissão da insolação, aquecendo as superfícies internas. Outra medida estratégica para evitar as perdas de calor é restringir a ventilação, pois nessa época do ano os ventos frios contribuem para o resfriamento dos componentes construtivos, além de prejudicar o conforto térmico dos usuários. Tais questões estão diretamente relacionadas aos padrões de uso da edificação, de modo que o usuário deve saber manipular os dispositivos de controle da insolação e da ventilação para que se possa obter um desempenho térmico satisfatório.

Desse modo, um desses dispositivos de controle merece atenção especial: as esquadrias. É através delas que a insolação e a ventilação natural penetram no interior dos ambientes, podendo tais recursos ser regulados em função da tipologia da esquadria (pivotante, guilhotina, corrediça), da presença de elementos de sombreamento (brises fixos ou móveis, venezianas) e dos horários em que os mesmos são manipulados. No inverno, as esquadrias devem ser manipuladas considerando-se a necessidade de se maximizar os ganhos passivos de calor, o que pode ser favorecido pelo efeito estufa proporcionado pelas áreas envidraçadas, indesejável no verão, mas bem-vindo no inverno.

Efeito estufa: é o principal fenômeno responsável pela transformação da radiação solar em calor no interior de uma edificação. Ocorre quando a radiação solar de onda curta entra por uma abertura no edifício, incidindo nos objetos presentes nos ambientes internos (ex.: mobília e revestimentos), que se aquecem e emitem radiação de onda longa. O vidro, que é praticamente opaco à radiação de onda longa, impede a transmissão do calor para o exterior, resultando na elevação da temperatura interna.

A combinação entre o efeito estufa e a inércia térmica dos componentes construtivos, associada a um bom isolamento térmico, resulta na redução das perdas de calor para o ambiente externo. Acumulando-se o calor armazenado na envoltória, contribui-se para a manutenção de temperaturas mais elevadas no inverno e, por conseguinte, beneficia-se também o conforto térmico dos ocupantes.

Uma das principais fontes de calor é a insolação. Isto pôde ser constatado nos experimentos realizados na Casa Eficiente. A Figura 3.31 ilustra a variação das temperaturas externas e internas nos diversos ambientes da Casa Eficiente, entre os dias 19/08 e 23/08/07. Nesse período, os dias apresentaram-se ensolarados, o que pode ser constatado observando-se a Figura 3.32, que ilustra a radiação global no plano horizontal.

Observa-se o efeito da inércia térmica no inverno, com o amortecimento dos picos de temperatura nos ambientes internos em relação ao ambiente externo. Nesses dias, as esquadrias da Casa Eficiente foram mantidas completamente fechadas, mas todas as suas janelas permaneceram com as persianas externas abertas entre 8h e 12h. Nas salas de estar e jantar, as persianas também foram mantidas abertas entre 14h e 17h. As temperaturas externas registradas no período variaram entre 7,9ºC e 24,1ºC, enquanto as temperaturas internas mantiveram-se superiores ao limite de conforto considerado: 18ºC. No madrugada de 21/08, observa-se uma brusca redução na temperatura, atingindo 7,9ºC, enquanto no dia anterior o valor mínimo registrado foi igual a 13,1ºC. No dia 21/08, a diferença em relação à temperatura interna verificada na sala de jantar no mesmo horário (6h) foi igual a 10,6ºC, conforme ilustrado na Figura 3.31.

Tais resultados indicam que uma edificação com características construtivas semelhantes à Casa Eficiente pode ser manipulada de modo a favorecer um adequado desempenho térmico, tanto no inverno quanto no verão. De acordo com o arquivo climático de Florianópolis, nos meses mais frios do ano (junho a agosto), as temperaturas médias horárias externas mantêm-se superiores a 18ºC entre 10h e 17h (PAPST, 1999), podendo-se aproveitar a insolação para promover o aquecimento passivo, favorecendo o acúmulo de calor na envoltória. Convém salientar, também, que nos meses de inverno o céu tende a apresentar uma menor nebulosidade em relação aos meses de verão. O mês de maio é o de menor nebulosidade, sendo o único a apresentar nebulosidade menor que 50% (MACIEL, 2005).

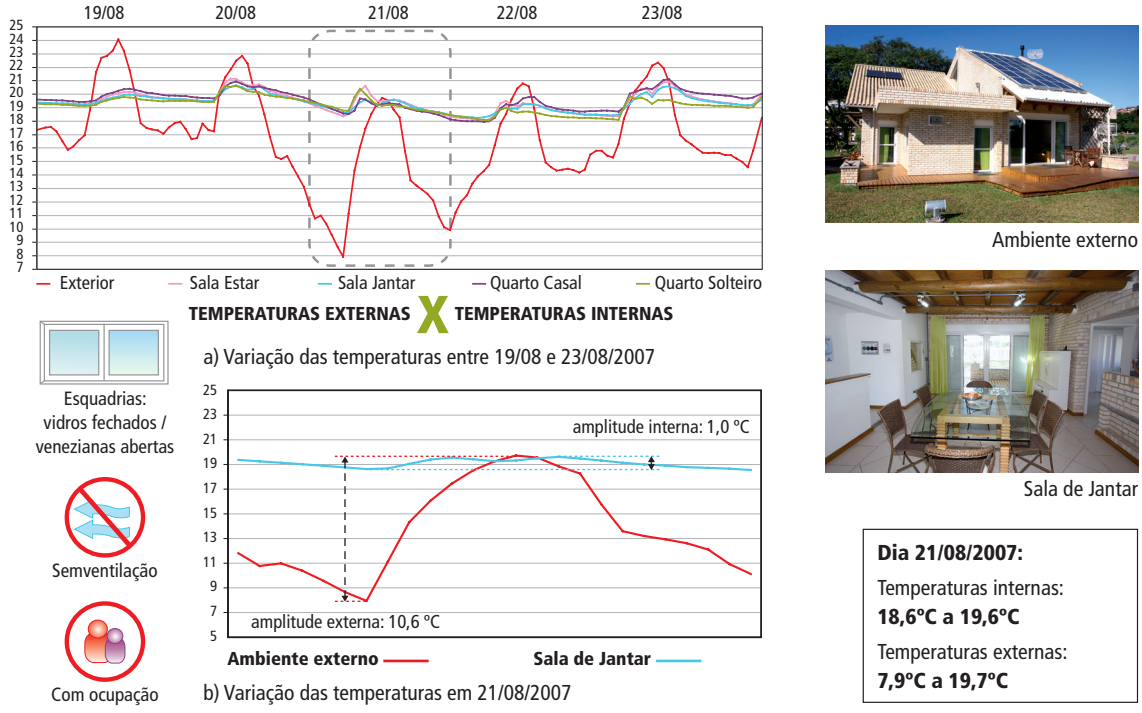


FIGURA 3.31 – Variação das temperaturas durante o período 19/08 a 23/08 de 2007. Condições de uso: persianas fechadas durante a noite e ocupação exclusivamente diurna (dois ocupantes).

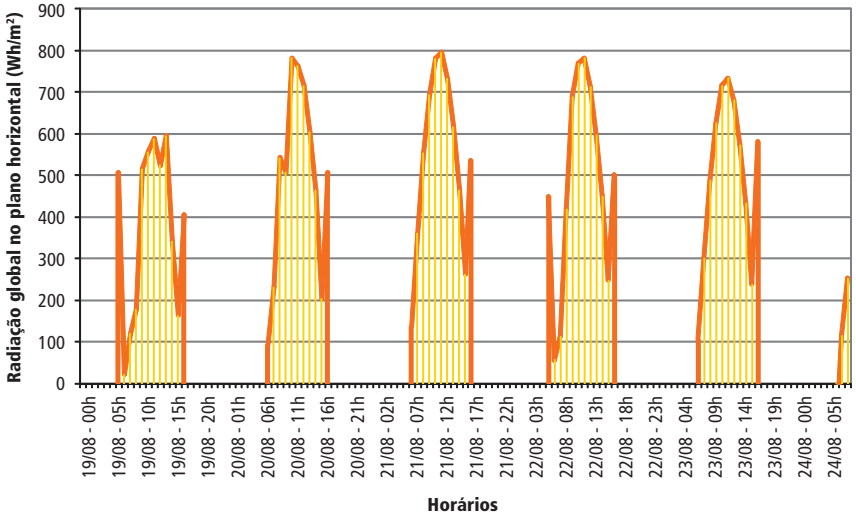


FIGURA 3.32 – Incidência da radiação global no plano horizontal: período 19 a 23/08/2007.

Desse modo, pode-se concluir que cada escolha de projeto (no caso, a seleção dos materiais construtivos) possui um papel fundamental para a promoção de um desempenho térmico satisfatório, principalmente quando tais escolhas contribuem para a adaptação da edificação às diversas solicitações climáticas ao longo do ano.

Os resultados apresentados no Capítulo 3 demonstram que a adequação da edificação ao clima só se concretiza quando a edificação faz uso adequado das estratégias bioclimáticas incorporadas ao projeto arquitetônico. Nesse sentido, os padrões de uso da edificação possuem uma importância fundamental, principalmente no tocante ao controle da ventilação e insolação através das aberturas.

Entretanto, as estratégias bioclimáticas passivas podem ser complementadas com estratégias híbridas de condicionamento, as quais representam combinações entre estratégias passivas, que não necessitam de energia elétrica para serem ativadas, e estratégias ativas, que empregam equipamentos mecânicos. Mesmo nestes casos, fatores como os materiais constituintes da envoltória e os padrões de uso da edificação assumem uma importância fundamental, afetando significativamente o desempenho das estratégias híbridas de condicionamento térmico. Um exemplo deste tipo de estratégia é a ventilação mecânica noturna, que será abordada no Capítulo 4.

4. Ventilação mecânica noturna

Autores:
Juliana Oliveira Batista
Roberto Lamberts

Neste capítulo são apresentados os resultados dos experimentos destinados à avaliação da eficácia da ventilação mecânica noturna, empregada como estratégia bioclimática no verão.

A ventilação noturna é uma estratégia bioclimática que faz uso da ventilação natural ou mecânica para resfriar as superfícies internas da envoltória de uma edificação à noite. Conforme descrito no capítulo anterior, o controle da ventilação é essencial quando a edificação possui uma elevada inércia térmica, a exemplo da Casa Eficiente, mas também é fundamental quando se tem como objetivo favorecer o conforto térmico dos usuários. Nesse caso, os fluxos de ar devem ser direcionados para as áreas ocupadas no interior dos ambientes, favorecendo o contato do ar em movimento com a pele e, com isso, a evaporação do suor, necessária para a manutenção da sensação de conforto em climas quentes e úmidos. De acordo com Kolokotroni e Santamouris (2007), a ventilação noturna pode afetar as condições de temperatura nos ambientes internos sob os seguintes aspectos:

- Reduz os picos de temperatura do ar (valores máximos e mínimos) nos ambientes internos (amortecimento térmico);
- Reduz as temperaturas do ar durante todo o dia e, particularmente, no horário da manhã;
- Reduz as temperaturas do solo;
- Promove o atraso dos picos de temperatura do ar interno em relação à temperatura externa (atraso térmico).

No caso de Florianópolis, devem-se destacar algumas particularidades quanto ao emprego da ventilação natural no período noturno. Em primeiro lugar, o emprego da ventilação natural à noite é limitado pelos períodos de calmaria verificados entre 21h e 7h (Figura 3.4). Justamente nesses horários, a incidência de vento é menos frequente, de acordo com os dados do arquivo climático de Florianópolis (MACIEL, 2005). Portanto, o uso de dispositivos como o peitoril ventilado, destinado ao direcionamento da ventilação natural para os usuários (Figura 4.1), não representaria uma contribuição efetiva para o conforto térmico dos ocupantes.

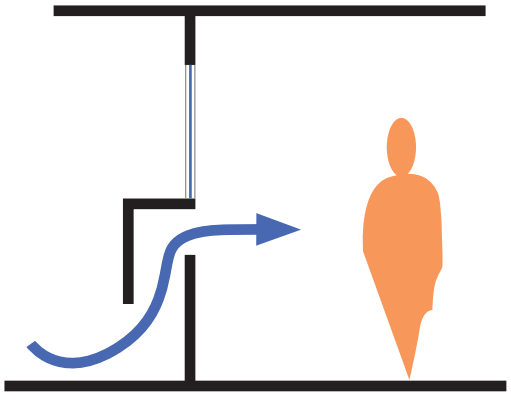


FIGURA 4.1 – Uso do peitoril ventilado.

Outros fatores que devem ser considerados dizem respeito às questões de segurança e privacidade dos usuários. Em algumas áreas urbanas, manter as janelas abertas à noite pode ser impraticável devido à incidência de ruídos, à penetração de insetos e, principalmente, por deixar a edificação vulnerável à ação de intrusos.

Diante de tais aspectos, uma alternativa para o aproveitamento da ventilação no período noturno consiste no emprego da ventilação mecânica. Nesse caso, são instalados equipamentos destinados a insuflar o ar externo no interior dos ambientes, mantendo-se as janelas fechadas e, com isso, eliminando-se os aspectos negativos mencionados anteriormente. Desse modo, é possível resfriar as superfícies internas, incrementando o desempenho da inércia térmica da construção, visando à obtenção dos amortecimentos e atrasos térmicos em relação às temperaturas externas no verão.

4.1. Descrição técnica dos insufladores e condições de utilização da ventilação mecânica

A ventilação mecânica foi a opção escolhida para a Casa Eficiente, tendo sido empregada nos quartos de casal e de solteiro (Figuras 4.2 e 4.3). Nesses ambientes, foram instalados insufladores mecânicos, aparelhos de fabricação nacional que promovem o insuflamento do ar externo, assim como a renovação do ar interno.

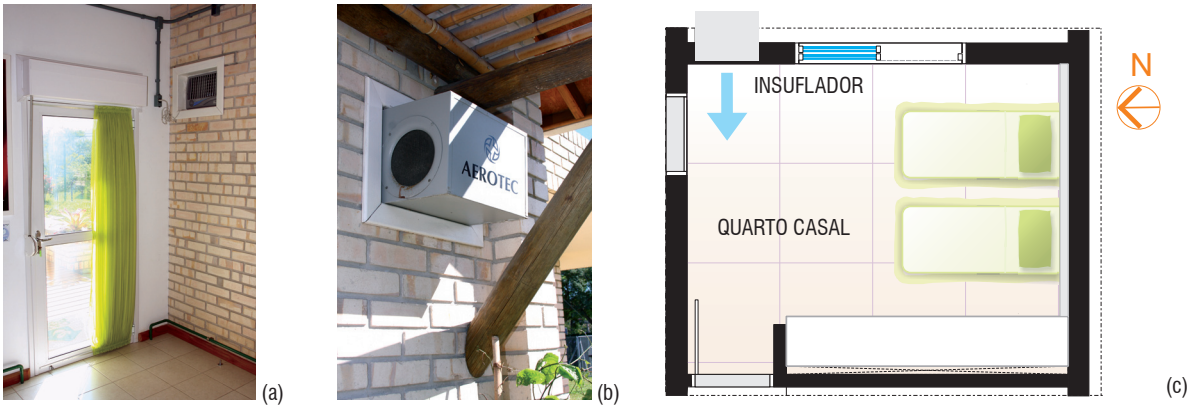


FIGURA 4.2 – Insuflador de ar posicionado no quarto de casal: (a) vista interna, (b) vista externa e (c) planta baixa.

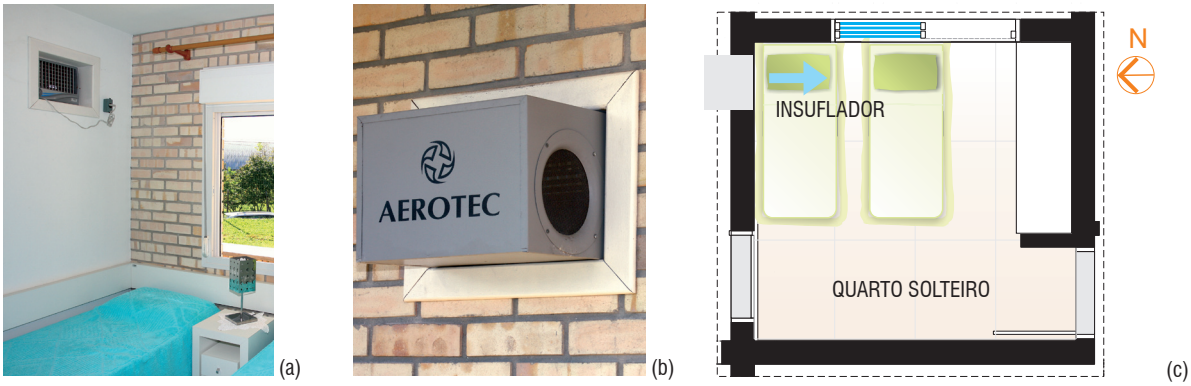


FIGURA 4.3 – Insuflador de ar posicionado no quarto de solteiro: (a) vista interna, (b) vista externa e (c) planta baixa.

O funcionamento destes equipamentos é ilustrado na Figura 4.4 e consiste na tomada do ar externo, efetuada através de entradas de ar existentes no equipamento, dotadas de filtros. O ar é aspirado com o auxílio de uma turbina interna e, na sequência, penetra no ambiente interno através de aletas existentes na face frontal do equipamento. As janelas devem ser mantidas fechadas, mas para que a renovação do ar seja realizada devem ser conservadas aberturas para saída do ar ambiente, através das portas internas, por exemplo (Figura 4.4). Outras recomendações importantes quanto à instalação do equipamento: optar pelas fachadas Norte e Sul ou mantê-lo devidamente sombreado e posicioná-lo a uma altura de, no mínimo, 1,5 m em relação ao piso.

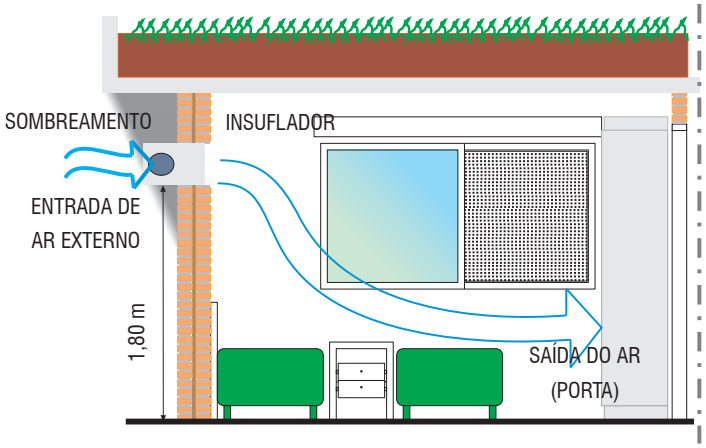


FIGURA 4.4 – Esquema de funcionamento dos insufladores de ar (quarto de solteiro).

A vazão do ar pode ser controlada modificando-se a velocidade de rotação da turbina. Foram realizadas medições da vazão do ar e do consumo de energia relacionados a cada velocidade (Figuras 4.5 e 4.6). A Tabela 4.1 indica os resultados das medições de vazão do aparelho, considerando-se duas situações: (i) portas internas abertas e (ii) portas internas fechadas, indicando-se também os consumos de energia correspondentes.

FIGURA 4.5 – Medição de vazão do insuflador de ar.

Observou-se que quando as portas internas são mantidas abertas, a vazão do equipamento era maior. Selecionando-se a vazão mínima no equipamento, o incremento no valor da vazão medida foi igual a 13% em relação às medições efetuadas com as portas internas fechadas. Quando a vazão máxima do equipamento é selecionada, esse incremento é de 15%. Observou-se, também, que ocorre diferença entre os valores de vazão mínima e máxima apenas quando as portas internas encontram-se abertas, correspondendo a 2%. Quando as portas internas são mantidas fechadas, a diferença entre os valores medidos para as vazões máxima e mínima, reguladas através do seletor existente no equipamento, é de apenas 0,4%.

FIGURA 4.6 – Medidor de consumo de energia.

TABELA 4.1 – Resultados das medições de vazão do ar dos insufladores.

Regulagem do insuflador	Vazões medidas		Consumo de energia (kWh)
	Porta interna fechada	Porta interna aberta	
Vazão mínima (m^3/h)	1127	1288	0,13
Vazão máxima (m^3/h)	1122	1320	0,18
Diferença: Vazão máxima/Vazão mínima (%)	-0,4%	2,5%	38%

A semelhança entre os valores da vazão máxima e mínima medidos quando a porta interna encontra-se fechada pode ser explicada devido à diferença de pressão existente entre a saída do insuflador e as portas internas dos ambientes. Com as portas fechadas e o insuflamento constante, o volume do ambiente vai se tornando cada vez mais saturado de ar, que encontra dificuldades para ser escoado. Como a taxa de renovação do ar é mais baixa, o ar insuflado penetra com maior dificuldade no ambiente, de modo que o aumento da velocidade da turbina do insuflador não contribui significativamente para incrementar a vazão do insuflamento do ar.

Já com relação ao consumo de energia, observou-se que quando o equipamento está regulado na sua vazão máxima, o consumo é igual a 0,18 kWh, sendo 38% maior do que o consumo correspondente à vazão mínima, cujo valor é igual a 0,13 kWh. Considerando-se um total de 8h de utilização diária do insuflador (período entre 21h e 7h), durante 30 dias no mês, ter-se-ia um consumo mensal de 43,2 kWh para cada equipamento em uso, regulado em sua vazão máxima. Funcionando com a vazão mínima, o consumo total mensal seria igual a 31,2 kWh.

Com base neste resultado, podem ser realizadas algumas estimativas. Por exemplo: o aparelho de ar-condicionado convencional (tipo janela) que apresenta o menor consumo de energia dentre aqueles contemplados com nível A pelo Programa Brasileiro de Etiquetagem, possui capacidade de refrigeração de 7000 Btu/h e consome 0,47kW por hora de funcionamento (ELETROBRAS, 2008). Se este aparelho for mantido em funcionamento também durante 8h diárias, o consumo mensal resultante seria igual a 112,8kWh.

Em relação ao consumo mensal total de uma residência unifamiliar, inserida na faixa de renda de até dez salários mínimos, cujo consumo médio pode chegar até 300kWh/mês (TAVARES, 2006), o consumo de energia com um insuflador de ar representaria 14% do consumo mensal total. Já o aparelho de ar-condicionado de janela representaria 38% do consumo mensal total. Ou seja, um valor 2,7 vezes maior quando comparado ao consumo relativo a um insuflador.

Convém salientar que os valores relativos à vazão e ao consumo de energia dos insufladores são específicos para o modelo empregado na Casa Eficiente, de modo que equipamentos comercializados por outros fabricantes podem apresentar resultados diferenciados. Entretanto, as análises ora apresentadas possibilitam uma avaliação do impacto deste tipo de equipamento no consumo de energia de uma residência e, principalmente, a eficácia da ventilação mecânica como estratégia bioclimática.

A seguir, serão apresentados os resultados da avaliação da eficácia da ventilação mecânica como estratégia de resfriamento no verão, de acordo com os seguintes aspectos: velocidade e distribuição dos fluxos de ar no interior dos ambientes e efeito sobre as temperaturas, considerando-se diferentes combinações entre a ventilação mecânica no período noturno e a ventilação natural no período diurno.

4.2. Velocidade e distribuição dos fluxos de ar

A análise qualitativa da ventilação mecânica noturna corresponde à análise da distribuição dos fluxos de ar e da velocidade do ar, resultantes do emprego dos insufladores. Para tal, foram realizados experimentos em ambos os quartos, nos quais foram efetuados registros de velocidade do ar em diferentes pontos de medição, a uma altura de 0,75 m em relação ao piso, constituindo uma malha distribuída no interior do ambiente.

Os registros de velocidade do ar foram realizados com o auxílio de um anemômetro, sendo que a direção dos fluxos de ar foi determinada com base na fumaça produzida por um bastão de incenso, posicionado no instante da medição em cada ponto da malha distribuída no ambiente (Figura 4.7). Em todas as medições, as janelas dos quartos permaneceram abertas, sendo que as venezianas foram mantidas desenroladas para possibilitar a saída do ar através dos orifícios das mesmas, simulando a condição de uso real no período noturno (Figura 4.8).

(a)

(b)

FIGURA 4.7 – Experimentos com insufladores: (a) definição do sentido do fluxo de ar e (b) medição da velocidade do ar com anemômetro.

Assim como nas medições de vazão, a verificação da distribuição dos fluxos de ar e o registro de suas velocidades no interior dos quartos foram efetuados considerando-se duas condições: portas internas abertas ou fechadas. A Figura 4.8 ilustra o posicionamento das esquadrias em ambos os quartos, sendo que as mesmas foram mantidas com uma folha fechada e a outra com a persiana desenrolada, para possibilitar a saída do ar através de seus orifícios.

(a)

(b)

FIGURA 4.8 – Configuração de abertura das janelas durante os experimentos: (a) quarto de solteiro e (b) quarto de casal.

Os resultados das medições encontram-se ilustrados nas Figuras 4.9 a 4.13, nas quais estão indicadas as direções predominantes dos fluxos de ar no interior dos ambientes e a variação da velocidade correspondente a cada sentido de fluxo identificado, de acordo com a malha de pontos de medição definida para cada quarto. Para o quarto de solteiro, a Figura 4.9 ilustra os resultados dos experimentos realizados quando o insuflador foi acionado com vazão mínima, mantendo-se a porta interna aberta (Figura 4.9(a)) ou fechada (Figura 4.9(b)).

Em ambos os casos, observa-se um maior direcionamento do fluxo de ar para a porta interna. Com a porta fechada, foram registradas velocidades de até 0,6m/s, mas as áreas mais próximas ao insuflador

permanecem com velocidades do ar nulas. Isto ocorre porque essas áreas não são atingidas pelos fluxos de ar na altura de medição (0,75 m), uma vez que a altura de instalação do equipamento é de 1,80 m em relação ao piso, conforme ilustrado na Figura 4.4.

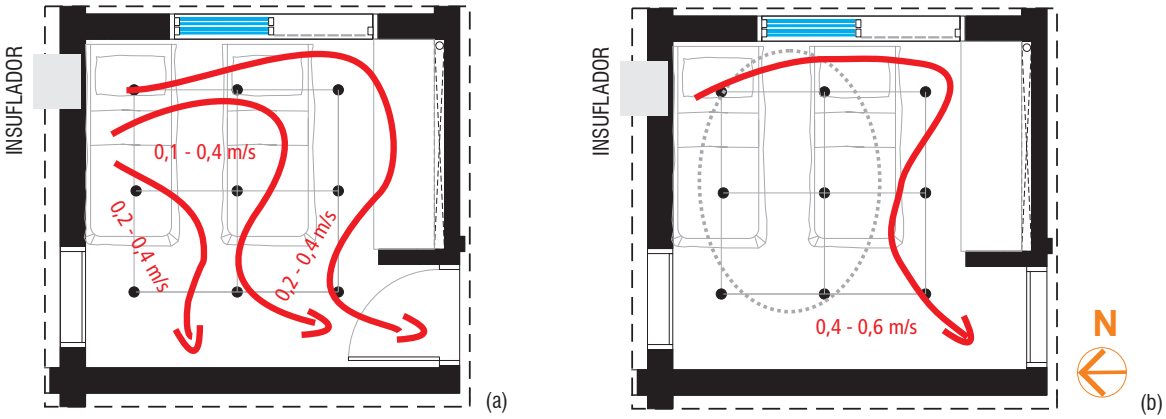


FIGURA 4.9 – Direção e intensidade dos fluxos de ar resultantes da ventilação mecânica no quarto de solteiro (vazão mínima): (a) porta interna aberta e (b) porta interna fechada.

O aumento da vazão resultou em maiores valores de velocidade do ar na porção central do ambiente, inclusive quando a porta interna é mantida fechada (Figura 4.10). Quanto à distribuição dos fluxos de ar, verifica-se o direcionamento para esta porção central, sendo que a distribuição se dá de modo mais uniforme em comparação com a situação anterior, quando foi empregada a vazão mínima. Tal comportamento indica que ao incidir sobre o guarda-roupa, este funciona como elemento desviador do fluxo de ar, revertendo-o para o interior do ambiente ao invés de direcioná-lo para a porta.

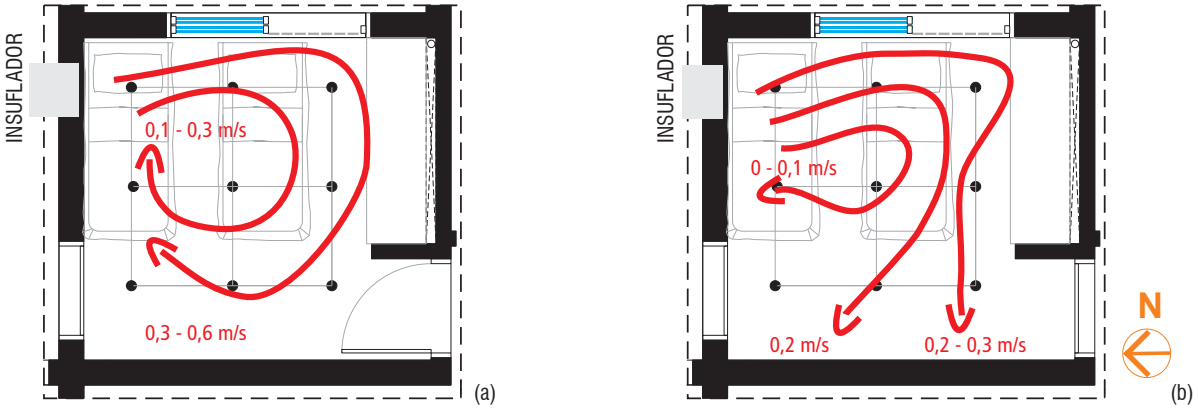


Figura 4.10 – Direção e intensidade dos fluxos de ar resultantes do emprego do insuflamento no quarto de solteiro (vazão máxima): (a) Porta interna aberta e (b) Porta interna fechada.

Com relação ao quarto de casal, foi necessário modificar o direcionamento dos fluxos de ar insuflado através do aparelho, pois se observou que o insuflador foi instalado em uma posição desfavorável, em frente

à porta interna[2]. Sob tais condições, o ar insuflado atravessaria o ambiente sem atingir a área ocupada pelas camas, de modo que foi construído um defletor encaixável na saída do aparelho para corrigir esta deficiência (Figura 4.11).

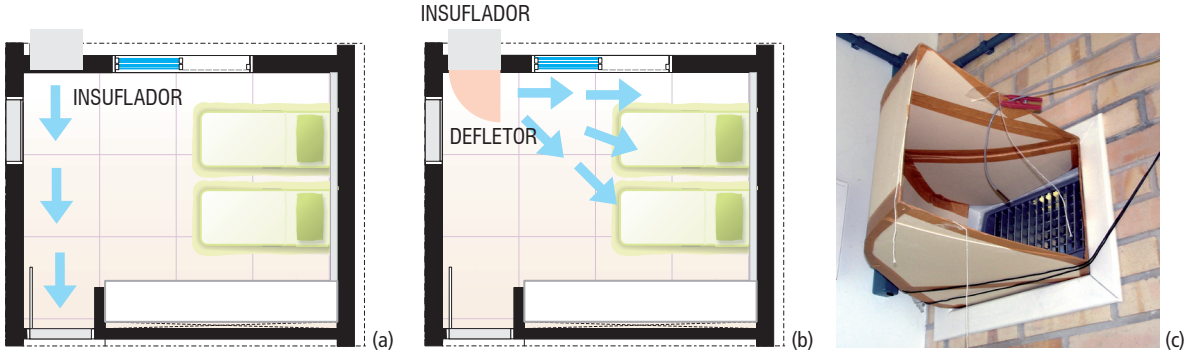


FIGURA 4.11 – Inserção do defletor na saída do insuflador instalado no quarto de casal: (a) fluxos de ar, sem o defletor, (b) fluxos de ar com o defletor e (c) defletor posicionado na saída de ar do insuflador.

Com a inserção do defletor, verificou-se que os fluxos de ar foram efetivamente direcionados para a área das camas, onde foram registrados os maiores valores de velocidade do ar, para todas as situações analisadas. A Figura 4.12 ilustra a direção e intensidade dos fluxos de ar quando o insuflamento foi empregado com vazão mínima. Neste caso, foram registradas velocidades do ar que atingiram até 0,9m/s, com a porta interna aberta. Com o aumento da vazão, os fluxos de ar mantêm uma distribuição semelhante, sendo que as velocidades registradas também apresentam maiores valores, atingindo até 1,6 m/s, conforme ilustrado na Figura 4.13. Observou-se que nos experimentos realizados com a porta aberta, a velocidade do ar na área das camas aumenta, identificando-se o direcionamento de fluxos de ar para a porta do ambiente (Figura 4.12(a) e 4.13(a)).

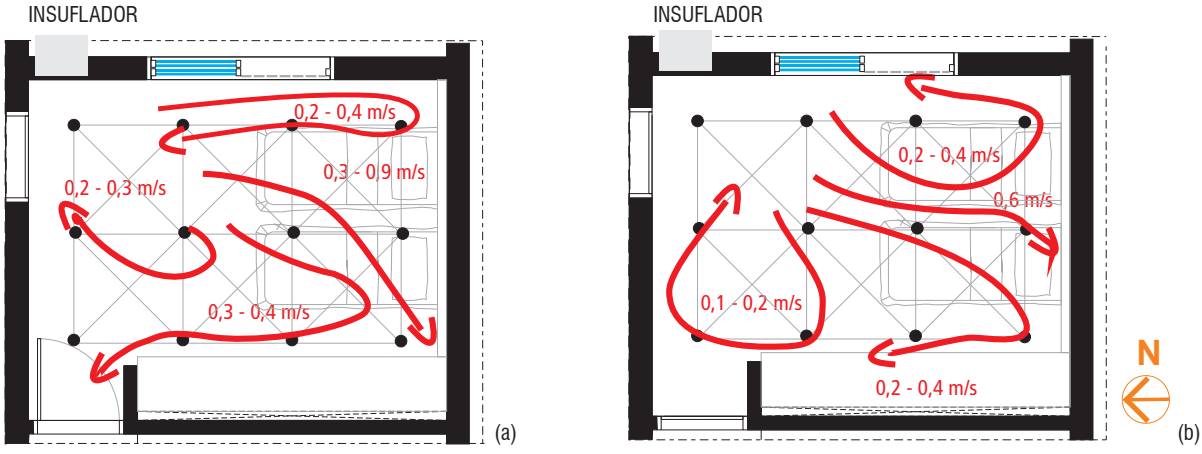


FIGURA 4.12 – Direção e intensidade dos fluxos de ar resultantes do emprego do insuflamento no quarto de casal (vazão mínima): (a) porta interna aberta e (b) porta interna fechada.

2 O posicionamento do aparelho deve sempre ser efetuado na face oposta às aberturas de saída do ar, de modo que os fluxos sejam distribuídos uniformemente no ambiente interno.

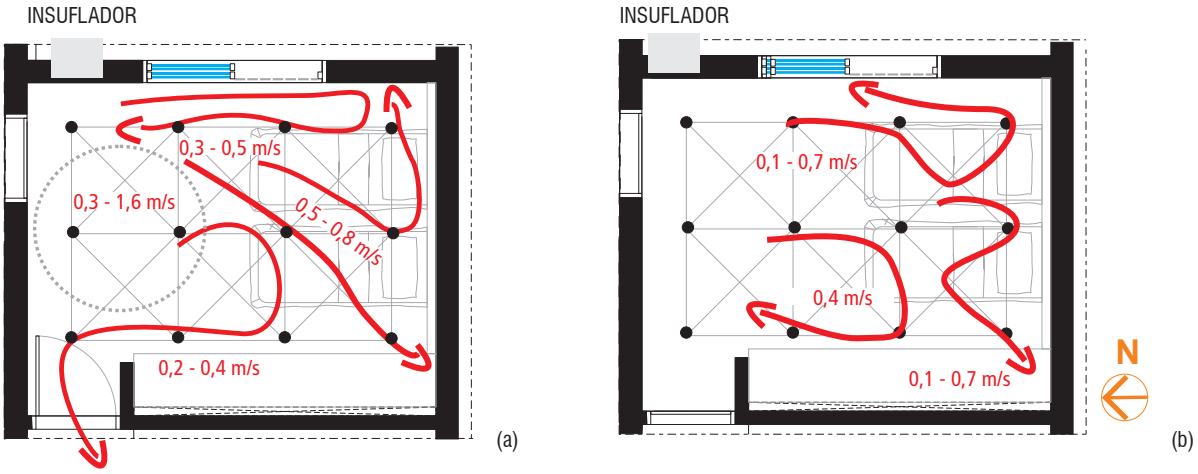


FIGURA 4.13 – Direção e intensidade dos fluxos de ar resultantes do emprego do insuflamento no quarto de casal (vazão máxima): (a) porta interna aberta e (b) porta interna fechada.

De acordo com os resultados ora demonstrados, pôde-se concluir que a seleção da vazão máxima do equipamento resultou em maiores diferenciações no direcionamento dos fluxos de ar no quarto de solteiro, por se tratar de um ambiente com menores dimensões, de modo que a incidência do vento no mobiliário e nas paredes resulta em desvios do fluxo que afetam seu direcionamento. No quarto de casal, verifica-se que há semelhança no direcionamento dos fluxos de ar quando o insuflamento do ar é empregado com ambas as vazões. Neste ambiente, a posição da porta afeta de modo mais perceptível o comportamento dos fluxos de ar, favorecendo-se a maior concentração nas áreas próximas à cabeceira das camas, quando a porta é mantida aberta.

Com base nos resultados apresentados para ambos os quartos, foram definidas as condições de utilização do insuflamento para a etapa de pesquisa seguinte, que consiste na avaliação do efeito da ventilação mecânica noturna no desempenho térmico desses ambientes. Desse modo, definiu-se que os insufladores seriam acionados em sua vazão máxima, mantendo-se as portas internas abertas para preservar a abertura de saída do ar em cada ambiente.

4.3. Efeito da ventilação mecânica noturna no desempenho térmico da Casa Eficiente

O efeito da ventilação mecânica noturna no desempenho térmico da Casa Eficiente foi avaliado com base na comparação entre diversas séries de experimentos, compreendendo períodos distintos de análise ao longo do monitoramento, diferenciados pelas condições de ventilação impostas à edificação. Cada série de experimentos foi realizada como meio de se responder aos seguintes questionamentos:

Qual o efeito da ventilação mecânica noturna na redução da temperatura interna durante a noite e no resfriamento da envoltória, quando as fontes externas de calor são bloqueadas durante o dia (ventilação nos períodos quentes e insolação)?
EXPERIMENTO 1: BLOQUEIO DA VENTILAÇÃO DURANTE O DIA + VENTILAÇÃO MECÂNICA NOTURNA.

Como o emprego da ventilação diurna (ganhos de calor – ventilação e insolação), pode afetar o efeito da ventilação mecânica noturna?

EXPERIMENTO 2:
VENTILAÇÃO PELA MANHÃ E/OU PELA TARDE, COM VENTILAÇÃO MECÂNICA NOTURNA.

Tendo sido verificados os efeitos da inércia térmica quando a edificação foi mantida completamente fechada, o Experimento 1 foi adotado como referência nas comparações destinadas à avaliação do ventilação mecânica noturna. Sob tais condições, ou seja, mantendo-se a edificação isenta dos ganhos de calor associados à radiação e ventilação no período diurno, criar-se-iam condições favoráveis à máxima eficácia da referida estratégia: menos calor acumulado = menos calor a retirar da estrutura.

Entretanto, sob condições habituais, os usuários de residências não mantêm janelas e portas completamente fechadas durante todo o dia. Daí surge o questionamento relacionado ao Experimento 2: até que ponto a interferência dos ganhos de calor diurnos afetariam o potencial do ventilação mecânica noturna como estratégia de condicionamento térmico no verão? Ou seja, como a intervenção do usuário pode afetar a eficácia da ventilação mecânica noturna? Na busca por respostas, os ambientes analisados foram expostos à ventilação e insolação pela manhã e também durante períodos contínuos (manhã e tarde), comparando-se o comportamento térmico dos quartos nesses períodos com os resultados obtidos no Experimento 1.

Também foi realizado o Experimento 3, compreendendo um período no qual a ventilação mecânica noturna não foi empregada, sendo que a edificação foi exposta à ventilação e insolação durante o dia. Nesse caso, o questionamento proposto foi o seguinte:

Qual o comportamento térmico da Casa Eficiente apenas sob o efeito da ventilação natural no período diurno?

EXPERIMENTO 3:
VENTILAÇÃO PELA MANHÃ E PELA TARDE, SEM VENTILAÇÃO MECÂNICA NOTURNA.

O esquema ilustrado na Figura 4.14 representa as etapas de análise aqui apresentadas. Todos os experimentos realizados representam variações a partir de um Caso Base, situação inicial na qual os ambientes permaneceram completamente fechados, sem influência da ventilação e da radiação durante todo o dia e sem o emprego da ventilação mecânica noturna.

A fim de possibilitar a comparação entre os períodos de análise, definiu-se como critério para a seleção dos mesmos a semelhança entre a variação das temperaturas externas (valores mínimos e máximos), utilizando-se sempre a partir do 3º dia de cada sequência, garantindo que a edificação já havia entrado em regime permanente, o que significa que as condições térmicas das superfícies internas (temperaturas e fluxos de calor) atingiram uma situação de equilíbrio. A Tabela 4.2 relaciona os experimentos, as datas correspondentes e a variação da temperatura externa em cada período. Em seguida, são apresentados os parâmetros de análise utilizados nas comparações entre os diversos experimentos, visando obter respostas acerca da eficácia da ventilação mecânica noturna como estratégia de condicionamento térmico.

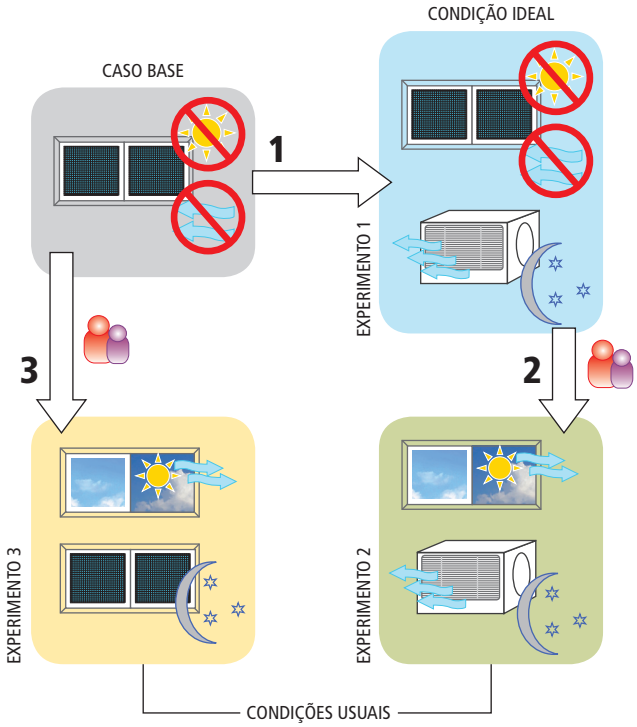


FIGURA 4.14 – Esquema representativo das etapas de análise.

TABELA 4.2 – Experimentos analisados e períodos correspondentes.

	Caracterização do período	Sequência de dias	Variação da temperatura externa	Dias analisados
CASO BASE	Fechado, sem ventilação mecânica	01/01 a 05/01/08	21,2 °C a 31,7 °C	03 e 04/01
EXPERIMENTO 1	Fechado + ventilação mecânica	02/02 a 06/02/08	15,4 °C a 30,2 °C	04 e 05/02
EXPERIMENTO 2	Ventilação/manhã + ventilação mecânica	31/03 a 04/04/08	15,5 °C a 28,1 °C	04/04
	Ventilação/manhã e tarde + ventilação mecânica	22/01 a 26/01/08	18,8 °C a 27,2 °C	09 e 10/04
EXPERIMENTO 3	Ventilação, sem ventilação mecânica	07/01 a 11/01/08	18 °C a 34,6 °C	09 e 10/01

4.3.1. Parâmetros de análise

Foram considerados cinco parâmetros para a análise do efeito da ventilação mecânica no desempenho térmico dos ambientes monitorados:

- Amortecimentos de temperatura em relação à temperatura externa: amortecimento da temperatura máxima e amortecimento da temperatura mínima.

> **QUAL A EXPECTATIVA?**
> Quanto maior a redução da temperatura máxima, maior a probabilidade de se obter condições de conforto adequadas no interior dos ambientes.

:: Atrasos térmicos, correspondentes às diferenças entre os horários de ocorrência das temperaturas máximas e mínimas nos ambientes internos em relação ao exterior.

QUAL A EXPECTATIVA?

Quanto maior o atraso na ocorrência da temperatura máxima interna, maior a probabilidade deste valor ocorrer em períodos de temperatura mais amena (noite e madrugada), coincidindo com período de aplicação do insuflamento.

:: Número de graus de redução das temperaturas internas, obtido no período de uso do insuflamento (intervalo entre 21h e 7h). Este número corresponde à diferença mostrada na Equação 4.1.

$$\Delta T_{ar}(i) = T_{ar}(21h) - T_{ar}(7h) \qquad \text{Equação 4.1}$$

Onde:

$\Delta T_{ar}(i)$ é a diferença da temperatura do ar nos ambientes internos;

$T_{ar}(21h)$ é a temperatura do ar registrada às 21h;

$T_{ar}(7h)$ é a temperatura do ar registrada às 7h do dia seguinte.

QUAL A EXPECTATIVA?

Uma vez que a temperatura externa sofre uma redução durante a noite e a madrugada, a introdução do ar externo através da ventilação mecânica favoreceria o resfriamento da temperatura do ar interno e, por conseguinte, as condições de conforto no verão.

:: Número de graus de redução das temperaturas superficiais internas, obtido no período de uso do insuflamento (intervalo entre 21h e 7h). Este número corresponde à diferença expressa pela Equação 4.2.

$$\Delta T_{sup}(i) = T_{sup}(21h) - T_{sup}(7h) \qquad \text{Equação 4.2}$$

Onde:

$\Delta T_{sup}(i)$ é a diferença da temperatura das superfícies internas (paredes e teto);

$T_{sup}(21h)$ é a temperatura superficial registrada às 21h;

$T_{sup}(7h)$ é a temperatura superficial registrada às 7h do dia seguinte.

QUAL A EXPECTATIVA?

O resfriamento da envoltória proporcionado pela introdução do ar externo mais frio favoreceria a manutenção dos efeitos de atraso e amortecimento térmico, preparando-a para absorver a onda de calor do dia seguinte.

:: Percentual de aproveitamento do resfriamento noturno: esse parâmetro corresponde ao quociente entre o número de graus de redução da temperatura do ar interno e o número de graus de redução da temperatura externa, no mesmo intervalo. A Equação 4.3 expressa o valor deste percentual.

$$PA\ (T_{ar}) = \frac{\Delta T_{ar}\ (i)}{\Delta T_{ar}\ (e)} \qquad \text{Equação 4.3}$$

Onde:

PA (T_{ar}) é o percentual de aproveitamento do resfriamento noturno;

$\Delta\ T_{ar}$ (i) é definida pela Equação 4.1;

$\Delta\ T_{ar}$ (e) é a redução da temperatura do ar no ambiente externo entre 21h e 7h do dia seguinte, correspondente à diferença entre o valor registrado às 21h e o valor mínimo registrado neste intervalo.

QUAL A EXPECTATIVA?

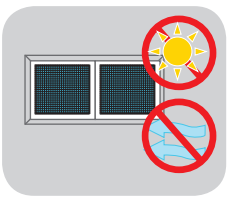
Obtenção de reduções da temperatura do ar proporcionais às reduções das temperaturas externas, obtendo-se maiores percentuais de aproveitamento de acordo com as condições de ventilação e insolação impostas à edificação durante o dia.

Com base no parâmetro PA (T_{ar}) foi possível comparar proporcionalmente os decréscimos de temperatura ocorridos no período de uso da ventilação mecânica noturna, já que a temperatura externa não se reduz igualmente em todas as noites dos períodos selecionados.

Considerando-se os parâmetros relativos à análise da ventilação mecânica noturna, os resultados obtidos em cada série de experimentos foram analisados e são apresentados a seguir.

4.3.2. Caso Base: esquadrias fechadas, sem ventilação mecânica

O primeiro experimento analisado é o Caso Base, caracterizado pela ausência total de ventilação natural durante as 24h do dia. Neste experimento, as esquadrias foram mantidas fechadas e cobertas com as persianas externas, bloqueando também a radiação solar direta que poderia penetrar através da janela (Figura 4.15).



Duração do experimento: 01 a 05/01/08

Dias analisados: 03 e 04/01

Caracterização: esquadrias fechadas (24h) e sem insuflamento

Variação da temperatura externa no período: 21,2 a 31,7ºC

FIGURA 4.15 – Caso Base.

A Figura 4.16 ilustra a variação da temperatura externa e das temperaturas internas durante o período compreendido entre 01 e 05/01/2008, denominado aqui como Caso Base. A linha em azul indica a temperatura considerada como limite de conforto: 29ºC, de acordo com a recomendação

de Givoni (1992) para países de clima tropical, a exemplo do Brasil. Observa-se que as amplitudes internas foram inferiores a 2ºC, demonstrando o efeito da inércia térmica sobre dois aspectos principais: amortecimento dos picos de temperatura, principalmente das temperaturas mínimas, e atrasos térmicos. Com relação aos dias 03 e 04/01, em destaque na Figura 4.16, os amortecimentos das temperaturas máximas foram iguais a 3ºC no quarto de casal. Já no quarto de solteiro, os amortecimentos máximos foram iguais a 3ºC e 3,5ºC. Quanto aos atrasos térmicos, as temperaturas máximas internas ocorreram por volta das 17h, entre 2h e 3h após a temperatura máxima externa ser registrada. Foram verificados decréscimos nas temperaturas externas iguais a 2ºC entre 21h e 7h, enquanto as temperaturas internas sofreram reduções inferiores a 0,3ºC no mesmo intervalo, semelhante ao ocorrido entre os dias 27 e 31/12/2007. A temperatura média interna diária nos dias destacados foi igual a 27,8ºC e 27,4ºC, respectivamente, para os quartos de casal e de solteiro, enquanto a temperatura média externa foi igual a 26,7ºC.

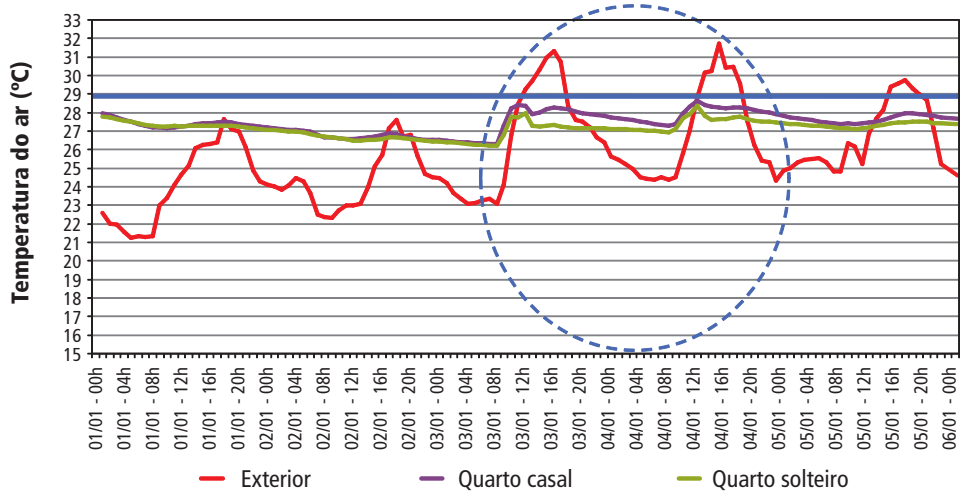
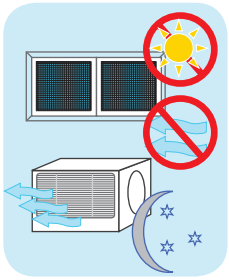


FIGURA 4.16 – Variação da temperatura do ar no exterior e nos quartos de casal e de solteiro, entre 01 e 05/01/2008.

De acordo com os resultados obtidos no Caso Base, verifica-se que as temperaturas internas mantiveram-se inferiores ao limite de 29°C. Entretanto, durante a noite a redução nas temperaturas internas foi pequena em relação aos decréscimos verificados na temperatura externa. Nos quartos de casal e de solteiro, o percentual de aproveitamento do resfriamento noturno, PA (T_{ar}), foi inferior a 10% nos dias destacados. Desse modo, recomenda-se o uso da ventilação mecânica, a fim de favorecer um melhor aproveitamento do potencial de resfriamento apresentado no ambiente externo, onde a redução média da temperatura foi de 2°C no intervalo compreendido entre 21h e 7h.

4.3.3. Experimento 1: esquadrias fechadas, com ventilação mecânica

O Experimento 1, apresentado a seguir, diferencia-se do Caso Base pelo emprego da ventilação mecânica durante o período compreendido entre 21h e 7h. Foram mantidas as restrições à ventilação diurna e à radiação, podendo-se identificar o efeito da ventilação mecânica noturna nas temperaturas internas dos quartos (Figura 4.17).



Duração do experimento: 02 a 06/02/08

Dia analisado: 05/02

Caracterização: Esquadrias fechadas (24h), Ventilação mecânica noturna (21h - 7h)

Variação da temperatura externa no período: 15,4 a 30,2ºC

FIGURA 4.17 – Experimento 1.

A Figura 4.18 ilustra a variação da temperatura externa e das temperaturas internas durante o período compreendido entre 02 e 06/02/2008. O efeito da ventilação mecânica noturna é percebido ao se observar as amplitudes diárias das temperaturas internas, que variam entre 3ºC e 4ºC. Considerando-se o intervalo entre 21h e 7h e tomando-se como exemplo o dia 05/02, os decréscimos nas temperaturas internas variaram entre 1,5ºC (quarto/solteiro) e 2,8ºC (quarto/casal), enquanto no Caso Base as temperaturas nesse horário mantiveram-se estáveis (Figura 4.16). Além disso, os amortecimentos das temperaturas máximas foram iguais a 4ºC e 5ºC, respectivamente, para o quarto de solteiro e o quarto de casal. Quanto aos atrasos, verificaram-se valores iguais a 3h e 5h, respectivamente, nesses ambientes (temperatura máxima externa atingida às 15h).

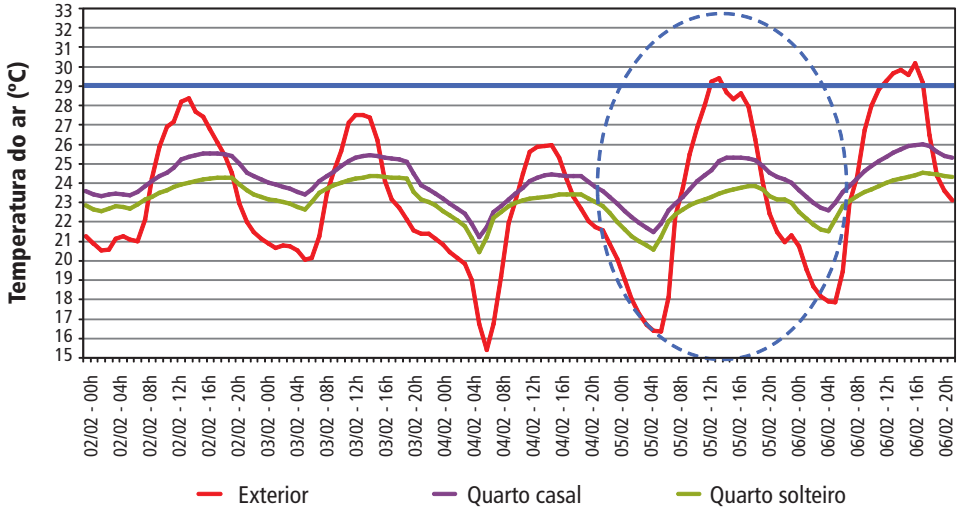


FIGURA 4.18 – Variação da temperatura do ar no exterior e nos quartos de casal e de solteiro, entre 02 e 06/02/2008.

Quanto à redução das temperaturas internas no período de insuflamento, embora as temperaturas externas nos dias selecionados tenham atingido valores mínimos inferiores àqueles registrados no Caso Base, pode-se realizar a comparação entre ambos os períodos de análise com base no percentual de aproveitamento do resfriamento noturno, $PA(T_{ar})$, expresso pela Equação 4.3. Os resultados desse quociente para o dia 05/02 foram iguais a 0,5 para ambos os quartos. Considerando-se que os ambientes internos permaneceram sob restrição total da ventilação e da insolação durante o período diurno, tem-se que o valor de $PA(T_{ar})$ é indicativo do máximo aproveitamento do potencial de resfriamento advindo da ventilação mecânica noturna na Casa Eficiente, dentre todas as situações analisadas.

EXPERIMENTO 1

Bloqueando-se a admissão da ventilação e da insolação durante o dia, ou seja, restringindo-se os ganhos de calor, obteve-se uma redução da temperatura do ar interno equivalente a 50% da redução da temperatura externa no intervalo entre 21h e 7h.

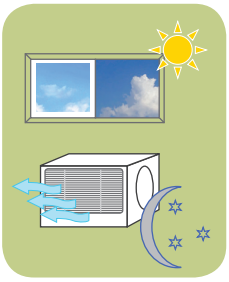
Convém salientar que o período compreendido entre os dias 02 e 06/02 é o único período ilustrativo do Experimento 1, no qual a ventilação mecânica noturna foi ativada simultaneamente em ambos os quartos. Entretanto, não há dados disponíveis para análise do resfriamento da envoltória (redução da temperatura superficial = T_{sup}), devido à ocorrência de uma pane no sistema de aquisição de dados da Casa Eficiente neste período. Desse modo, esta análise será apresentada apenas para o Experimento 2 (ventilação/insolação no período diurno + ventilação mecânica noturna), representada por dois períodos de análise, conforme será descrito a seguir.

4.3.4. Experimento 2: ventilação diurna, com ventilação mecânica

Ao Experimento 2 correspondem dois períodos de análise. O primeiro deles (Figura 4.19) é caracterizado pela influência da ventilação e da radiação apenas pela manhã, entre 8h e 11h. No segundo período de análise, os ambientes também foram expostos à ventilação e radiação no período da tarde, entre 13h e 18h. Embora o Experimento 1 represente as condições mais favoráveis ao desempenho satisfatório da ventilação mecânica noturna, o Experimento 2 ilustra condições habituais de uso em residências, onde os ocupantes manipulam as esquadrias, possibilitando a admissão da ventilação e da insolação no período diurno.

4.3.4.1. Experimento 2: ventilação diurna (manhã), com ventilação mecânica

A Figura 4.19 caracteriza o primeiro período avaliado para o Experimento 2.



Duração do experimento: 31/03 a 04/04/08

Dia analisado: 04/04

Caracterização: Esquadrias abertas (8h - 11h)

Esquadrias fechadas (11h - 8h)

Ventilação mecânica noturna (21h - 7h)

Variação da temperatura externa no período: 15,5 a 28,1ºC

FIGURA 4.19 – Experimento 2.

Considerando-se o período 31/03 a 04/04, registrou-se a incidência predominante dos ventos do sudeste e norte no intervalo entre 8h e 11h (Figura 4.20). Sob tais condições, os ventos do sudeste apresentam maior influência nos quartos, devido à incidência oblíqua às janelas. Nesses horários, as velocidades predominantes dos ventos variaram entre 1 e 2 m/s.

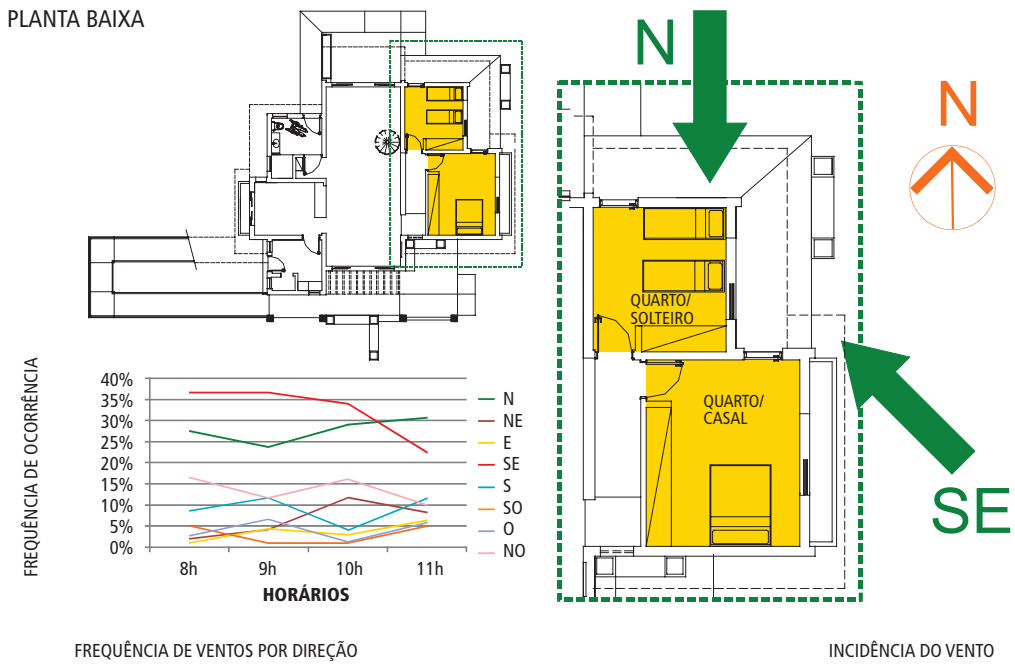


FIGURA 4.20 – Incidência dos ventos no período entre 8h e 11h, 31/03 a 04/04/2008: predominância dos ventos Norte e sudeste.

Com relação à radiação, a Figura 4.21 indica os valores da radiação solar global incidente no plano horizontal. Os valores máximos da radiação nesse período, os quais variam entre 400 e 800Wh/m², são semelhantes aos valores indicados no arquivo climático da cidade de Florianópolis (GOULART, 1993) e indicam a ocorrência de dias ensolarados no período considerado.

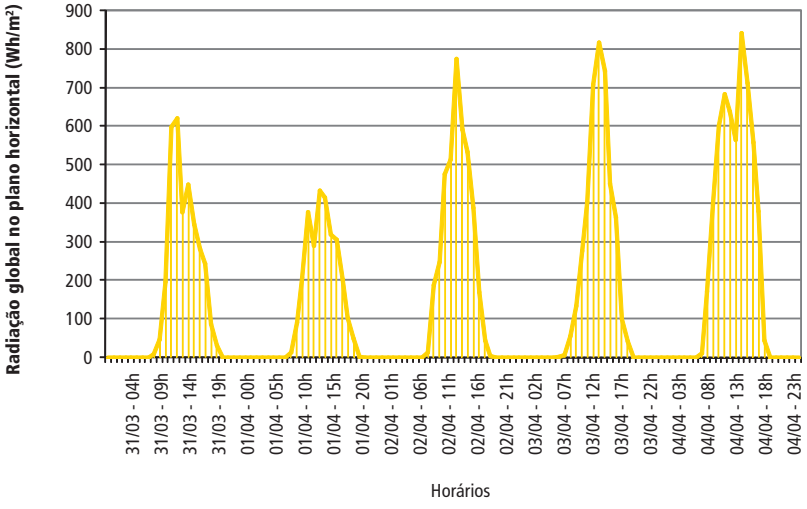


FIGURA 4.21 – Radiação global sobre o plano horizontal (31/03 a 04/04/2008).

A Figura 4.22 ilustra a variação da temperatura externa e das temperaturas internas durante o período compreendido entre 31/03 a 04/04. As temperaturas externas no período são amenas, mantendo-se inferiores a 29ºC, o que também se reflete nos ambientes internos. Entretanto, a influência da radiação e da insolação durante o período diurno afeta o comportamento térmico dos quartos. Entre 8h e 17h, as temperaturas internas mantêm-se estáveis, com valor próximo à temperatura máxima diurna, sendo que os amortecimentos são menores em relação ao Experimento 1, quando as esquadrias foram mantidas fechadas 24h por dia. Tomando-se como referência o dia 04/04, os amortecimentos das temperaturas máximas em ambos os quartos foi inferior a 1ºC, mesmo com a ocorrência de uma maior redução da temperatura externa durante o período noturno (diferença de 5,4ºC entre as 21h do dia 03/04 e 7h do dia 04/04).

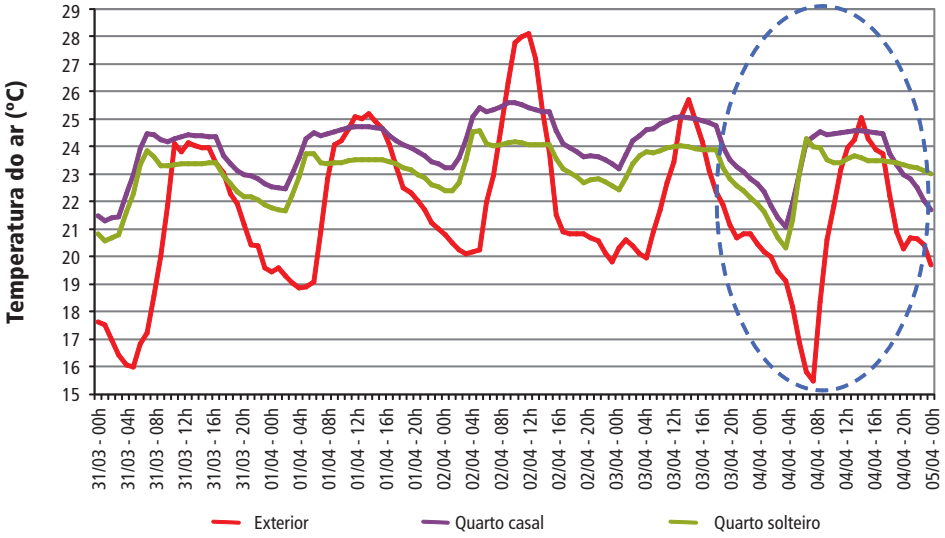


FIGURA 4.22 – Variação das temperaturas internas e externas no período entre 31/03 e 04/04/2008.

O efeito do insuflamento no resfriamento dos componentes construtivos pode ser observado com base no comportamento das temperaturas superficiais internas[3] (Figura 4.23). Comparando-se as reduções nas temperaturas internas e nas temperaturas superficiais, no intervalo entre 21h e 7h, observa-se que os resultados são semelhantes para as temperaturas superficiais e temperaturas do ar, conforme ilustrado nas Figuras 4.24 e 4.25. Entretanto, enquanto as temperaturas do ar atingem o valor mínimo às 3h (vide Figura 4.22), no caso das temperaturas superficiais isto ocorre às 6h (Figura 4.23).

3 Destaca-se a temperatura superficial interna do teto do quarto de casal, a qual se mantém mais elevada em relação às demais superfícies. Isto ocorre porque esta superfície está mais exposta à radiação solar do que as paredes. No caso da cobertura do quarto de solteiro, o emprego do telhado vegetado, com maior inércia térmica, resulta na redução da transmissão do calor para o interior e, por conseguinte, em temperaturas menores quando comparadas ao teto do quarto de casal.

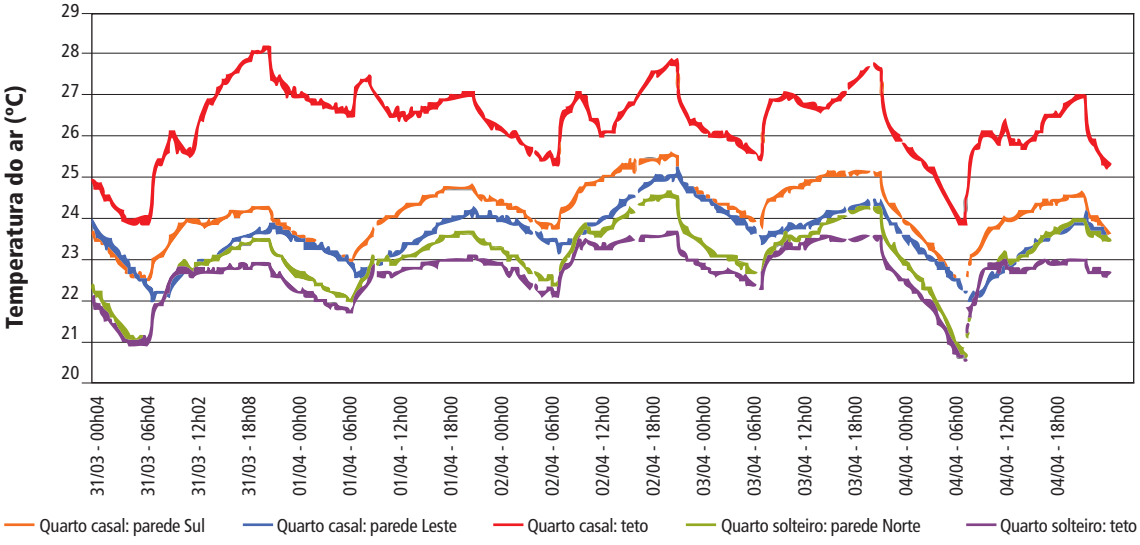


FIGURA 4.23 – Variação das temperaturas superficiais internas no período entre 31/03 e 04/04/2008.

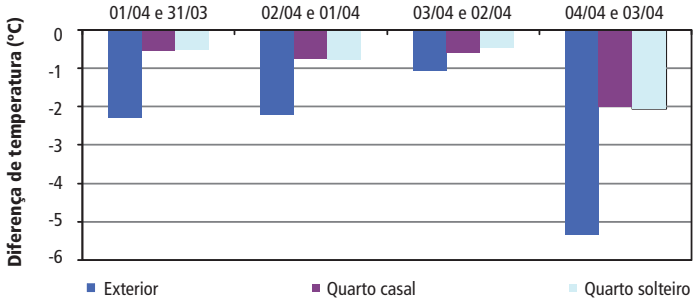


FIGURA 4.24 – Diferenças verificadas nas temperaturas do ar, externo e interno, entre 21h e 7h (diferença entre a temperatura mínima registrada e a temperatura registrada às 21h).

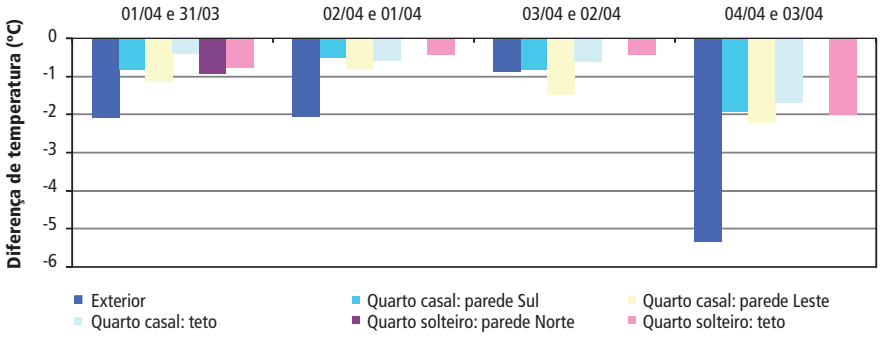


FIGURA 4.25 – Diferenças verificadas nas temperaturas do ar externo e nas temperaturas superficiais internas, entre 21h e 7h (diferença entre a temperatura mínima registrada e a temperatura registrada às 21h).

Para ilustrar o comportamento das temperaturas superficiais e dos fluxos de calor, será utilizada como exemplo a superfície interna da parede Leste do quarto de casal (Figuras 4.26 e 4.27). O calor é acumulado nos componentes construtivos durante o dia: os fluxos negativos indicam que há calor sendo absorvido pela superfície

da parede, elevando sua temperatura (áreas destacadas em amarelo na Figura 4.26). Já durante a noite, o calor acumulado não é totalmente removido, pois os fluxos positivos indicam que a superfície está perdendo calor (áreas destacadas em azul na Figura 4.27). Observa-se que a temperatura superficial sofre uma redução, mas às 7h de cada dia, horário que corresponde ao final do período de insuflamento, seu valor é superior àquele registrado às 7h do dia anterior, conforme indicado na Figura 4.23 (valores mínimos das temperaturas superficiais). Apenas na madrugada do dia 04/04, quando a temperatura externa sofre uma redução maior em relação aos outros dias (vide Figura 4.24), a temperatura superficial às 7h é menor do que aquela registrada no dia anterior.

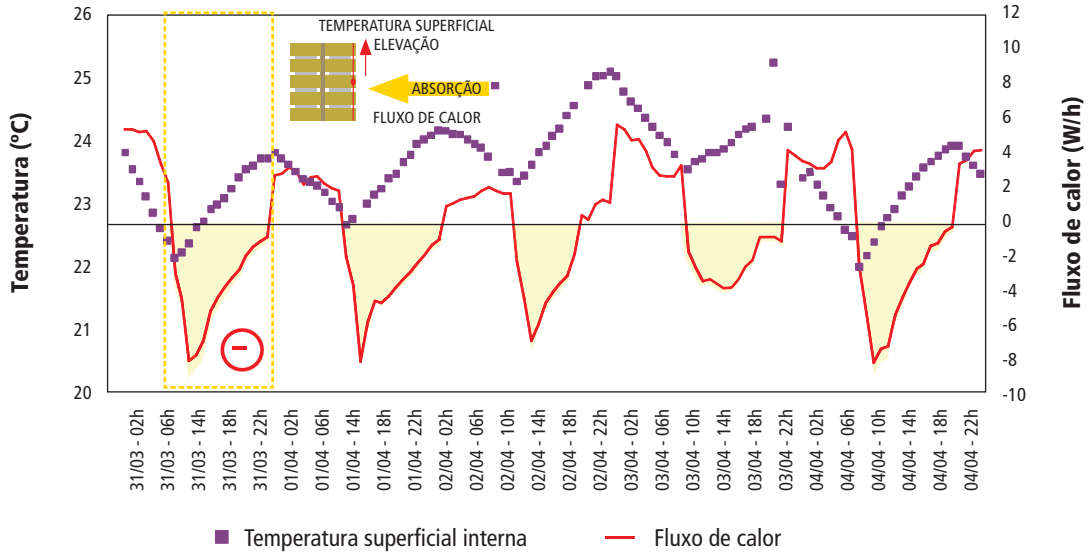


FIGURA 4.26 – Variação das temperaturas superficiais e fluxos de calor da parede Leste do quarto de casal, destacando-se o período diurno: 31/03 a 04/04/2008.

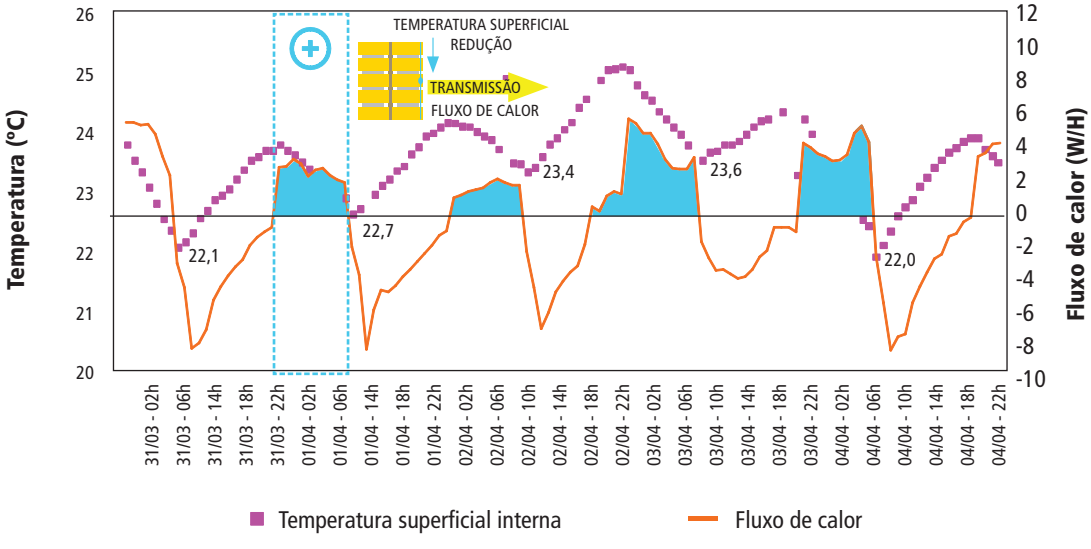
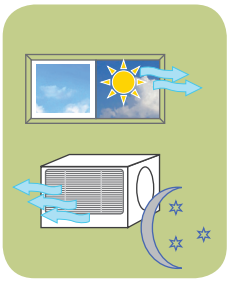


FIGURA 4.27 – Variação das temperaturas superficiais e fluxos de calor da parede Leste do quarto de casal, destacando-se o período noturno: 31/03 a 04/04/2008.

A fim de se avaliar o efeito de uma maior exposição aos ganhos de calor advindos do exterior sobre o desempenho térmico dos ambientes, bem como a influência disto na eficácia da ventilação mecânica noturna, foi selecionado o segundo período de análise: 22/01 a 26/01/2008. Este período é caracterizado pela influência da ventilação e da radiação pela manhã e à tarde, nos seguintes horários: 8h às 11h e 13h às 18h.

4.3.4.2. Experimento 2: ventilação diurna (manhã e tarde), com ventilação mecânica

A Figura 4.28 caracteriza o segundo período analisado no Experimento 2.



Duração do experimento: 22/01 a 26/01/08

Dia analisado: 25/01

Período de análise 2

Caracterização: Esquadrias abertas (8h - 11h e 13h - 18h)

Esquadrias fechadas (11h - 13h e 18h - 8h)

Ventilação mecânica noturna (21h - 7h)

Variação da temperatura externa no período: 18,8 a 27,2°C

FIGURA 4.28 – Experimento 2.

A Figura 4.29 ilustra a incidência dos ventos durante o período considerado. Observa-se a incidência de vento em todos os horários, entretanto os ventos mais frequentes pertencem ao quadrante Oeste, de modo que os quartos não estavam expostos diretamente à ventilação. A Figura 4.30 ilustra a radiação incidente no plano horizontal.

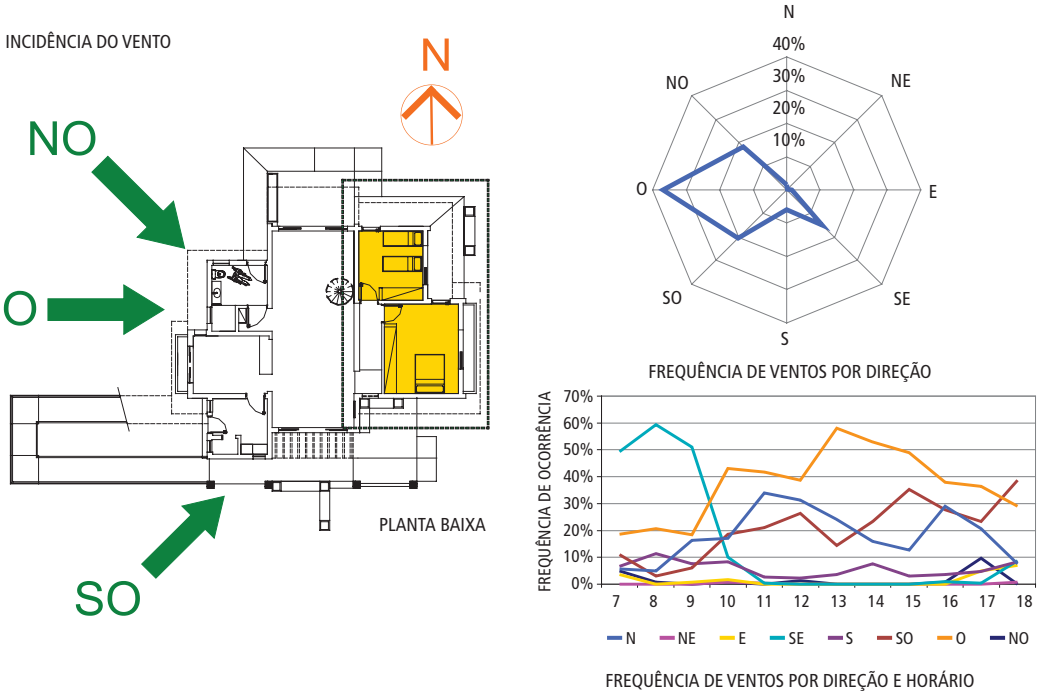


FIGURA 4.29 – Incidência dos ventos no período 22/01 a 26/01/2008, entre 7h e 18h.

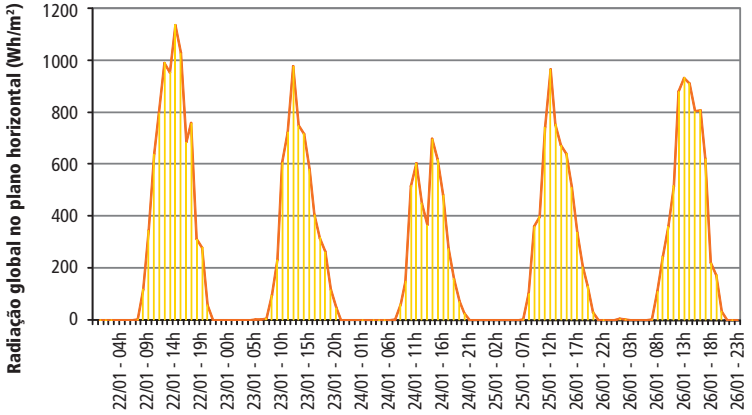


FIGURA 4.30 – Radiação global sobre o plano horizontal, período de 22 a 26/01/2008.

As temperaturas externas no período variam entre 18,8 e 27,2ºC. Nos quartos, a variação é de 21,8ºC a 26ºC (Figura 4.31). Também aqui observa-se a influência dos ganhos de calor durante o período diurno, as temperaturas internas se mantêm estabilizadas e com valores próximos à temperatura máxima externa, principalmente no quarto de casal. Tomando-se como exemplo o dia 25/01, o amortecimento da temperatura máxima foi igual a 1,4ºC no quarto de casal e 2,6ºC no quarto de solteiro. Entretanto, esses amortecimentos foram maiores do que aqueles registrados no período entre 31/03 e 04/04, quando os ambientes estavam expostos à ventilação e insolação apenas pela manhã, mas a incidência dos ventos era oblíqua às janelas dos quartos (vento sudeste). Ou seja, na situação anterior os quartos estavam mais expostos à penetração do vento através das janelas, incrementando as trocas térmicas entre as superfícies internas e o ar. Uma vez que a temperatura externa era superior às temperaturas internas, a ventilação favorecia o acúmulo de calor na envoltória.

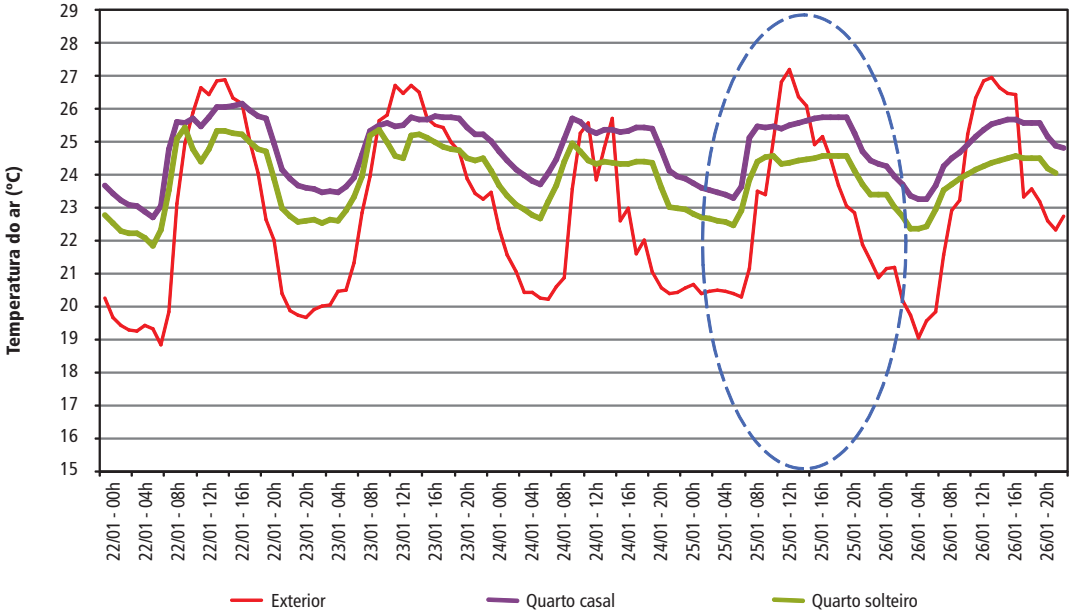


FIGURA 4.31 – Variação das temperaturas internas e externas, período 22 a 26/01/2008.

Com relação à redução da temperatura do ar entre 21h e 7h, observa-se que as temperaturas mínimas são atingidas nos ambientes internos 1h antes do registro da temperatura externa mínima. A Figura 4.32 ilustra os valores, em graus, da redução das temperaturas do ar ocorridas neste intervalo, representando a diferença entre a temperatura mínima diária e a temperatura registrada às 21h do dia anterior. As diferenças verificadas variaram entre 1,1ºC e 2,4ºC.

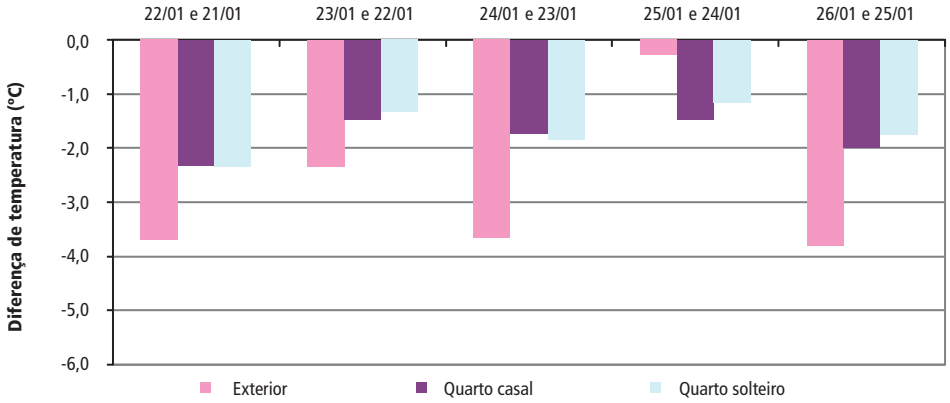


FIGURA 4.32 – Diferenças verificadas nas temperaturas do ar, externo e interno, entre 21h e 7h (diferença entre a temperatura mínima registrada e a temperatura registrada às 21h).

A Figura 4.33 ilustra a variação da temperatura externa e das temperaturas superficiais internas. Observa-se que dentre as superfícies analisadas, a parede Leste do quarto de casal apresenta maior redução da sua temperatura durante o intervalo compreendido entre 21h e 7h, assim como ocorreu no primeiro exemplo do Experimento 2 (ventilação e insolação apenas pela manhã). Entretanto, entre os dias 22 e 26/01, as reduções das temperaturas externas durante a noite foram maiores do que entre os dias 31/03 e 03/04, resultando em maiores reduções das temperaturas superficiais internas (Figura 4.34). Comparando-se ambos os períodos (quatro primeiros dias de cada sequência), observa-se que o acúmulo de calor no período diurno é semelhante nos dois casos: 180,2Wh (Figura 4.35) e 184Wh (vide Figura 4.26). Já o somatório dos fluxos de calor positivos advindos da superfície interna da parede Leste (parcela de calor transmitida pela parede para o ambiente), em janeiro, totaliza 300,8 Wh (Figura 4.36), enquanto na outra sequência de dias o somatório total dos fluxos positivos foi igual a 121,2Wh (Figura 4.27). Ou seja, em janeiro, mesmo com um acúmulo de calor semelhante no período diurno, ocorreu maior perda do calor acumulado para o ambiente durante a noite, de modo que as temperaturas superficiais internas sofreram um maior decréscimo.

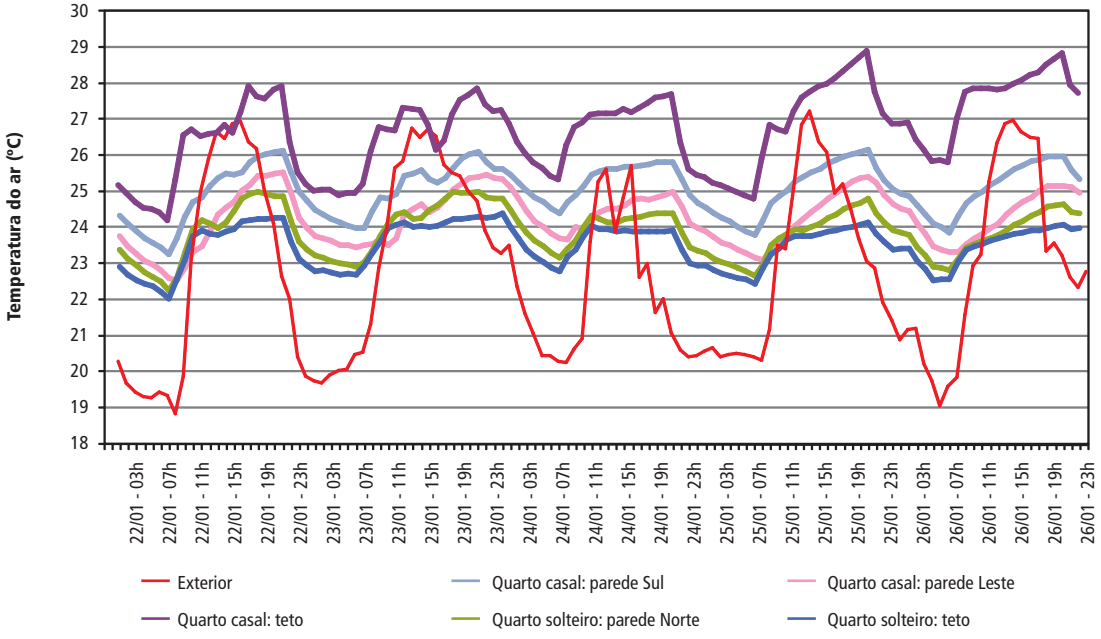


FIGURA 4.33 – Variação das temperaturas superficiais, período 22 a 26/01/2008.

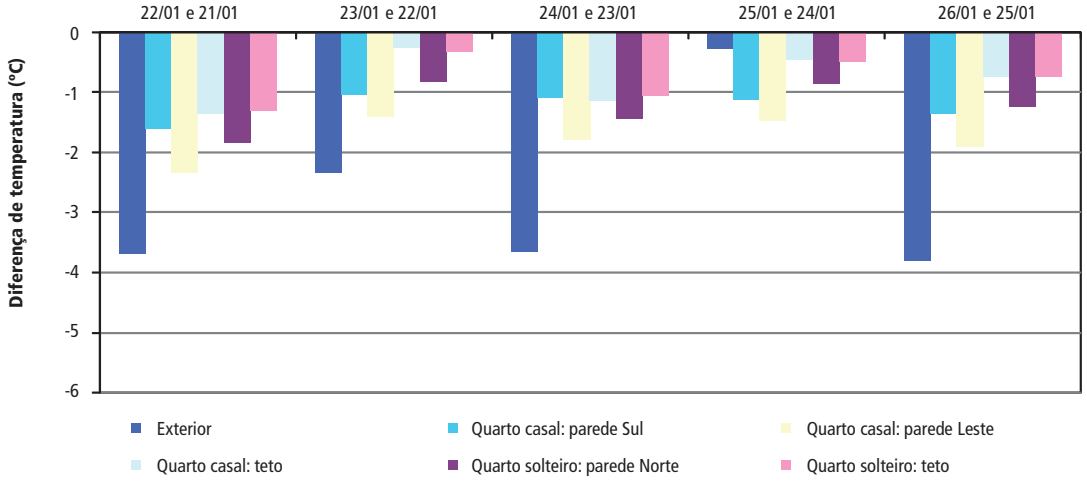


FIGURA 4.34 – Diferenças verificadas nas temperaturas do ar externo e nas temperaturas superficiais internas, entre 21h e 7h.

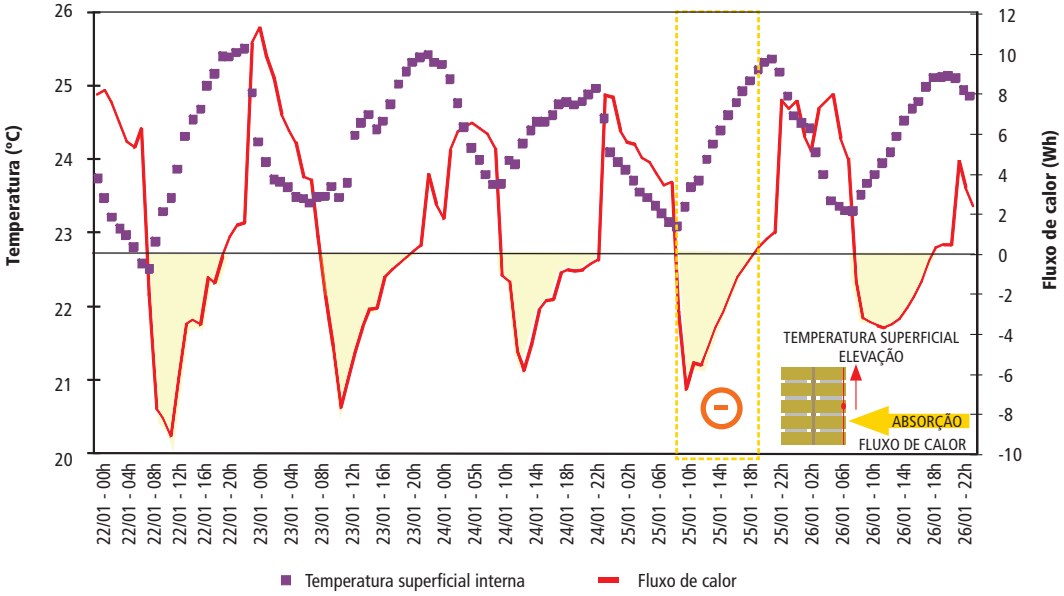


FIGURA 4.35 – Variação das temperaturas superficiais e fluxos de calor da parede Leste do quarto de casal, destacando-se o período diurno: 22 a 26/01/2008.

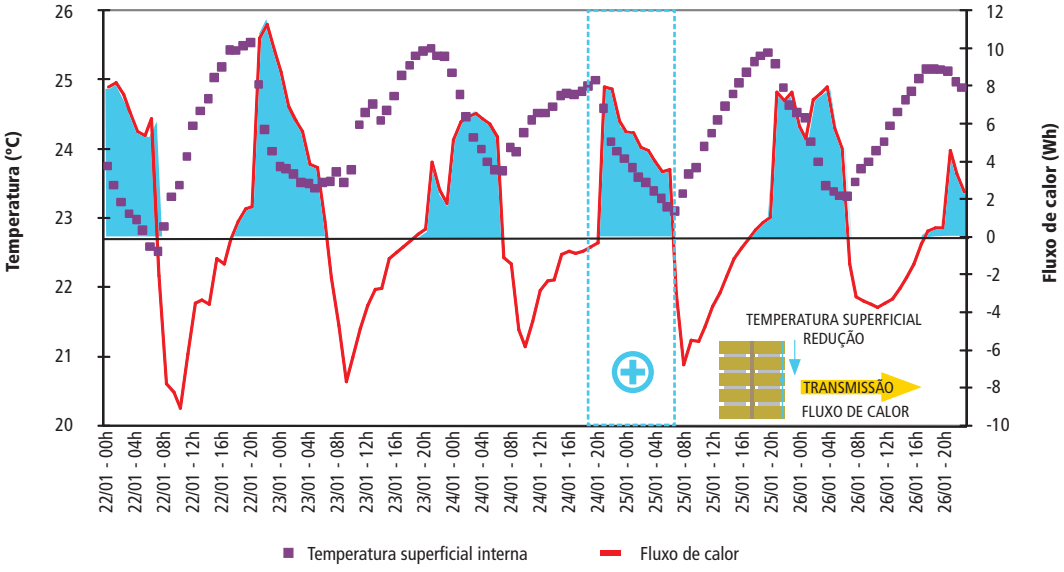


FIGURA 4.36 – Variação das temperaturas superficiais e fluxos de calor da parede Leste do quarto de casal, destacando-se o período noturno: 22 a 26/01/2008.

Quando se calcula o percentual de aproveitamento do resfriamento noturno para os dois períodos ilustrativos do Experimento 2, obtêm-se os valores indicados nas Tabelas 4.3 e 4.4. Os valores indicam as reduções de temperatura ocorridas durante o intervalo compreendido entre 7h e 21h do dia anterior, sendo que tais reduções correspondem à diferença entre a temperatura mínima registrada neste intervalo e a temperatura registrada às 21h. Os valores do percentual de aproveitamento do resfriamento noturno, PA (T_{ar}) foram calculados de acordo com a Equação 4.3.

Os potenciais de aproveitamento do resfriamento norturno correspondentes ao primeiro período analisado no Experimento 2 (Tabela 4.3) são inferiores em 10%, em média, em relação àqueles obtidos para o Experimento 1 (Tabela 4.5), considerando-se dias nos quais as reduções das temperaturas externas foram semelhantes. Isto indica que a exposição dos ambientes à ventilação e à insolação no período da manhã diminuiu o efeito de resfriamento da ventilação mecânica noturna sobre as temperaturas internas dos quartos. Já para o segundo período analisado no Experimento 2 (Tabela 4.4), observam-se maiores percentuais de aproveitamento.

TABELA 4.3 – Valores referentes ao experimento 2: ventilação/insolação (manhã) + ventilação mecânica noturna.

MARÇO/ABRIL	ΔTar(e) (°C)*	Percentuais de aproveitamento (%)	
		Quarto casal	Quarto solteiro
01/04 a 31/03	- 2,1	20	20
02/04 a 01/04	- 2,1	30	30
03/04 a 02/04	- 0,9	60	40
04/04 a 03/04	- 5,4	40	40

* Variação da temperatura externa entre os dias 31/03 a 04/04:15,5 °C a 28,1°C.

TABELA 4.4 – Valores referentes ao experimento 2: ventilação/insolação (manhã e tarde) + ventilação mecânica noturna.

JANEIRO	ΔTar (e) (°C)*	Percentuais de aproveitamento (%)	
		Quarto casal	Quarto solteiro
23 a 22/01	- 2,3	60	60
24 a 23/01	- 3,7	50	50
25 a 24/01	- 0,3	-	-
26 a 25/01	- 3,8	50	50

* Variação da temperatura externa entre os dias 22 a 26/01: 18,8 a 27,2°C.

Considerando-se dias nos quais a redução da temperatura externa foi semelhante para ambos os experimentos (células destacadas com as cores azul e vermelho nas Tabelas 4.3, 4.4 e 4.5), verifica-se a maior correspondência entre os resultados relativos ao primeiro período analisado no Experimento 2 (Tabela 4.3) e o Experimento 1 (Tabela 4.5), que representa a situação mais favorável ao desempenho do ventilação mecânica noturna.

TABELA 4.5 – Valores referentes ao Experimento 1: fechado, com ventilação mecânica.

FEVEREIRO	ΔTar (e) (°C)*	Percentuais de aproveitamento (%)	
		Quarto casal	Quarto solteiro
02/02 a 01/02	-2,4	40	30
03/02 a 02/02	-2,9	50	40
04/02 a 03/02	-6,2	50	50
05/02 a 04/02	-5,7	50	50
06/02 a 05/02	-6,2	40	30

* Variação da temperatura externa entre os dias 01/02 a 06/02:15,4 °C a 30,2°C.

Com base em tais resultados, conclui-se o seguinte:

EXPERIMENTO 2 – VENTILAÇÃO MANHÃ E TARDE

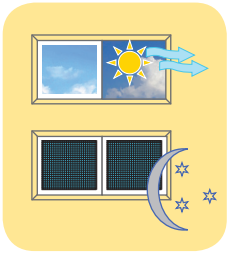
A redução das temperaturas internas durante a noite é mais afetada pela variação da temperatura externa do que pela quantidade de **calor armazenado nos componentes construtivos** durante o dia.

EXPERIMENTO 2 – VENTILAÇÃO MANHÃ

A admissão da ventilação e da insolação durante a manhã diminuiu sensivelmente o percentual de aproveitamento do insuflamento noturno, obtendo-se uma redução máxima da temperatura do ar interno equivalente a 40% da redução da temperatura externa entre as 21h e 7h.

4.3.5. Experimento 3: ventilação diurna, sem ventilação mecânica

Conforme já discutido, o emprego da ventilação no período diurno resultou na elevação gradual das temperaturas médias diárias dos ambientes internos. A este período corresponde o Experimento 3, caracterizado na Figura 4.37.



Duração do experimento: 07/01 a 11/01/08

Caracterização: Esquadrias abertas (9h - 12h e 14h - 17h)

Esquadrias fechadas (12h - 14h e 17h - 9h)

Variação da temperatura externa no período: 18 a 34,6ºC

FIGURA 4.37 – Experimento 3

No caso dos quartos, o uso da ventilação mecânica noturna poderia ter contribuído para minimizar o acúmulo de calor na envoltória. A Figura 4.38 ilustra as reduções ocorridas na temperatura do ar externo e dos ambientes internos entre 7h e 21h do dia anterior, enquanto a Figura 4.39 ilustra as diferenças verificadas nas temperaturas superficiais internas no mesmo intervalo.

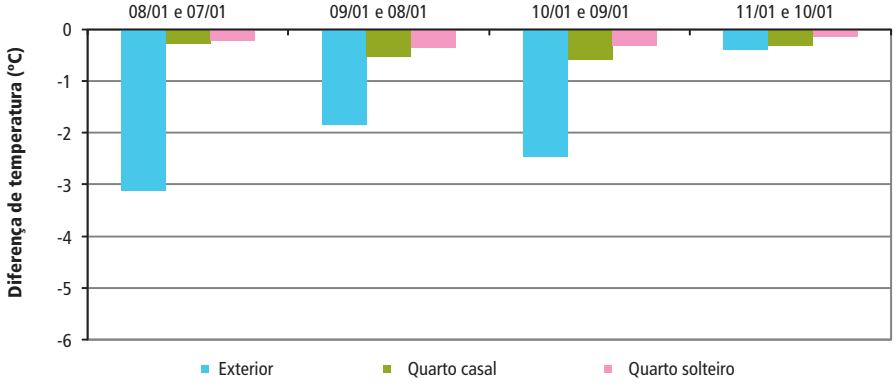


FIGURA 4.38 – Diferenças verificadas nas temperaturas do ar, externo e interno, entre 21h e 7h (diferença entre a temperatura mínima registrada e a temperatura registrada às 21h).

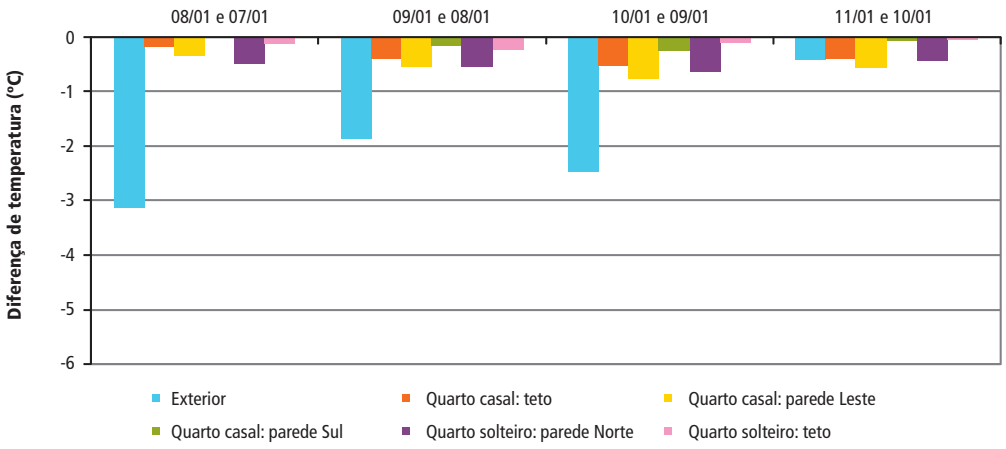


FIGURA 4.39 – Diferenças verificadas nas temperaturas do ar externo e nas temperaturas superficiais internas, entre 21h e 7h.

Com relação às temperaturas do ar, as reduções ocorridas nas temperaturas internas no Experimento 3 durante o intervalo considerado foram inferiores a 0,5ºC. Já a redução máxima da temperatura superficial foi verificada na parede Leste do quarto de casal, sendo igual a 0,7ºC. Calculando-se os percentuais de aproveitamento do resfriamento noturno, indicados na Tabela 4.6 (valores destacados correspondentes a sequência 10/01 a 09/01) foram inferiores àqueles obtidos no Experimento 2 (Tabelas 4.3 e 4.4) e também no Experimento 1 (Tabela 4.5).

TABELA 4.6 – Valores referentes ao Experimento 3: ventilação/insolação (manhã e tarde).

JANEIRO	ΔTar (e) (°C)*	Percentuais de aproveitamento (%)	
		Quarto casal	Quarto solteiro
08/01 a 07/01	-3,1	9	7
09/01 a 08/01	-1,9	29	19
10/01 a 09/01	-2,5	24	13
11/01 a 10/01	-0,4	9	7

* Variação da temperatura externa entre os dias 22 a 26/01: 18 a 34,6ºC.

EXPERIMENTO 3 – VENTILAÇÃO MANHÃ E TARDE, SEM VENTILAÇÃO MECÂNICA NOTURNA

O emprego da ventilação no período diurno, sem o uso da ventilação mecânica, resultou em menores percentuais de aproveitamento do resfriamento noturno, atingindo o valor máximo de 29%.

4.4. Conclusões sobre a ventilação mecânica noturna

A Figura 4.40 ilustra a variação das temperaturas externas e internas verificadas em cada um dos experimentos. Pode-se observar que em todos os experimentos em que a ventilação mecânica foi empregada, as temperaturas internas mantiveram-se inseridas na zona de conforto.

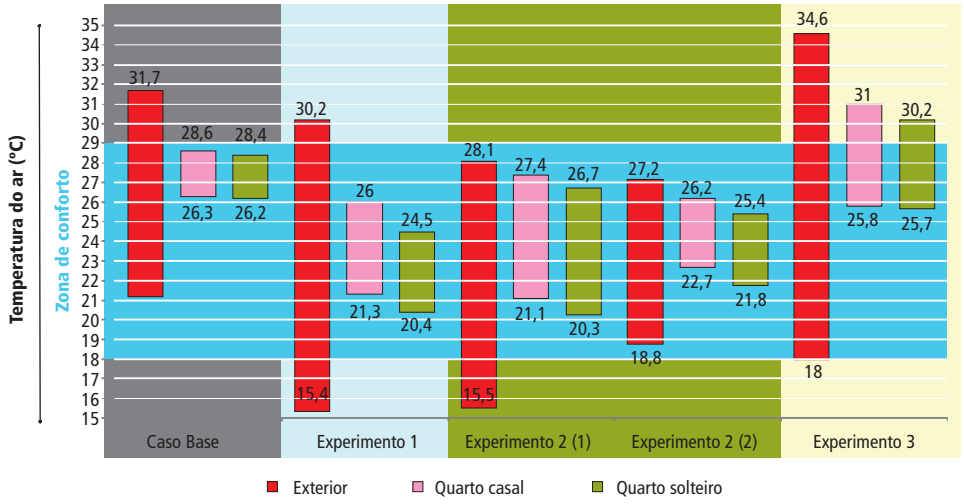


FIGURA 4.40 – Correspondência entre a variação das temperaturas do ar internas e externas e a zona de conforto nos experimentos relacionados à ventilação mecânica noturna.

De acordo com os resultados obtidos nos quatro experimentos analisados, pode-se concluir que a ventilação mecânica noturna beneficiou o desempenho térmico dos ambientes onde foi empregada. Isto foi demonstrado pelas reduções de temperatura do ar e pelos percentuais de aproveitamento do resfriamento noturno verificados durante a madrugada. Além disso, em todos os experimentos em que a ventilação mecânica foi empregada, as temperaturas máximas internas não ultrapassaram o limite da zona de conforto considerada, conforme ilustrado na Figura 4.40.

Pode-se concluir também que a admissão da ventilação e da insolação no período diurno afeta o desempenho da ventilação mecânica noturna. Entretanto, ao se restringir a ventilação e a insolação nos horários mais quentes do dia, principalmente entre 11h e 15h, o impacto sobre a eficácia da ventilação mecânica noturna é menor. Os percentuais de aproveitamento do resfriamento noturno verificados durante a madrugada foram semelhantes para o Experimento 1 (edificação totalmente fechada, com ventilação mecânica noturna) e para o segundo período analisado no Experimento 2 (ventilação pela manhã, com ventilação mecânica noturna). Tais resultados indicam que os ocupantes das edificações residenciais podem adaptar seu comportamento usual ao manipular as esquadrias, beneficiando-se pelo uso da ventilação cruzada no período diurno e pela ventilação mecânica no período noturno.

Com relação à instalação dos insufladores nos ambientes, salientou-se a importância do adequado posicionamento destes equipamentos, em posição oposta às aberturas de saída de ar, facilitando a renovação do ar ambiente. Igual importância tem o direcionamento dos fluxos de ar, que devem atingir as áreas de maior ocupação do ambiente, que no caso dos quartos corresponde à área de localização das camas.

A análise da eficácia da ventilação mecânica noturna na Casa Eficiente teve como limitação a quantidade de experimentos que puderam ser realizados durante o período de monitoramento disponível, correspondente a uma quinzena mensal, entre dezembro de 2007 e março de 2008. Considerando-se que a duração de cada experimento era de, no mínimo, uma semana, e que havia outros experimentos a serem realizados durante o verão, o período total de emprego da ventilação mecânica noturna se estendeu de 18/01 a 04/04/2008.

Convém salientar que a análise da eficácia desta estratégia pode ser aprofundada com o auxílio de simulações computacionais, possibilitando avaliar outras combinações de períodos de ventilação diurna e noturna, bem como outras vazões do ar insuflado. Entretanto, a presente análise demonstra o potencial da ventilação mecânica noturna, que se justifica também pelo baixo consumo de energia relativo aos insufladores mecânicos.

AEROTEC

5. Telhado vegetado

Autor:
Sergio Parizotto Filho

Este capítulo apresenta as pesquisas desenvolvidas sobre telhado vegetado, dispositivo ainda pouco conhecido e empregado no Brasil. Os objetivos principais constituem-se na apresentação do dispositivo, assim como na descrição de seu comportamento térmico.

5.1. Apresentação

A incorporação de vegetação nas superfícies construídas apresenta-se oportuna no processo de requalificação ambiental das cidades, possibilitando o aumento da proporção de áreas verdes nos centros urbanos, uma tarefa difícil até então devido à escassez de espaços livres e aos processos de especulação imobiliária. Dentro desse contexto, os telhados vegetados apresentam-se como sistemas de coberturas constituídos por camadas especiais que proporcionam a sobrevivência e integridade física de uma massa de vegetação sobre a superfície superior da edificação.

A tecnologia dos telhados vegetados tem sido largamente investigada e utilizada nas últimas décadas em diversas cidades ao redor do mundo como estratégia bioclimática para o aumento da eficiência energética das edificações e do conforto térmico dos usuários. Além da economia de energia, grande parte do interesse na tecnologia deve-se a muitas outras vantagens socioambientais, sendo as principais o potencial para redução de enchentes urbanas e mitigação dos efeitos climáticos de ilhas de calor, problemas comuns a quase todas as áreas densamente ocupadas.

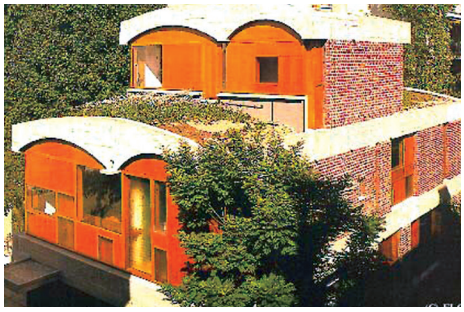
As vantagens observadas, principalmente nos períodos de calor, sugerem que a adoção maciça dos telhados vegetados nos centros urbanizados poderia assumir um papel importante na adaptação das cidades às mudanças climáticas. Para tanto, a especificidade climática de cada cidade requer estudos do desempenho térmico dos telhados vegetados *in loco*, para que estes possam ser utilizados corretamente como parte da infraestrutura urbana.

O Laboratório de Monitoramento Bioclimático e Eficiência Energética (LMBEE) investigou o comportamento térmico do telhado vegetado da Casa Eficiente, analisando o benefício do uso deste dispositivo no clima de Florianópolis. Para tal, foram feitas análises da influência da vegetação e do substrato no microclima interno e externo, assim como no fluxo de calor através da cobertura, comparando também o desempenho do telhado vegetado em relação às demais coberturas da Casa (telhado cerâmico e telhado metálico), a partir da obtenção de dados ambientais experimentais.

5.2. Contexto histórico e atual dos telhados vegetados

A incorporação de vegetação em superfícies construídas, verticais ou horizontais, é uma prática construtiva bioclimática milenar que pode ser observada em diversas arquiteturas vernaculares ao redor do planeta. Tendo como exemplo mais antigo (2113 A.C.) o templo do Zigurate de Nanna, em Ur, na Mesopotâmia (atualmente Mugaiyir, Iraque), a história dos telhados vegetados passa por civilizações antigas como os Romanos e os Vikings. Estes últimos disseminaram o conceito em localidades como a Islândia, onde os telhados vegetados turfados foram largamente utilizados até meados da 2a guerra mundial (Figura 5.1a). Exemplos são encontrados no México pré-colombiano, Índia, Espanha e Rússia durante os séculos XVI e XVII. No começo do século XX, dois grandes expoentes da Arquitetura Moderna utilizaram telhados vegetados em seus projetos: Frank Lloyd Wright utilizou intensamente paredes e telhados vegetados em suas obras, podendo-se citar como exemplo o projeto "Walter House" em Iowa. Le Cobusier destacava os telhados vegetados como um dos elementos de uma nova arquitetura. Uma das residências em que o arquiteto empregou o dispositivo foi a "Maison Jaoul" em Paris (Figura 5.1b).

(a)



(b)

FIGURA 5.1 – Contexto histórico dos telhados vegetados: (a) telhados vegetados turfados, Islândia (MAGNUSSON, 1987) e (b) "Maison Jaoul" de Le Corbusier, França (CURTIS, 1986).

A partir da metade do século XX, os telhados vegetados deixaram de ser somente uma prática construtiva vernacular remanescente, passando a ser largamente adotados no Norte da Europa. Tal renascimento ocorreu principalmente devido ao surgimento de questões relativas à qualidade do ambiente urbano e perda acelerada de espaços verdes nas áreas intensamente desenvolvidas (PECK; KUHN, 1999).

No início da década de 60 a tecnologia dos telhados vegetados foi desenvolvida e aprimorada em muitos países Europeus, destacando-se Suíça e Alemanha. Nos anos 70 uma significativa quantidade de pesquisas técnicas dos diferentes componentes de um telhado vegetado foi produzida principalmente na Alemanha, onde o mercado destes se expandiu rapidamente a partir da década de 80 (Figura 5.2). Este crescimento foi estimulado por legislações estaduais e municipais fundamentadas em critérios de eco-design e subsídios monetários. Estima-se que mais de 10% de todos os telhados planos na Alemanha possuem algum tipo de telhado vegetado, algo equivalente a 55 milhões de metros quadrados de área vegetada (PECK; KUHN, 1999).

(a)

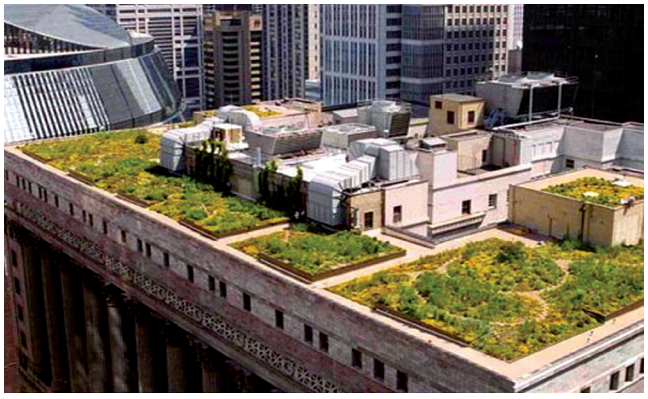
(b)

FIGURA 5.2 – Telhados vegetados na Alemanha: (a) telhados vegetados em Hannover (MINKE, 2000) e (b) telhados vegetados em Berlim, (MINKE, 2000).

Estas políticas de implementação de telhados vegetados têm como pontos motivadores os benefícios associados com o gerenciamento do escoamento pluvial e com o potencial de mitigação de ilhas de calor urbano. Adicionalmente, são considerados benefícios como melhoria da qualidade do ar, maior isolamento termo-acústico, aumento do tempo de vida útil, diminuição das patologias em sistemas construtivos, diminuição do estresse urbano e criação de novas paisagens na morfologia urbana.

Na última década, o processo de difusão da tecnologia ganhou espaço na América do Norte (Canadá e EUA), e na Ásia (Japão, China e Cingapura), de onde despontam pesquisas e projetos municipais incentivados por entidades governamentais (Figura 5.3). Na América do Norte, o processo de difusão parece nos últimos anos ter se consolidado com o apoio da educação pública, de pesquisas científicas e de exemplos acessíveis, com grande parte das indústrias de impermeabilização oferecendo atualmente serviços de vegetamento de telhados.

(a)



(b)

FIGURA 5.3 – Difusão dos telhados vegetados na Ásia e América do Norte: (a) edifício Acros Fukuoka, Japão (EMILIO AMBASZ & ASSOCIATES, 2008) e (b) prefeitura de Chicago, EUA (CHICAGO, 2008).

No Brasil, a tecnologia é praticamente desconhecida, tendo vivido uma relativa experiência durante o período moderno com a difusão do conceito corbuseano de terraço-jardim, o que, no entanto, foi apenas explorado sob o viés estético, podendo-se citar como um dos exemplos o terraço-jardim do Ministério da Educação e Cultura no Rio de Janeiro (Figura 5.4), projetado por Burle Marx (KÖHLER et al.,

2003). Existem poucos projetos contemporâneos executados e poucas pesquisas científicas realizadas, havendo, assim, grande falta de conhecimento do assunto por parte dos setores industriais, órgãos municipais e população em geral.

FIGURA 5.4 – Ministério da Educação e Cultura (MEC), Rio de Janeiro (KÖHLER et al., 2003).

5.3. Tipologias e características físicas

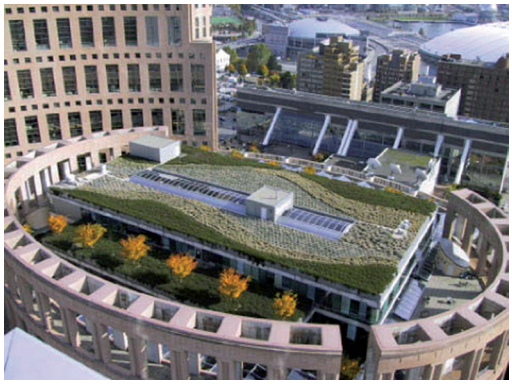
Quanto às tipologias construtivas, existem basicamente dois tipos de telhados vegetados: extensivos e intensivos. Os extensivos são caracterizados pelo seu baixo peso (70 a 170kg/m^2), pela camada de substrato delgada (5 a 15cm), pela baixa necessidade de manutenção (espécies de plantas rasteiras e tolerantes à seca), e pelo baixo custo (Figura 5.5). Podem ser incorporados em coberturas existentes sem necessidade de modificações estruturais e podendo ser edificados com inclinação de até 40% (PECK; KUHN, 1999).

(a)

(b)

FIGURA 5.5 – Telhados vegetados extensivos: (a) residências em Dusseldorf, Alemanha (MINKE, 2000) e (b) residências em Siegen, Alemanha (MINKE, 2000).

Segundo estes mesmos autores, os intensivos são caracterizados pelo alto peso (300 a 900kg/m^2, podendo suportar até arvores), pela camada de substrato espessa (20 a 60cm), pela grande necessidade de manutenção (maior variedade de plantas, necessidade de irrigação frequente), e pelo alto custo (Figura 5.6).



(a)

(b)

FIGURA 5.6 – Telhados vegetados intensivos: (a) livraria em Vancouver, Canadá (VANCOUVER, 2008) e (b) edifício ACROS Fukuoka, Japão (ACROS, 2008).

Os telhados vegetados empregados na Casa Eficiente são do tipo extensivo. Descrevem-se a seguir as características físicas das camadas constituintes desta tipologia. Minimamente, um telhado vegetado extensivo necessita de uma camada de impermeabilização, uma camada drenante, uma camada de substrato e a camada de vegetação (Figura 5.7). Dependendo dos materiais utilizados, camadas adicionais deverão ser incluídas.

FIGURA 5.7 – Constituição mínima de um telhado vegetado extensivo.

A camada de vegetação de um telhado vegetado extensivo deve estar preparada para condições ambientais extremas e para sobreviver em camadas mínimas de substrato. As espécies vegetais utilizadas devem suportar a exposição direta e indireta aos raios solares, aos ventos predominantes, geadas e condições de congelamento (quando for o caso). As plantas mais recomendadas para os telhados vegetados extensivos são as rasteiras e suculentas, de fácil regeneração, nativas da localidade em que se encontra o mesmo. Tais plantas possuem mecanismos especiais de adaptação e sistemas de enraizamento rasteiro que se adaptam a camadas de substrato delgadas e condições ambientais extremas.

A camada de substrato pode ser constituída de solo, resíduos agrícolas ou outros materiais, geralmente refugos industriais (serragem, borracha), devendo ter seu peso conforme a capacidade estrutural da cobertura. Deve proporcionar uma firme ancoragem das raízes para assegurar o crescimento adequado das plantas, fornecendo os nutrientes essenciais para tal. O substrato deve possuir boa drenagem para assegurar a quantidade adequada de água disponível para as plantas, prevenindo o afogamento de suas raízes e evitando processos erosivos.

No caso de substratos compostos de solos, o ideal para telhados vegetados extensivos deve ser composto por 75% de solo mineral e 25% de solo orgânico. O primeiro é caracterizado pela alta porosidade que permite a retenção de água, drenagem e aeração. O segundo é caracterizado pela presença de húmus e compostos orgânicos altamente fibrosos que permitem a nutrição das plantas.

Se o substrato utilizado for à base de solos, será indispensável também, a camada geotêxtil filtrante, que deve evitar o lixiviamento das partículas mais finas do solo para a camada de drenagem, processo que poderia inutilizar a mesma. O material utilizado na fabricação deve ser leve, à prova de raízes e permanente.

A camada drenante serve para remoção do excesso de água quando as camadas de vegetação e de substrato ficam saturadas, e para armazenamento de água para as plantas nos períodos mais secos. Pode ser constituída de uma camada de agregados graúdos (brita, seixo, argila expandida), por painéis de espuma absorvente, ou pode ser constituída especialmente por uma camada manufaturada que possui diversos recipientes (como uma colméia) para armazenamento da água captada.

A camada impermeabilizante é tipicamente constituída de materiais termoplásticos, devendo ser afixada seguramente na camada estrutural. Se a camada de impermeabilização não possuir agentes químicos de proteção antirraízes, uma camada adicional deve ser aplicada para a realização de tal função, sendo esta denominada barreira antirraízes, podendo ser de polietileno de alta densidade (PEAD) de no mínimo 200 micras de espessura.

5.4. Função térmica e benefícios relacionados

Pesquisas científicas recentes sobre comportamento térmico de telhados vegetados sugerem que neste conjunto físico, as funções biológicas das plantas são responsáveis pela absorção de uma proporção da radiação solar incidente, gerando o resfriamento passivo dessa cobertura. Somado a isto, o efeito sombreador da camada de vegetação sobre as superfícies construídas, o albedo da vegetação e a baixa difusividade térmica oferecida pela camada de solo úmida (massa térmica), contribuem na diminuição das temperaturas superficiais, assim como na diminuição do fluxo de calor para o interior das edificações através da cobertura (DEL BARRIO, 1998; NIACHOU et al., 2001; KÖHLER et al., 2001; BASS e BASKARAN, 2001; LIU, 2003; WONG et al., 2003; LAZZARIN et al., 2005; SONNE, 2006).

Ao contrário do que se imaginou durante algum tempo, os telhados vegetados não funcionam como isolantes térmicos, mas sim como dispositivos armazenadores de calor. Sua efetividade neste processo é devida, primariamente, à sua alta capacidade térmica associada a grandes trocas de calor latente.

A diminuição do fluxo de calor para dentro das edificações pode ser de grande interesse para a melhoria do conforto interno, através da redução dos ganhos térmicos excessivos nos períodos mais quentes, implicando na redução do consumo de energia elétrica para refrigeração. A diminuição das temperaturas superficiais implica na diminuição das temperaturas do microclima urbano, de maneira que uma aplicação de telhados vegetados em larga escala poderia reduzir os efeitos nocivos das ilhas térmicas de calor.

5.5. Melhoria do desempenho térmico e economia de energia da edificação

Pesquisas relacionadas à performance energética e propriedades térmicas de telhados vegetados têm verificado que os mesmos melhoram o desempenho térmico da edificação, proporcionando redução no consumo de energia principalmente com refrigeração nos períodos quentes (LIU, 2002; SONNE, 2006).

Onmura et al. (2001) conduziram medições em um telhado vegetado no Japão, mostrando que o efeito de resfriamento evaporativo de um telhado vegetado de grama representa uma redução de 50% no fluxo de calor para o ambiente interno. Esta pesquisa também revelou uma redução na temperatura superficial de 60 para 30ºC durante o dia. A importância da evaporação na redução do fluxo de calor foi quantitativamente simulada através de uma série de experimentos em túnel de vento e cálculos numéricos.

Liu (2003) realizou estudos em uma edificação experimental em Ottawa, dotada de um telhado vegetado e um telhado convencional de concreto de iguais dimensões, ambos monitorados e com as condições de utilização controladas, descobrindo que a energia requerida para o condicionamento devido ao fluxo de calor através do telhado vegetado foi reduzido em mais de 75%. Foi demonstrado que os telhados vegetados são mais eficientes na redução do ganho de calor (redução de 95%) do que na redução da perda de calor (redução de 26%). Enquanto o telhado plano convencional de referência tem uma demanda diária média de energia de 6,0 a 7,5kW/dia, o telhado vegetado apresenta demanda de 1,5kW/dia para resfriamento.

5.6. Redução do efeito urbano de ilha de calor

Nas áreas densamente urbanizadas, o armazenamento de calor pelos edifícios, a troca de calor entre estes, a diminuição do resfriamento evaporativo, a diminuição da ventilação e as fontes antropogênicas de calor (indústrias, veículos, condicionadores de ar, etc.) dão origem às ilhas de calor urbano (Figura 5.8), anomalia térmica em que a temperatura de superfície do ar urbano fica superior à da vizinhança não urbanizada, podendo acontecer em diferentes escalas, variando também temporal e sazonalmente. Tal aumento de temperatura implica em um aumento no consumo de energia para refrigeração nos períodos quentes (OKE, 1982).

Pesquisas relacionadas aos efeitos das elevadas temperaturas urbanas na qualidade do ar, no consumo de energia e na saúde humana, têm impulsionado motivação para a busca de estratégias para mitigação das ilhas de calor urbano, que podem ser divididas em duas categorias: buscar o aumento do albedo urbano (refletância à radiação solar) e buscar o aumento da evapotranspiração. A primeira consegue-se através das tecnologias de ponta em pavimentação e coberturas, e a segunda é conseguida através da substituição de superfícies impermeabilizadas por vegetação, seja através do plantio de árvores ou arbustos sombreadores ou através da incorporação de vegetação em paredes e telhados (SAILOR, 2006).

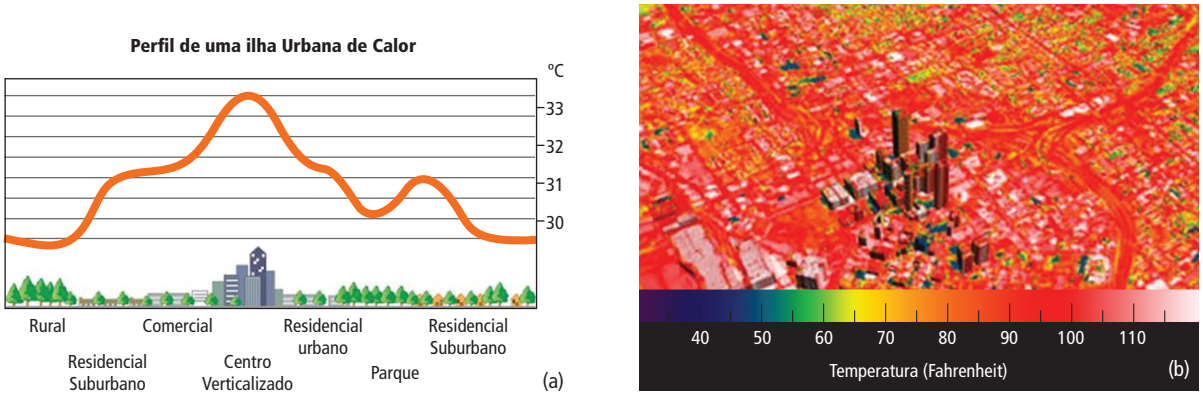


FIGURA 5.8 – Ilhas de calor urbanas: (a) perfil de uma Ilha urbana de calor (LBL, 2008) e (b) ilha urbana de calor em Atlanta (NASA, 2008).

A vegetação estrategicamente colocada nos arredores da edificação protege sua envoltória da radiação solar direta, contribuindo para a redução das temperaturas superficiais externas desta através do sombreamento direto (a envoltória passa, consequentemente, a emitir menos radiação de onda longa). Além disso, os processos biológicos das plantas (crescimento, fotossíntese, respiração, evapotranspiração) consomem grande quantidade de energia solar (calor incidente), fazendo com que a vegetação apresente menores temperaturas radiantes do que superfícies construídas que possuem o mesmo albedo. Tais fatores reduzem a variação diária de temperatura e diferenças térmicas entre inverno e verão, contribuindo diretamente para diminuição do efeito de ilha de calor (AKBARI et al., 1997).

Krayenhoff et al. (2003) utilizaram modelagem para mensurar o efeito dos telhados vegetados nas ilhas urbanas de calor em Toronto. Utilizando um modelo em mesoescala e parâmetros de superfícies naturais e superfícies urbanizadas, temperaturas do ar de baixo nível (próximo ao solo urbano) foram estimadas para um período de 48 horas em junho. Tal simulação assumiu 50% de cobertura por telhados vegetados e mostrou uma redução de 1ºC nas temperaturas urbanas de baixo nível. Com a adição de irrigação, o resfriamento advindo dos telhados vegetados passaria para 2ºC.

5.7. Comportamento térmico do telhado vegetado da Casa Eficiente

5.7.1. Descrição física do telhado vegetado e demais coberturas da Casa

Nas coberturas da Casa Eficiente, diferentes tipos de telhados foram empregados, sendo eles telhado cerâmico, telhado metálico e telhado vegetado (Figura 5.9). Na porção central da casa situa-se o telhado metálico (onde estão as placas solares fotovoltaicas) sobre a área das salas de estar/jantar. Nas laterais situam-se os telhados cerâmicos e vegetados. Na lateral Oeste o telhado cerâmico está sobre a cozinha e o telhado vegetado está sobre o banheiro. Na lateral Leste o telhado cerâmico está sobre o quarto de casal e o telhado vegetado está sobre o quarto de solteiro.

FIGURA 5.9 – Coberturas da Casa Eficiente.

A cobertura central é composta por telhas metálicas com pintura branca e isolamento em manta de lã de rocha sobre forro de madeira OSB (Figura 5.10). As coberturas laterais inclinadas são constituídas por telhas cerâmicas claras, barreira radiante em manta de polietileno aluminizado em ambas as faces e isolamento em manta de lã de rocha sobre forro de madeira OSB (Figura 5.11). As coberturas laterais horizontais são dotadas de telhados vegetados extensivos, constituídos de vegetação tipo Bulbine, substrato de terra vegetal, filtro geotêxtil, drenagem de brita e seixo rolado, isolamento em poliestireno extrudado, impermeabilizante não asfáltico sobre laje de concreto armado (Figura 5.12).

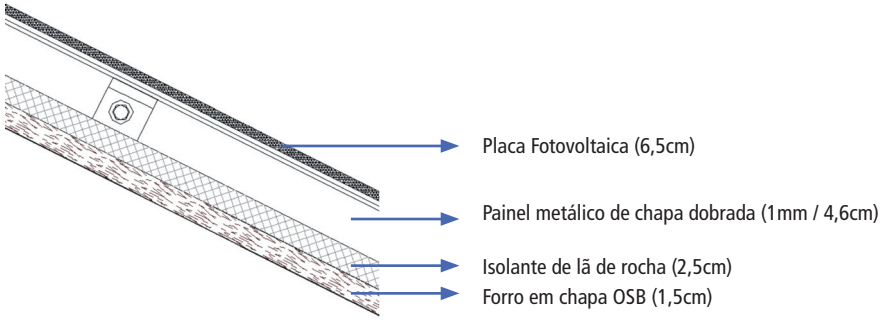


FIGURA 5.10 – Corte da cobertura metálica.

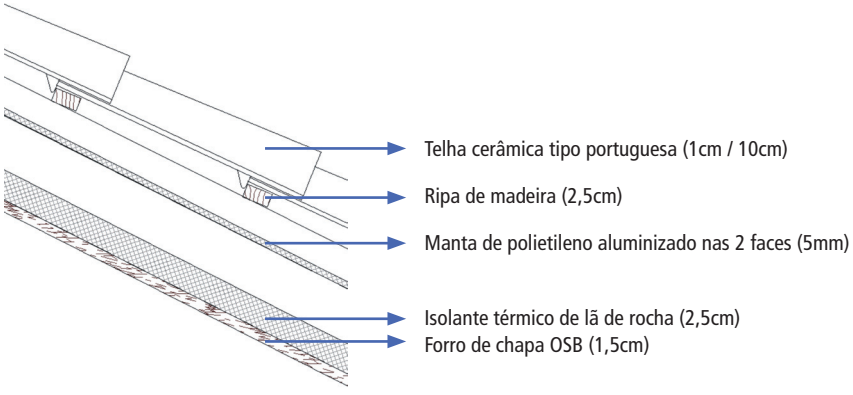


FIGURA 5.11 – Corte da cobertura cerâmica.

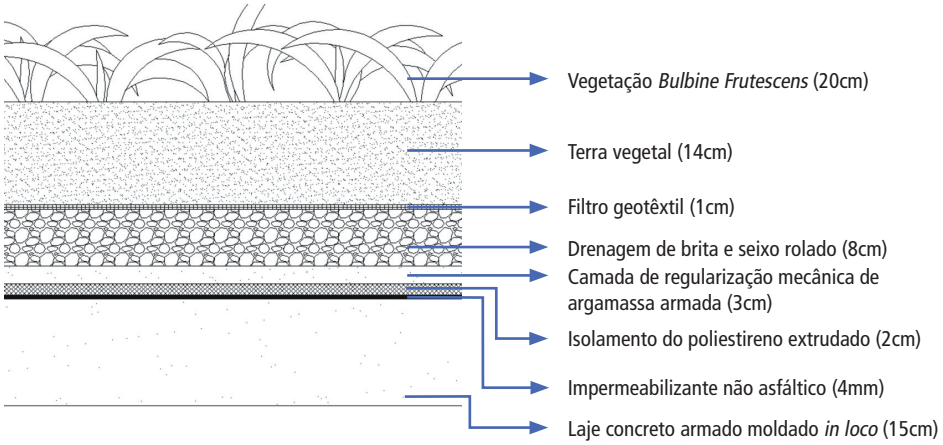


FIGURA 5.12 – Corte da cobertura vegetada.

As espécies vegetais designadas primeiramente no projeto foram "Bulbine" *(Bulbine frutescens)* e "Onze-horas" *(Portulaca grandiflora)*. Contudo, com o andamento da pesquisa, verificou-se a necessidade de se retirar a espécie "Onze-horas", pelo fato de sua sazonalidade deixar o solo exposto durante outono e inverno. Nesta situação, a temperatura superficial do solo atinge valores muito elevados, comprometendo o desempenho térmico do telhado vegetado. Os espaços descobertos foram preenchidos com Bulbine. Os dados analisados para verificação do desempenho em diferentes condições climáticas consideram somente os dados a partir desta substituição.

5.7.2. Instrumentação – variáveis ambientais internas e externas

A Casa Eficiente conta com um sistema de monitoramento térmico cujos dados das variáveis ambientais internas e externas, consumo de energia por uso final e fluxos de calor através das vedações são registrados e armazenados em um microcomputador. Internamente em cada ambiente monitorado, o sistema conta com dois pontos de medições: um localizado em uma das paredes, e um localizado no teto.

As variáveis ambientais internas registradas pelo sistema de monitoramento são temperatura do ar, temperatura superficial, umidade relativa do ar e fluxo de calor. Externamente, em cada ambiente monitorado, o sistema conta também com dois pontos de medições: um localizado em uma das paredes, e um localizado na cobertura. A variável ambiental externa registrada pelo sistema de monitoramento é somente a temperatura superficial.

Além das variáveis coletadas pelo sistema de monitoramento, variáveis ambientais externas são registradas em uma miniestação meteorológica (distante, aproximadamente, 20 metros da Casa Eficiente), sendo elas: temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade e direção dos ventos, radiação solar e precipitação.

O sistema de monitoramento térmico do telhado vegetado sobre o quarto de solteiro (o único ambiente que será aqui estudado) foi projetado para registrar o perfil de temperaturas das camadas constituintes, o conteúdo volumétrico de água da camada de solo, o fluxo de calor através da cobertura e as variáveis ambientais internas e externas.

A verificação da temperatura do ar interno e das temperaturas superficiais internas e externas foi realizada por termopares tipo T (espessura AWG 24, flexível, com isolamento em PVC).

A verificação da temperatura do ar externo foi realizada pela miniestação meteorológica. Devido a atrasos na implantação desta, alguns meses de análise foram efetuados com dados da estação meteorológica do LABSOLAR-UFSC, estação situada a uma distância aproximada de 520m da Casa Eficiente.

A verificação do perfil de temperaturas no telhado vegetado é também realizada através de termopares tipo T (espessura AWG 24, flexível, com isolamento em PVC), instalados nas diferentes camadas constituintes (camada de seixo-rolado/camada de brita, camada de terra e camada de vegetação).

A verificação da umidade na camada de terra do telhado vegetado foi realizada com um sensor específico para medição do conteúdo volumétrico de água na mesma.

A medição de fluxo de calor através do telhado vegetado foi realizada com um fluxímetro de gradiente e tangência instalado na superfície interna da cobertura, equipamento desenvolvido pelo LMPT/UFSC.

5.7.3. Períodos das análises microclimáticas internas e externas

Os dados considerados como válidos para as análises do comportamento térmico do telhado vegetado vão de julho de 2007 até julho de 2008. Neste conjunto de dados foram realizados balanços mensais e anuais das variáveis analisadas, assim como foram selecionados períodos amostrais de interesse (condições externas diferenciadas) para análise do comportamento térmico do ambiente coberto pelo telhado vegetado.

5.7.4. Experimentos adicionais com termografia de infravermelho

A termografia de infravermelho foi utilizada como recurso de análise e ilustração fotográfica da distribuição de temperaturas superficiais externas das coberturas analisadas. A temperatura de qualquer ponto da foto pode ser obtida com o auxílio de uma escala de temperaturas.

5.7.5. Desempenho térmico no verão

5.7.5.1. Condições climáticas da semana de análise

Elegeu-se para análise de desempenho térmico no período quente uma semana de altas temperaturas do mês de março de 2008 (Figura 5.13), mês em que as máximas são as mais altas do ano, segundo as normais climatológicas de Florianópolis. Neste período, a umidade relativa do ar também apresentou valores elevados, havendo registros de chuva nos três primeiros dias da semana, caracterizando bem o período como quente e úmido. Em todos os dias deste período a casa encontrava-se completamente fechada e sem ocupação.

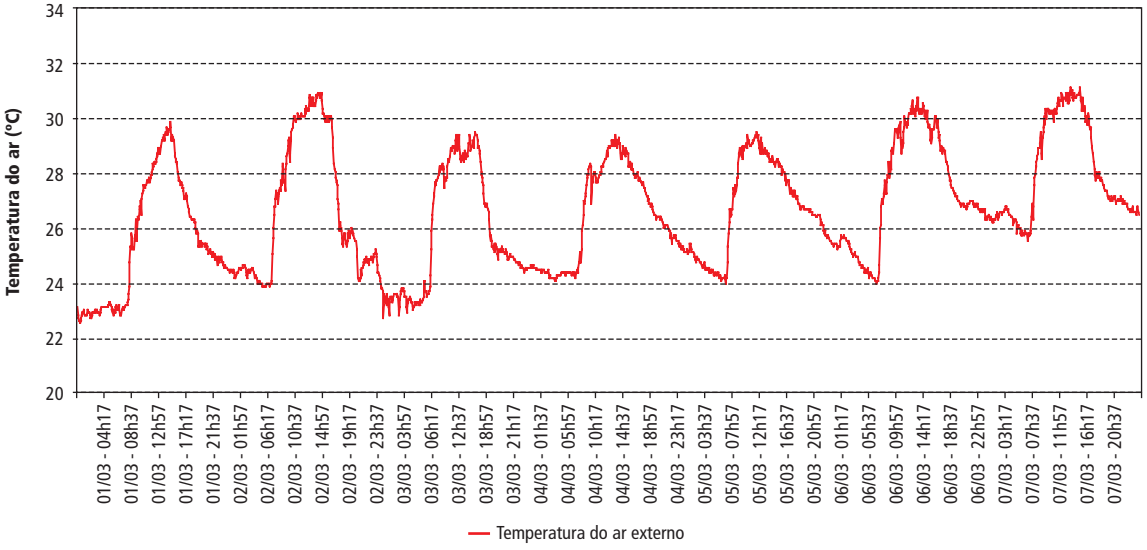


FIGURA 5.13 – Temperatura do ar externo (01/03 a 07/03/2008).

A Figura 5.14 e a Tabela 5.1 mostram as condições climáticas externas da semana analisada (radiação solar, temperatura e umidade do ar, velocidade do vento, precipitação, evapotranspiração estimada e conteúdo volumétrico de água no solo). Como pode ser observado, com uma temperatura diária média de 25,7ºC, todos os dias receberam alta carga de radiação solar, com um valor acumulado diário médio de 0,8kW/m². Os dias apresentaram ventos com valores médios diários de 1,4m/s, umidade relativa média de 73,1%, havendo precipitação nos três primeiros dias com um valor total acumulado de 106,3mm. Os valores de evapotranspiração estimada (obtidos pelo método de MEDEIROS, 2002) mostraram-se também elevados, com um valor diário médio de 4,1mm/dia.

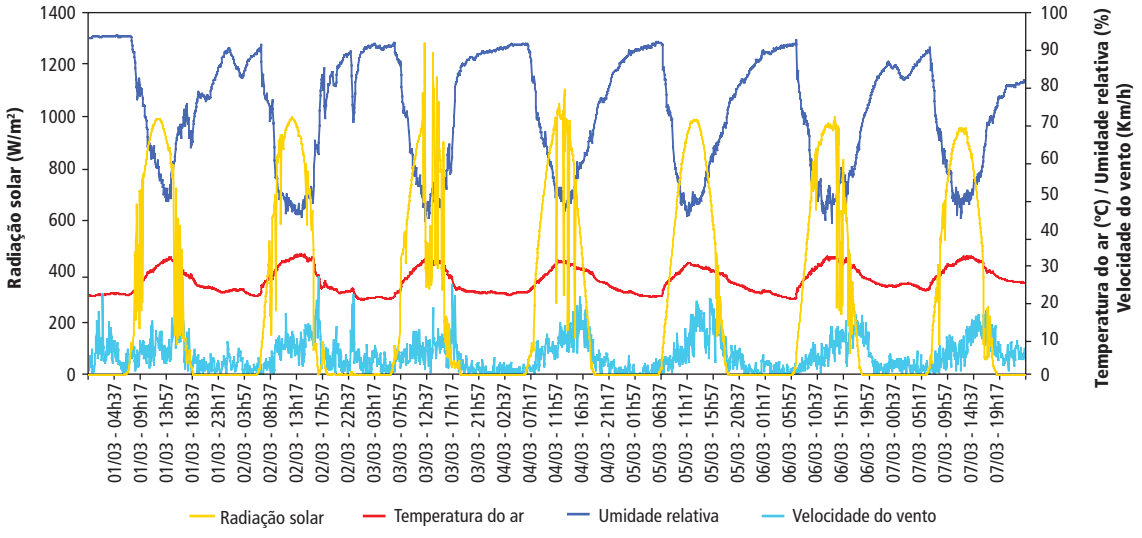


FIGURA 5.14 – Temperatura e umidade do ar externo, radiação solar e velocidade do vento (01/03 a 07/03/2008).

TABELA 5.1 – Temperatura e umidade do ar externo, precipitação, radiação solar, velocidade do vento, evapotranspiração estimada e conteúdo volumétrico de água no solo (01/03 a 07/03/2008).

Elementos climáticos	01/03	02/03	03/03	04/03	05/03	06/03	07/03	Média
Temperatura máxima (ºC)	32,1	33,0	31,9	31,9	30,8	32,3	32,5	32,1
Temperatura média (ºC)	24,9	26,0	24,7	25,6	25,4	26,1	27,1	25,7
Temperatura mínima (ºC)	20,8	21,5	20,5	21,7	21,2	20,6	23,1	21,3
Umidade relativa máxima (%)	93,3	91,1	91,5	91,1	91,9	92,1	90,4	91,6
Umidade relativa média (%)	78,4	71,4	74,4	73,4	72,2	71,2	71,1	73,1
Umidade relativa mínima (%)	46,3	42,5	42,1	43,6	42,8	41,7	42,9	43,1
Precipitação pluviométrica (mm)	66,8	11,1	28,4	0,0	0,0	0,0	0,0	-
Radiação solar (kW/m²)	0,8	0,8	0,7	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Velocidade do vento média (m/s)	1,6	1,4	1,4	1,3	1,4	1,3	1,4	1,4
Evapotranspiração estimada (mm/dia)	4,2	4,2	4,2	4,1	4,1	4,2	4,1	4,1
Conteúdo volumétrico de água no solo (m³/m³)	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2	0,3

5.7.5.2. Perfil de temperaturas e fluxo de calor

A magnitude dos efeitos térmicos de um telhado vegetado no verão dependerá de seus parâmetros físicos, tais quais tipo de substrato e vegetação. Enquanto a evapotranspiração, sombreamento e alta refletividade à radiação solar fornecida pela vegetação diminuem grande parte da radiação solar incidente, as camadas de terra, brita e seixo adicionam massa térmica ao sistema, atrasando e amortecendo o processo de transferência de calor. Como observado na Figura 5.15 e na Tabela 5.2, com uma amplitude diária média da temperatura do ar no período igual a 10,7ºC, a temperatura da vegetação varia de 21,7ºC a 39,4ºC. No solo, essa variação é de 22,3ºC a 31,1ºC, e na brita/seixo a variação é de 20,3ºC a 30,1ºC. Os valores de amplitude diária média destas camadas são, respectivamente, 14,4ºC, 6,3ºC e 7,9ºC. Internamente, a temperatura superficial da laje varia na semana de 24,0ºC a 27,9ºC, com uma amplitude diária média de 1,2ºC. Em momentos em que a temperatura do ar externo atinge 30,9ºC, a temperatura da vegetação é de 39,4ºC, a do solo é de 31,1ºC e a da brita/seixo é de 30,1ºC; e o valor correspondente para a superficial interna é de 25,9ºC.

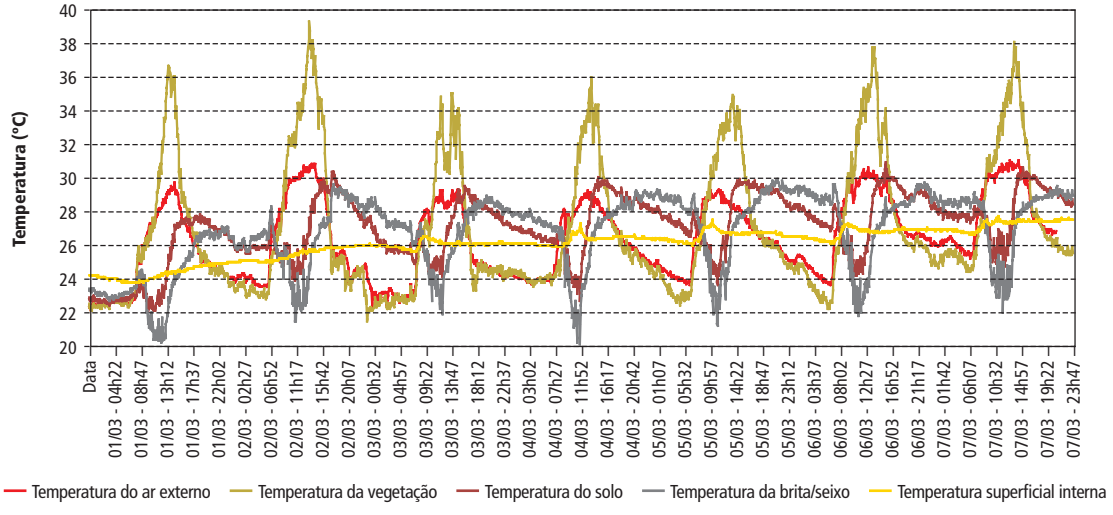


FIGURA 5.15 – Perfil de temperaturas do telhado vegetado (01/03 a 07/03/2008).

TABELA 5.2 – Perfil de temperaturas do telhado vegetado (01/03 a 07/03/2008).

Temperaturas do telhado vegetado		01/03	02/03	03/03	04/03	05/03	06/03	07/03	Média
Temperatura do ar externo	Máxima (ºC)	32,1	33,0	31,9	31,9	30,8	32,3	32,5	32,1
	Média (ºC)	24,9	26,0	24,7	25,6	25,4	26,1	27,1	25,7
	Mínima (ºC)	20,8	21,5	20,5	21,7	21,2	20,6	23,1	21,3
	Amplitude (ºC)	11,3	11,5	11,4	10.2	9,6	11,7	9,4	10,7
Temperatura da vegetação	Máxima (ºC)	36,8	39,4	35,2	36,1	35,1	39,4	38,2	37,2
	Média (ºC)	26,1	27,4	26,1	27,0	27,2	26,9	28,5	27,0
	Mínima (ºC)	22,3	21,7	22,3	23,7	22,6	22,4	24,6	22,8
	Amplitude (ºC)	14,5	17,7	12,9	12,4	12,5	17	13,6	14,4
Temperatura do solo	Máxima (ºC)	28,0	30,5	29,7	30,2	30,1	31,1	30,8	30,1
	Média (ºC)	24,8	27,2	27,0	27,5	28,0	27,0	28,3	27,1
	Mínima (ºC)	22,3	24,1	24,3	22,9	23,8	24,4	24,4	23,7
	Amplitude (ºC)	5,7	6,4	5,4	7,3	6,3	6,7	6,4	6,3
Temperatura da brita/seixo	Máxima (ºC)	27,3	29,8	29,1	29,4	30,1	30,1	29,7	29,4
	Média (ºC)	24,2	26,7	27,1	27,1	27,8	26,7	27,9	26,8
	Mínima (ºC)	20,4	21,7	22,1	20,3	21,4	22,0	22,2	21,4
	Amplitude (ºC)	6,9	8,1	7,0	9,1	8,7	8,1	7,5	7,9
Temperatura superficial interna	Máxima (ºC)	25,2	26,3	26,7	27,5	27,7	27,7	27,9	27
	Média (ºC)	24,4	25,6	26,2	26,4	26,7	26,0	27,4	26,1
	Mínima (ºC)	24,0	25,2	25,8	26,1	26,2	26,3	26,8	25,8
	Amplitude (ºC)	1,2	1,1	0,9	1,4	1,5	1,4	1,1	1,2

Quanto ao fluxo de calor (Figura 5.16 e Tabela 5.3), o balanço semanal é de 291,1W/m² de ganho e 5.210,4W/m² de perda de calor através do telhado vegetado. Praticamente em todo o período o telhado vegetado está permitindo a perda de calor do ambiente interno. Nesta redução existe também a atuação do isolante térmico, presente em todas as coberturas analisadas. Maiores ponderações serão feitas adiante através da comparação entre as coberturas.

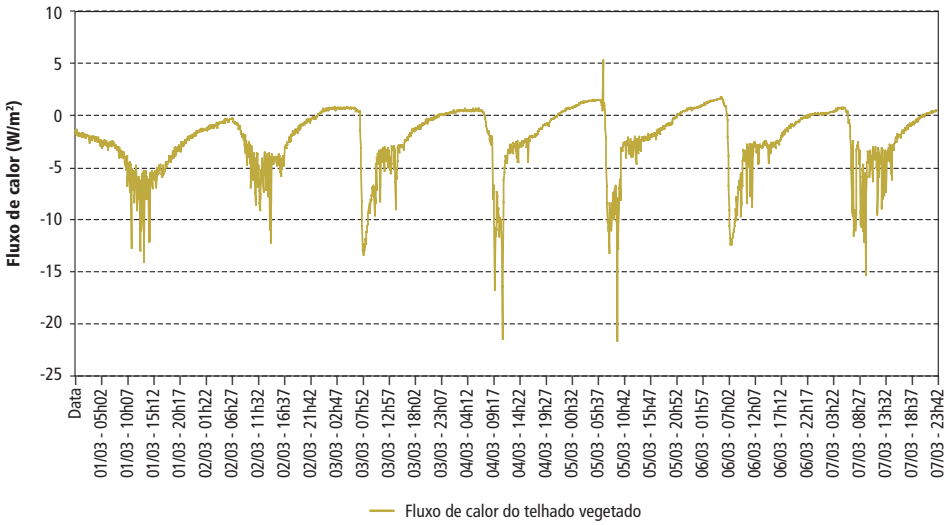


FIGURA 5.16 – Perfil do fluxo de calor do telhado vegetado (01/03 a 07/03/2008).

TABELA 5.3 – Perfil do fluxo de calor do telhado vegetado (01/03 a 07/03/2008).

Fluxo de calor do telhado vegetado	01/03	02/03	03/03	04/03	05/03	06/03	07/03	Média	Total
Fluxo positivo – ganho de calor (W/m²)	0,0	0,1	45,7	30,4	103,1	91,9	19,9	41,6	291,1
Fluxo negativo – perda de calor (W/m²)	1170,5	710,2	731,5	606,0	616,1	698,2	677,9	656,3	5210,4

5.7.6. Desempenho térmico no inverno

5.7.6.1. Condições climáticas da semana de análise

Elegeu-se para análise de desempenho térmico no período frio uma semana de baixas temperaturas do mês de maio (Figuras 5.17 e 5.18). A semana escolhida apresentou dias nublados, com uma transição entre uma frente quente e uma frente fria. Neste período, a umidade relativa do ar apresentou valores semelhantes ao período de verão, havendo ocorrido precipitação em apenas um dia. Em todos os dias deste período a casa encontrava-se completamente fechada e sem ocupação.

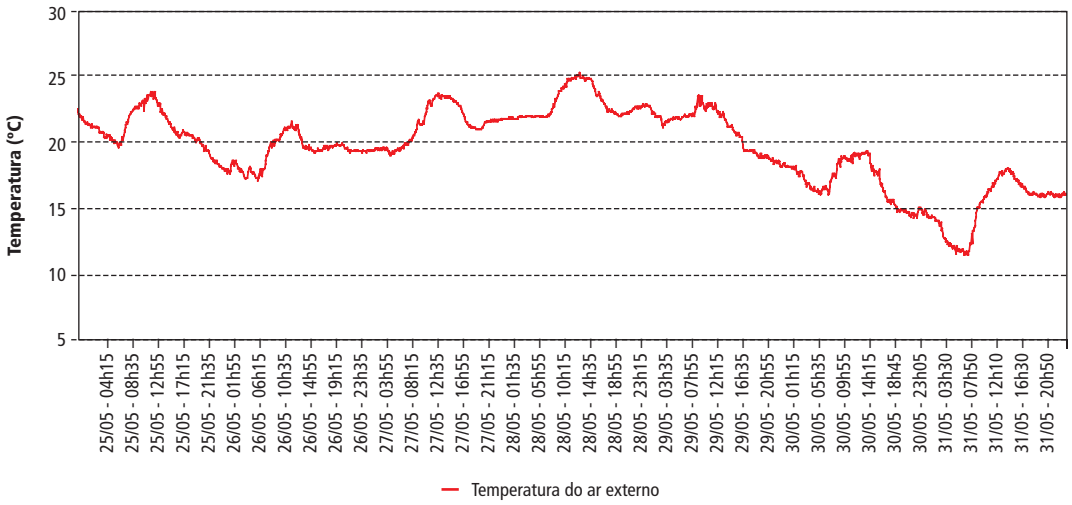


FIGURA 5.17 – Temperatura do ar externo (25/05 a 31/05/2008).

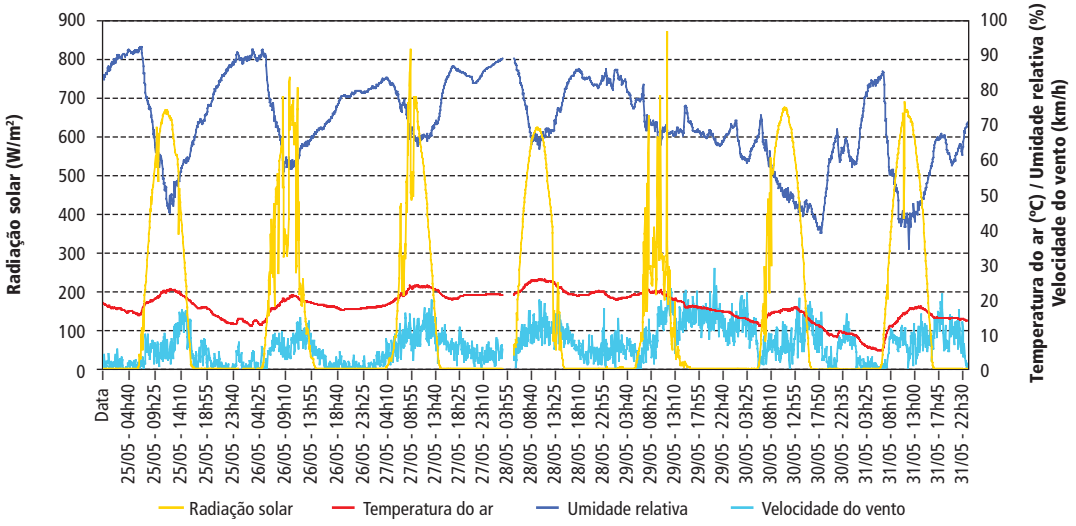


FIGURA 5.18 – Temperatura e umidade do ar externo, radiação solar e velocidade do vento (25/05 a 31/05/2008).

A Figura 5.18 e a Tabela 5.4 mostram as condições climáticas externas da semana analisada. Como pode ser observado, com uma temperatura média diária de 17,7ºC, todos os dias receberam baixa carga de radiação solar e alta carga de ventos, com valores diários médios na semana de 0,4kW/m² e 14,1 m/s, respectivamente. Os dias apresentaram uma umidade relativa média de 74,2%, havendo registro de apenas 2,3mm de chuva no período. Os valores de evapotranspiração estimada (obtidos pelo método de MEDEIROS, 2002) mostraram-se também elevados, com um valor médio de 6,1mm/dia.

TABELA 5.4 – Temperatura e umidade do ar externo, precipitação, radiação solar, velocidade do vento, evapotranspiração e conteúdo volumétrico de água no solo (25/05 a 31/05/2008).

Elementos climáticos	25/05	26/05	27/05	28/05	29/05	30/05	31/05	Média
Temperatura máxima (ºC)	22,8	21,1	24,0	25,6	23,7	17,6	17,8	21,8
Temperatura média (ºC)	18,2	16,7	20,2	22,5	19,8	14,2	12,5	17,7
Temperatura mínima (ºC)	13,4	12,2	17,0	20,9	16,5	9,1	5,2	13,4
Umidade relativa máxima (%)	92,1	91,2	86,4	88,8	85,6	72,4	85,0	85,9
Umidade relativa média (%)	73,8	75,0	77,5	78,9	72,7	56,5	85,0	74,2
Umidade relativa mínima (%)	44,6	56,4	63,7	63,0	63,7	38,9	61,3	55,9
Precipitação pluviométrica (mm)	0	0	0	0	2,3	0	0	0,3
Radiação solar (kW/m²)	0,5	0,3	0,4	0,4	0,2	0,4	0,5	0,4
Velocidade vento média (m/s)	4,1	3,9	17,4	19,1	21,0	19,2	13,9	14,1
Evapotranspiração estimada (mm/dia)	6,9	6,5	5,2	3,7	5,3	6,2	9,0	6,1
Conteúdo volumétrico de água no solo média (m³/ m³)	0,07	0,07	0,06	0,06	0,13	0,09	0,07	0,08

5.7.6.2. Perfil de temperaturas e fluxo de calor

A evapotranspiração, sombreamento e alta refletividade à radiação solar fornecida pela vegetação continuam diminuindo grande parte da radiação solar incidente e as camadas de solo, brita e seixo continuam adicionando massa térmica ao sistema, atrasando o processo de transferência de calor. Adicionalmente, no

inverno, observa-se uma diminuição das perdas de calor no período da manhã. Supõe-se que este fenômeno esteja relacionado com a produção de orvalho, que corresponde ao efeito conjugado entre baixas temperaturas e altas umidades, condições bastante desfavoráveis para a refrigeração evaporativa. Com uma amplitude diária média da temperatura do ar no período igual a 8,3ºC, a temperatura da vegetação varia de 7,9ºC a 33,2ºC. No solo, essa variação é de 8,6ºC a 27,3ºC, e na brita/seixo a variação é de 10,7ºC a 28,4ºC; e os valores de amplitude diária média destas camadas são, respectivamente 13,4ºC, 9,0ºC e 9,9ºC (Figura 5.19 e Tabela 5.5).

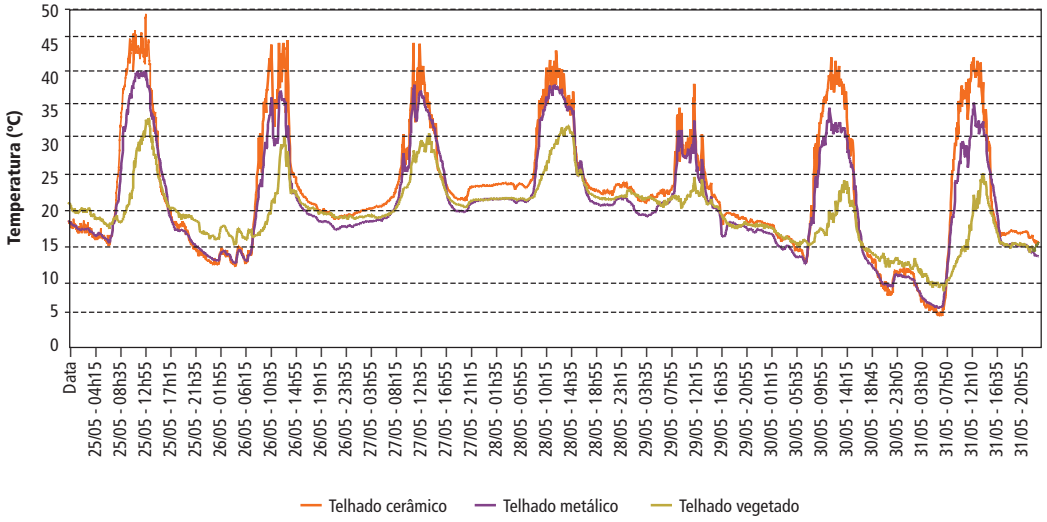


FIGURA 5.19 – Perfil de temperaturas do telhado vegetado (25/05 a 31/05/2008).

TABELA 5.5 – Perfil de temperaturas do telhado vegetado (25/05 a 31/05/2008).

Temperaturas do telhado vegetado		25/05	26/05	27/05	28/05	29/05	30/05	31/05	Média
Temperatura ar externo	Máxima (ºC)	22,8	21,1	24,0	25,6	23,7	17,6	17,8	21,8
	Média (ºC)	18,2	16,7	20,2	22,5	19,8	14,2	12,5	17,7
	Mínima (ºC)	13,4	12,2	17,0	20,9	16,5	9,1	5,2	13,4
	Amplitude (ºC)	9,4	8,9	7,0	4,7	7,2	8,5	12,6	8,3
Temperatura da vegetação	Máxima (ºC)	33,2	30,5	31,0	32,1	24,6	24,1	25,1	28,6
	Média (ºC)	21,1	19,1	22,0	23,8	20,4	16,1	14,1	19,5
	Mínima (ºC)	16,2	14,7	18.4	21,2	17,1	11,4	7,9	15,3
	Amplitude	17,0	15,8	12,6	10,9	7,5	12,7	17,2	13,4
Temperatura da terra	Máxima (ºC)	27,3	25,5	24,0	25,2	25,1	22,3	20,0	24,2
	Média (ºC)	24,0	21,7	21,5	22,6	23,0	19,5	16,6	21,3
	Mínima (ºC)	16,1	13,4	16,4	18,2	20,3	13,3	8,6	15,2
	Amplitude (ºC)	11,2	12,1	7,6	7,0	4,8	9,0	11,4	9,0
Temperatura da brita/seixo	Máxima (ºC)	28,4	28,1	23,6	24,5	26,1	25,5	24,2	25,8
	Média (ºC)	25,2	23,3	21,9	22,4	24,1	21,6	19,0	22,5
	Mínima (ºC)	17,0	14,9	16.5	17,5	20,0	14,7	10,7	15,9
	Amplitude (ºC)	11,4	13,2	7,1	7,0	6,1	10,8	13,5	9,9
Temperatura superficial interna	Máxima (ºC)	29,0	27,9	26,8	28,1	28,2	27,1	25,3	27,5
	Média (ºC)	28,1	26,6	26,3	27,2	27,6	26,0	24,1	26,5
	Mínima (ºC)	27,1	23,2	25,6	26,7	27,0	24,2	23,0	25,2
	Amplitude (ºC)	1,9	4,7	1,2	1,4	1,2	2,9	2,3	2,2

Internamente, a temperatura superficial varia de 23,0ºC a 29,0ºC ao longo da semana, com uma amplitude diária média de 2,2ºC. Em momentos em que a temperatura do ar externo atinge 5,2ºC, a temperatura da vegetação é de 7,9ºC, a do solo é de 8,6ºC e a da brita/seixo é de 10,7ºC; e o valor correspondente para a superficial interna é de 23,0ºC.

Quanto ao fluxo de calor (Figura 5.20 e Tabela 5.6), o balanço semanal é de 603,5W/m² de ganho de calor e 3515,0W/m² de perda de calor através da cobertura. A perda de calor continua sendo maior do que o ganho também durante o frio, no entanto o ganho é maior em relação ao período quente (mesmo com menor carga de radiação solar) e a perda é menor. A atuação do isolante térmico interfere nestes resultados, mas maiores ponderações serão feitas através da comparação dos fluxos das diferentes coberturas.

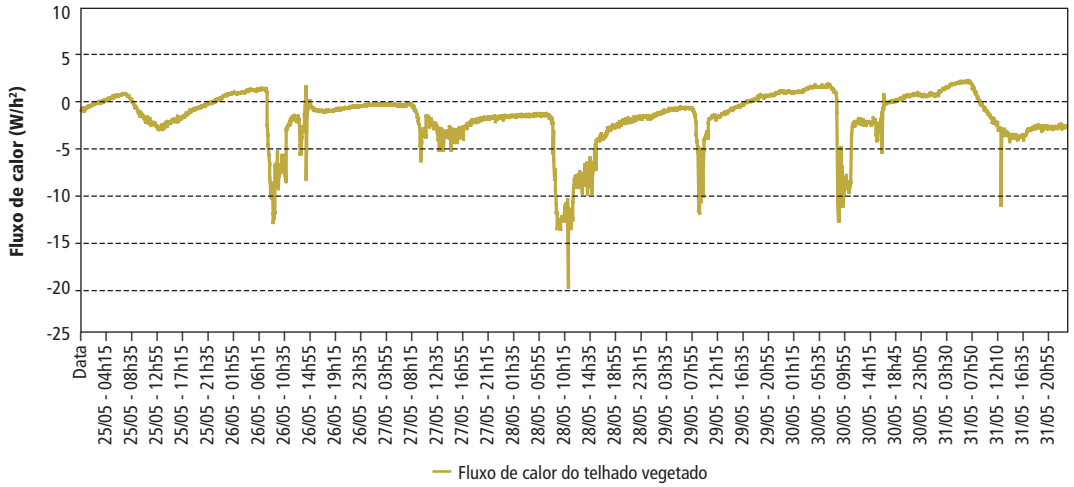


FIGURA 5.20 – Perfil do fluxo de calor do telhado vegetado (25/05 a 31/05/2008).

TABELA 5.6 – Perfil do fluxo de calor do telhado vegetado (25/05 a 31/05/2008).

Perfil do fluxo de calor do telhado vegetado	25/05	26/05	27/05	28/05	29/05	30/05	31/05	Média	Total
Fluxo positivo – ganho de calor (W/m²)	49,9	112,6	0	0	61,2	207,3	172,5	86,2	603,5
Fluxo negativo – perda de calor (W/m²)	227,7	461,3	460,4	1206,1	307,5	407,6	444,4	502,1	3515,0

5.7.7. Comparações de diferentes coberturas: telhado vegetado, telhado cerâmico e telhado metálico

Analisou-se o comportamento das temperaturas superficiais e fluxos de calor do ambiente coberto pelo telhado vegetado (quarto de solteiro), assim como dos ambientes cobertos pelas coberturas metálica e cerâmica (sala e quarto de casal, respectivamente) nos períodos de frio e calor. Os ambientes analisados possuem dimensões e volumes diferentes, orientações solares diferentes, tamanhos das aberturas diferentes, não sendo passíveis de serem comparados quanto à temperatura do ar interno.

5.7.7.1. Temperaturas superficiais externas

Uma primeira observação dos efeitos térmicos advindos da implantação de vegetação sobre a cobertura pode ser feita através da comparação das temperaturas superficiais externas das coberturas (Figura 5.21).

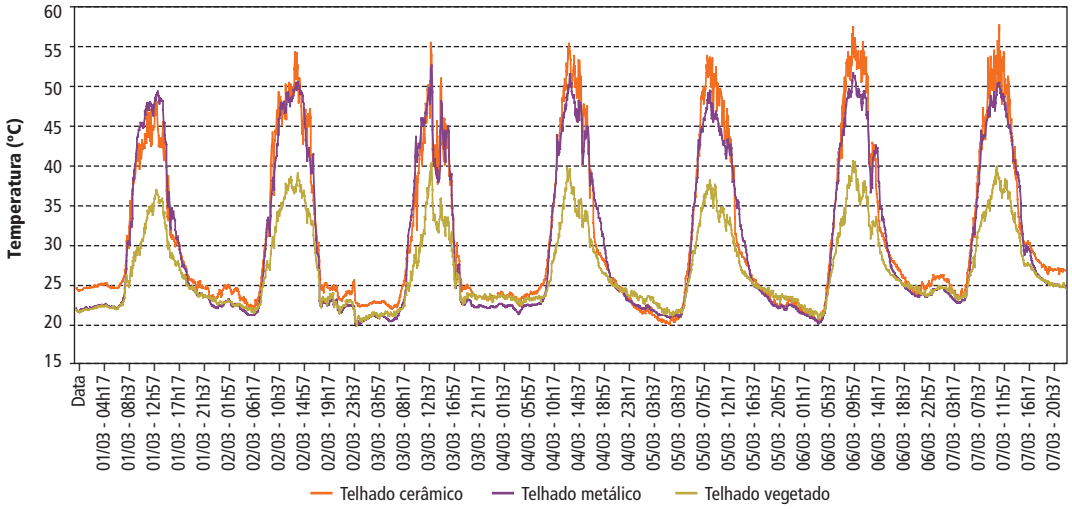


FIGURA 5.21 – Temperaturas superficiais externas das coberturas (01/03 a 07/03/2008).

No período de verão analisado, a amplitude de variação da temperatura superficial externa é menor no telhado vegetado. Enquanto os valores máximos de temperatura superficial externa foram de 57,7 e 52,7ºC, respectivamente, para as coberturas cerâmica e metálica, na cobertura vegetada o máximo valor atingido foi de 39,4ºC. As mínimas registradas foram de 20,0 e 19,8ºC, respectivamente, para as coberturas cerâmica e metálica, e 21,7ºC para a cobertura vegetada. As máximas oscilações diárias da temperatura superficial externa ocorrem na cobertura cerâmica (37,2ºC), seguida pela metálica (32,6ºC) e logo após pela vegetada (17,7ºC). Os valores diários de médias, máximas, mínimas e amplitudes das temperaturas superficiais externas são apresentados na Tabela 5.7.

TABELA 5.7 – Perfil das temperaturas superficiais externas das coberturas (01/03 a 07/03/2008).

Temperaturas superficiais externas		01/03	02/03	03/03	04/03	05/03	06/03	07/03	Média
Telhado cerâmico	Máxima (ºC)	48,1	54,3	55,5	55,4	53,9	57,7	57,5	54,6
	Média (ºC)	30,2	31,4	29,2	31,1	30,3	32,9	30,7	30,8
	Mínima (ºC)	22,8	22,0	21,9	21,6	20,0	23,2	20,3	21,6
	Amplitude (ºC)	25,30	32,3	33,6	33,8	33,9	34,5	37,2	32,9
Telhado metálico	Máxima (ºC)	49,4	50,6	52,7	51,5	49,5	52,7	50,4	51,0
	Média (ºC)	29,9	30,0	28,5	30,4	29,8	30,0	31,5	30,0
	Mínima (ºC)	21,6	19,8	20,2	21,3	20,8	20,1	22,7	21,0
	Amplitude (ºC)	27,8	30,8	32,5	30,2	28,7	32,6	27,7	30,0
Telhado vegetado	Máxima (ºC)	36,8	39,4	35,2	36,1	35,1	39,4	38,2	37,2
	Média (ºC)	26,1	27,4	26,0	27,0	27,2	26,9	28,5	27,0
	Mínima (ºC)	22,3	21,7	22,3	23,7	22,6	22,4	24,6	22,8
	Amplitude (ºC)	14,5	17,7	12,9	12,4	12,5	17,0	13,6	14,3

O telhado vegetado reduziu as temperaturas superficiais externas, assim como a amplitude de variação destas. Os dados registrados pelo sistema de monitoramento revelam um comportamento similar com aqueles citados pela bibliografia (NIACHOU et al., 2001; ONMURA et al., 2001; KÖHLER et al., 2001; WONG et al., 2003; LAZZARIN et al., 2005; SONNE, 2006). Tais reduções irão implicar em melhoria do conforto interno no verão, economia de energia para refrigeração e mitigação dos efeitos de ilhas de calor urbana.

Neste ponto, apresentam-se algumas das imagens obtidas nos experimentos com termografia de infravermelho, como recurso ilustrativo do desempenho térmico do telhado vegetado em termos de temperatura superficial. A Figura 5.22 mostra a distribuição fotográfica de temperaturas nas coberturas analisadas com uma escala ao lado da imagem indicando os valores de temperaturas através de cores, ao lado da imagem normal do mesmo ponto onde foi obtida a imagem termográfica. Em concordância com os dados do monitoramento, a termografia mostra menores valores de temperaturas superficiais na cobertura vegetada.

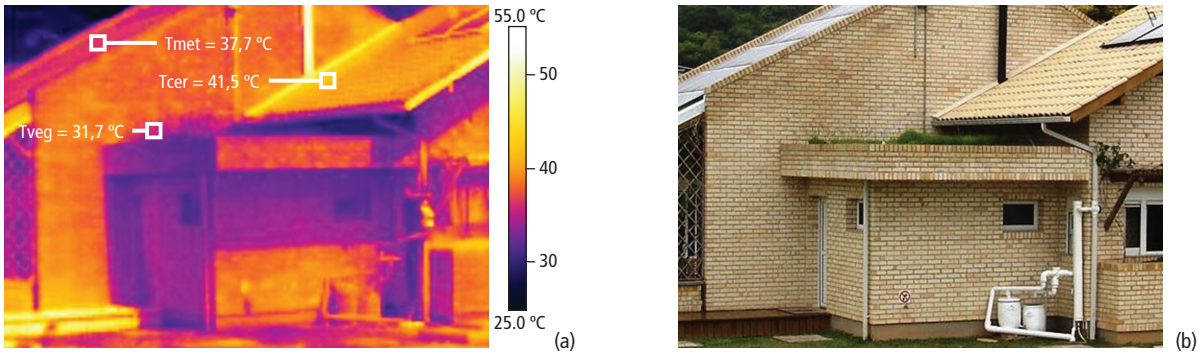


FIGURA 5.22 – Termografia de infravermelho: (a) Fotografia termográfica e (b) Fotografia normal.

De acordo com os resultados da termografia, a temperatura superficial externa do telhado vegetado apresenta variações significativas de valores entre regiões vegetadas e regiões descobertas. Nas regiões de solo descoberto, a temperatura superficial externa registrada no experimento foi de 50,9ºC. A Figura 5.23 mostra as diferenças de temperaturas entre o solo descoberto e diferentes tipos de vegetação. Estes registros foram efetuados no período em que ocorreram os problemas citados anteriormente com a vegetação "onze-horas", sendo utilizados somente para estas análises termográficas.

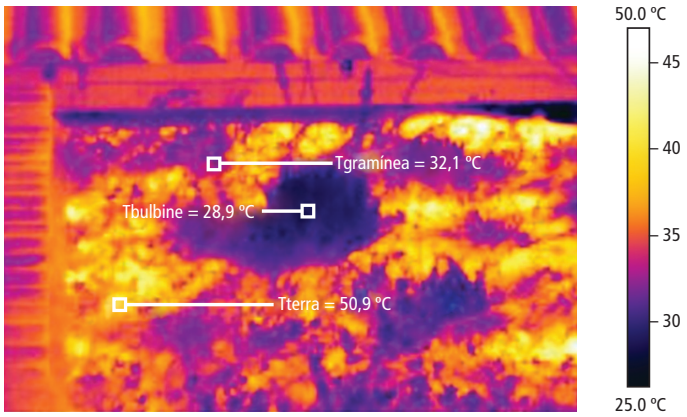


FIGURA 5.23 – Fotografia "termográfica" de diferentes vegetações e áreas de solo descoberto.

No inverno, o comportamento segue a mesma tendência do verão, com a menor amplitude de variação da temperatura superficial externa no telhado vegetado (Figura 5.24). Enquanto os valores máximos de temperatura superficial externa foram de 48,2 e 40,2ºC, respectivamente, para as coberturas cerâmica e metálica, na cobertura vegetada o máximo valor atingido foi de 33,2ºC. As mínimas registradas foram de 4,4 e 5,5ºC, respectivamente, para as coberturas cerâmica e metálica, e 7,9ºC para a cobertura vegetada. As máximas oscilações diárias da temperatura superficial externa ocorrem na cobertura cerâmica (37,6ºC), seguida pela metálica (29,9ºC) e logo após pela vegetada (17,2ºC). Os valores diários de médias, máximas, mínimas e amplitudes das temperaturas superficiais externas são apresentados na Tabela 5.8.

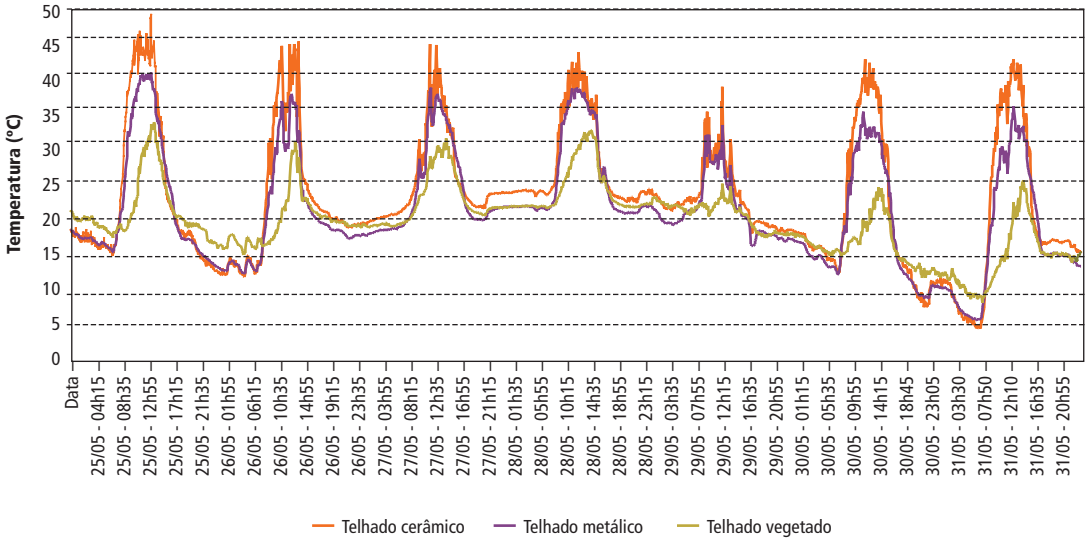


FIGURA 5.24 – Temperaturas superficiais externas das coberturas (25/05 a 31/05/2008).

TABELA 5.8 – Perfil das temperaturas superficiais externas das coberturas (25/05 a 31/05/2008).

Temperaturas superficiais externas		25/05	26/05	27/05	28/05	29/05	30/05	31/05	Média
Telhado cerâmico	Máxima (ºC)	48,2	44,5	44,1	43	38,2	42,0	42,0	43,1
	Média (ºC)	25,3	21,8	24,8	27,3	22,6	19,9	18,7	22,9
	Mínima (ºC)	12,6	11,6	18,8	21,9	17,7	7,3	4,4	13,5
	Amplitude (ºC)	35,6	32,9	25,3	21,1	20,5	34,7	37,6	29,6
Telhado metálico	Máxima (ºC)	40,2	37,2	38	38,0	32,8	34,7	35,4	36,6
	Média (ºC)	22,3	19,7	23,1	25,4	20,8	18,1	16,6	20,8
	Mínima (ºC)	13,2	12,1	17,3	20,4	15,9	8,6	5,5	13,2
	Amplitude (ºC)	27	25,1	20,7	17,6	16,9	26,1	29,9	23,3
Telhado vegetado	Máxima (ºC)	33,2	30,5	31,0	32,1	24,6	24,1	25,1	28,6
	Média (ºC)	21,1	19,1	22,0	23,8	20,4	16,1	14,1	19,5
	Mínima (ºC)	16,2	14,7	18,4	21,2	17,1	11,4	7,9	15,3
	Amplitude (ºC)	17,0	15,8	12,6	10,9	7,5	12,7	17,2	13,4

5.7.7.2. Temperaturas superficiais internas

A Figura 5.25 representa a evolução das temperaturas superficiais internas das coberturas analisadas na semana de verão. Novamente, a amplitude de variação da temperatura superficial interna é menor no ambiente coberto pelo telhado vegetado. Enquanto os valores máximos de temperatura superficial interna foram de 32,2 e 31,9ºC, respectivamente, para as coberturas cerâmica e metálica, na cobertura vegetada o máximo valor atingido foi de 27,9ºC. As mínimas registradas foram de 27,0 e 24,5ºC, respectivamente, para as coberturas cerâmica e metálica, e 24,0ºC para a cobertura vegetada.

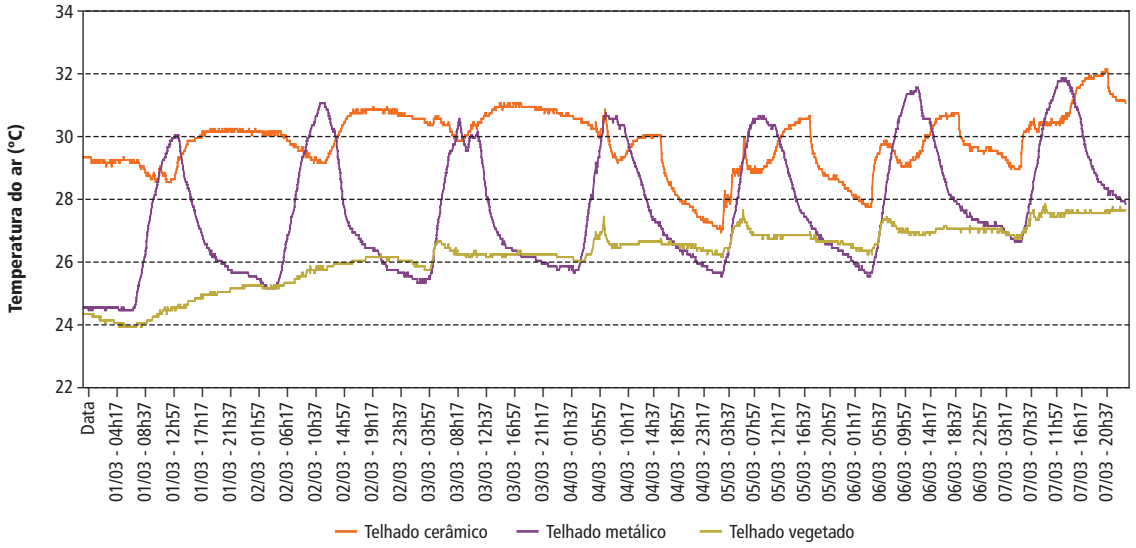


FIGURA 5.25 – Temperaturas superficiais internas das coberturas (01/03 a 07/03/2008).

As máximas oscilações diárias da temperatura superficial interna ocorrem no ambiente coberto pela cobertura metálica (6,0ºC), seguida pelo ambiente coberto pela cobertura cerâmica (3,7ºC) e logo após pelo ambiente coberto pela cobertura vegetada (1,5ºC). Os valores diários de médias, máximas, mínimas e amplitudes das temperaturas superficiais internas são apresentados na Tabela 5.9.

TABELA 5.9 – Perfil das temperaturas superficiais internas das coberturas (01/03 a 07/03/2008).

Temperaturas superficiais internas		01/03	02/03	03/03	04/03	05/03	06/03	07/03	Média
Telhado cerâmico	Máxima (ºC)	30,3	31,0	31,1	31,0	30,7	32,2	31,1	31,0
	Média (ºC)	29,4	30,1	30,6	30,0	28,8	30,5	29,6	29,8
	Mínima (ºC)	28,6	29,2	29,2	28,1	27,0	29	27,8	28,4
	Amplitude (ºC)	1,7	1,8	1,2	2,9	3,7	3,2	3,3	2,5
Telhado metálico	Máxima (ºC)	30,1	31,1	30,6	30,8	30,7	31,9	31,6	31,0
	Média (ºC)	26,4	27,4	27,2	27,6	27,8	28,8	27,4	27,5
	Mínima (ºC)	24,5	25,2	25,4	25,7	25,6	26,7	25,6	25,5
	Amplitude (ºC)	5,6	5,9	5,2	5,1	5,1	5,2	6,0	5,4
Telhado vegetado	Máxima (ºC)	25,2	26,3	26,7	27,5	27,7	27,9	27,7	27,0
	Média (ºC)	24,4	25,6	26,2	26,4	26,7	27,4	26,0	26,1
	Mínima (ºC)	24,0	25,2	25,8	26,1	26,2	26,8	26,3	25,8
	Amplitude (ºC)	1,2	1,1	0,9	1,4	1,5	1,1	1,4	1,2

No inverno, os valores máximos de temperatura superficial interna foram de 29,0 e 27,7ºC, respectivamente, para as coberturas cerâmica e metálica. Na cobertura vegetada o máximo valor atingido foi de 24,6ºC. As mínimas registradas foram de 23,0 e 17,4ºC, respectivamente, para as coberturas cerâmica e metálica, e 19,6ºC para a cobertura vegetada (Figura 5.26 e Tabela 5.10).

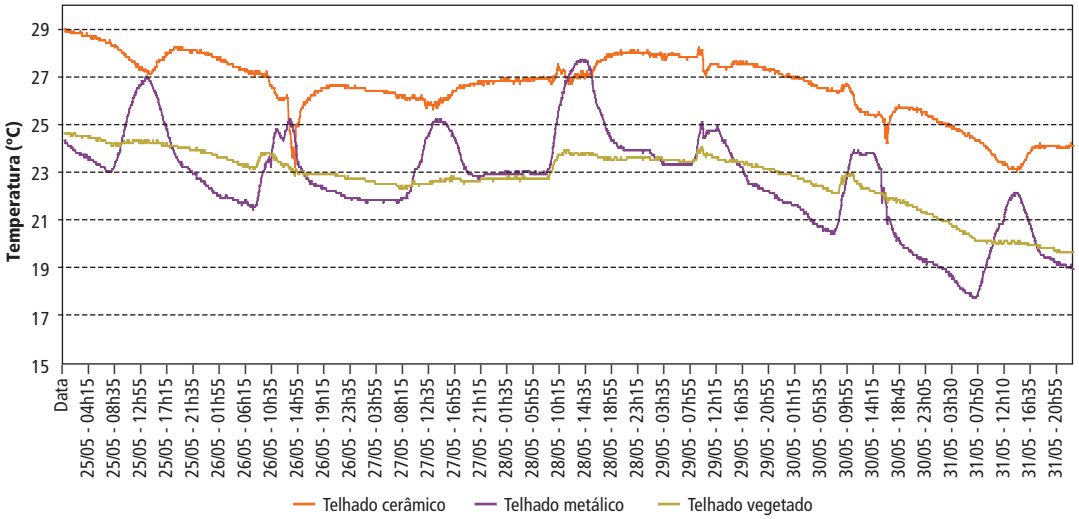


FIGURA 5.26 – Temperaturas superficiais internas das coberturas (25/05 a 31/05/2008).

TABELA 5.10 – Perfil das temperaturas superficiais internas das coberturas (25/05 a 31/05/2008).

Temperaturas superficiais internas		25/05	26/05	27/05	28/05	29/05	30/05	31/05	Média
Telhado cerâmico	Máxima (ºC)	29,0	27,9	26,8	28,1	28,2	27,1	25,3	27,5
	Média (ºC)	28,1	26,6	26,3	27,2	27,6	26,0	24,1	26,5
	Mínima (ºC)	27,1	23,2	25,6	26,7	27,0	24,2	23,0	25,2
	Amplitude (ºC)	1,9	4,7	1,2	1,4	1,2	2,9	2,3	2,2
Telhado metálico	Máxima (ºC)	27,0	25,2	25,2	27,7	25,1	23,9	22,1	25,2
	Média (ºC)	24,2	22,6	22,9	24,5	23,3	21,4	19,5	22,6
	Mínima (ºC)	22,3	21,4	21,7	22,9	21,7	19,1	17,4	21,0
	Amplitude (ºC)	4,7	3,8	3,5	4,8	3,4	4,8	4,4	4,2
Telhado vegetado	Máxima (ºC)	24,6	23,8	22,8	23,9	24,0	22,9	21,2	23,3
	Média (ºC)	24,2	23,2	22,5	23,2	23,4	22,2	20,2	22,7
	Mínima (ºC)	23,8	22,7	22,3	22,6	22,9	21,2	19,6	22,1
	Amplitude (ºC)	0,8	1,1	0,5	1,3	1,1	1,7	1,6	1,2

5.7.7.3. Fluxo de calor

Na comparação dos fluxos de calor do período de verão, observa-se que o telhado vegetado diminuiu consistentemente o ganho de calor em relação às coberturas cerâmica e metálica, com reduções de 82% e 86%, respectivamente. Aumentou consistentemente também a perda de calor com um aumento de 48% em relação à cobertura cerâmica e de 35% em relação à cobertura metálica.

Os valores máximos diários de fluxo positivo, ou seja, entrando para o ambiente interno, ocorrem por volta das 14h nas coberturas cerâmica e metálica. Neste momento o telhado vegetado está obtendo alto valor de fluxo negativo, um dos momentos em que o telhado vegetado mais retira calor do ambiente. Às 14h do dia 01/03/2008, por exemplo, a cobertura cerâmica apresentou um fluxo positivo de 9,3W/m², a cobertura metálica, um fluxo positivo de 18,3W/m² e a cobertura vegetada apresentou um fluxo negativo de 5,5W/m². O comportamento do telhado vegetado apresenta-se inverso ao comportamento das demais coberturas durante o dia inteiro. Quando as coberturas cerâmica e metálica passam a apresentar fluxo negativo, a cobertura vegetada passa a apresentar fluxo positivo (Figura 5.27 e Tabela 5.11). Alta radiação solar e temperaturas do ar mais altas favorecem a evaporação, assim como as baixas taxas de umidade do ar.

Os três dias em que o telhado vegetado mais perdeu calor foram os três dias em que houve registro de precipitação (01 a 03/2008). Dentre estes, o dia de maior perda coincide com o dia de maior precipitação, deixando claro o efeito adicional que o conteúdo volumétrico de água do substrato oferece no desempenho térmico do telhado vegetado. Por elevar a condutividade do sistema de cobertura, o aumento de umidade na camada de solo deveria incrementar o fluxo. Por outro lado, a presença da umidade favorece a refrigeração evaporativa, podendo compensar a condutividade mais alta. Adicionalmente, o próprio efeito convectivo da chuva "fria" também deve ser considerado.

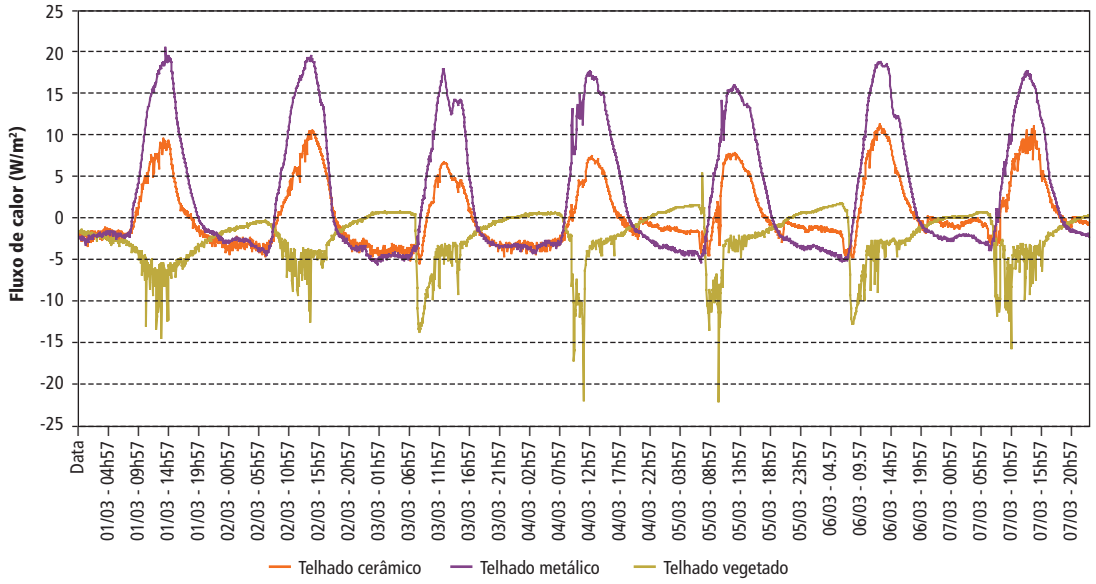


FIGURA 5.27 – Perfil dos fluxos de calor através das coberturas (01/03 a 07/03/2008).

TABELA 5.11 – Perfil dos fluxos de calor através das coberturas (01/03 a 07/03/2008).

Fluxos de calor (W/m²)	01/03	02/03	03/03	04/03	05/03	06/03	07/03	Média	Total
Vegetado – ganho	0	0,1	45,7	30,4	103,1	91,9	19,9	41,6	291,1
Vegetado – perda	1170,5	710,2	731,5	606,0	616,1	698,2	677,9	656,3	5210,4
Cerâmico – ganho	498,2	618,2	331,7	376,1	441,2	664,1	612,9	506,1	3542,4
Cerâmico – perda	369,7	518,4	653,2	415,2	301,6	272,9	161,9	384,7	2692,9
Metálico – ganho	1362,7	1374,9	1090,4	1289,2	1195,1	1355,9	1220,8	1114,1	7798,6
Metálico – perda	320,6	522,7	670,1	449,2	546,4	516,2	352,3	482,5	3377,5

Já no período de inverno ocorre uma inversão no desempenho das coberturas analisadas (Figura 5.28 e Tabela 5.12). O telhado vegetado continua ganhando menos calor que as coberturas cerâmica e metálica (reduções de 71 e 84% de ganho de calor). No entanto, o ganho acumulado na semana de inverno (603,5W/m²) apresentou-se maior que o ganho acumulado da semana de verão (291,1W/m²), e isto se deu com uma taxa de radiação solar menor no período de inverno (0,4kW/m² no inverno contra 0,8kW/m² no verão). Neste período de inverno mais intenso, o telhado vegetado passou a perder menos calor que as outras coberturas, com uma redução da perda de calor de 43% em relação ao telhado cerâmico e de 51% em relação ao telhado metálico. Este comportamento parece estar associado com uma menor atividade evaporativa no período (baixa radiação solar e baixas temperaturas do ar) e com uma menor transmitância (solos e seixos mais secos). Este, no entanto, parece ser um comportamento isolado (somente no frio mais extremo), pois nos balanços das estações mostrados a seguir, nota-se que o telhado vegetado perde muito mais calor que as outras coberturas durante o ano todo.

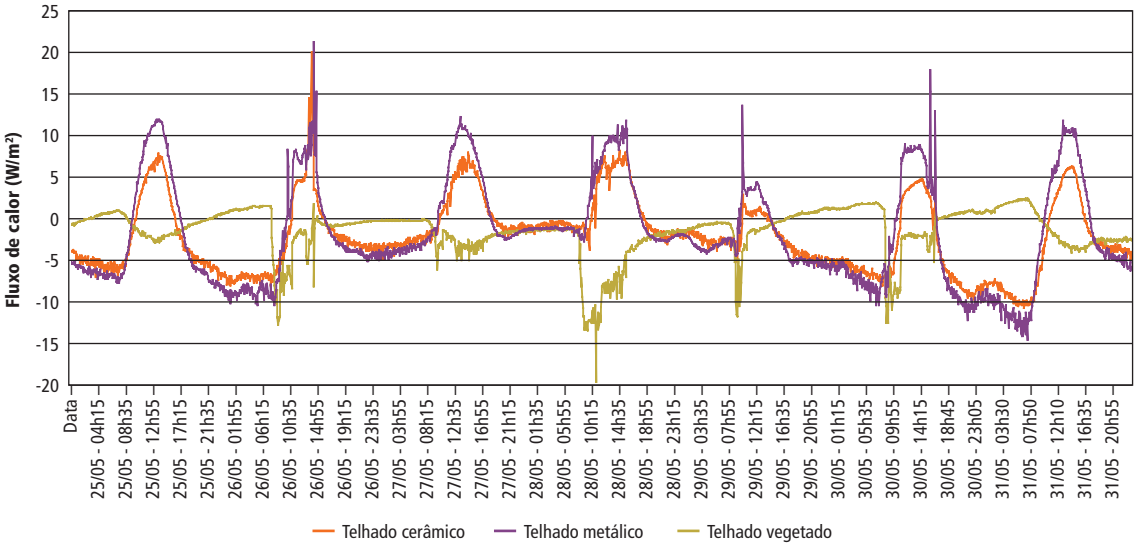


FIGURA 5.28 – Fluxos de calor através das coberturas (25/05 a 31/05/2008).

TABELA 5.12 – Perfil dos fluxos de calor através das coberturas (25/05 a 31/05/2008).

Fluxos de calor (W/m²)	25/05	26/05	27/05	28/05	29/05	30/05	31/05	Média	Total
Vegetado – ganho	49,9	112,6	0	0	61,2	207,3	172,5	86,2	603,5
Vegetado – perda	227,7	461,3	460,4	1206,1	307,5	407,6	444,4	502,1	3515,0
Cerâmico – ganho	343,1	316,6	399,2	478,7	43,1	222,5	256,5	294,2	2059,7
Cerâmico – perda	1013,5	1061,8	400,6	224,7	713,9	1392,7	1323,2	875,8	6130,4
Metálico – ganho	670,9	444,6	673,1	684,0	180,6	507,1	582,0	534,6	3742,3
Metálico – perda	1173,7	1293,0	525,8	295,7	828,0	1544,7	1525,2	1026,6	7186,1

5.8. Balanços térmicos das estações climáticas

5.8.1. Inverno – julho a setembro de 2007

5.8.1.1. Temperatura superficial externa

A Figura 5.29 mostra a totalidade dos dados válidos de temperaturas superficiais externas das coberturas analisadas no período de inverno, um total de 33295 registros (média de um registro a cada três minutos – tempo de varredura do sistema de monitoramento). Neste período, houve interrupções no sistema nos períodos de 23/08 a 31/08 e no dia 16/09. Na Tabela 5.13 são apresentadas as máximas, médias e mínimas para estas coberturas e as porcentagens em que as temperaturas superficiais das coberturas analisadas excedem (para mais ou para menos) alguns valores de temperaturas pré-estabelecidos. As máximas para os telhados vegetado, cerâmico e metálico foram, respectivamente, 39,2ºC, 50,6ºC, 43,5ºC, as médias 17,8ºC, 19,6ºC e 19,2ºC e as mínimas 5,5ºC, 0,6ºC e 3,2ºC.

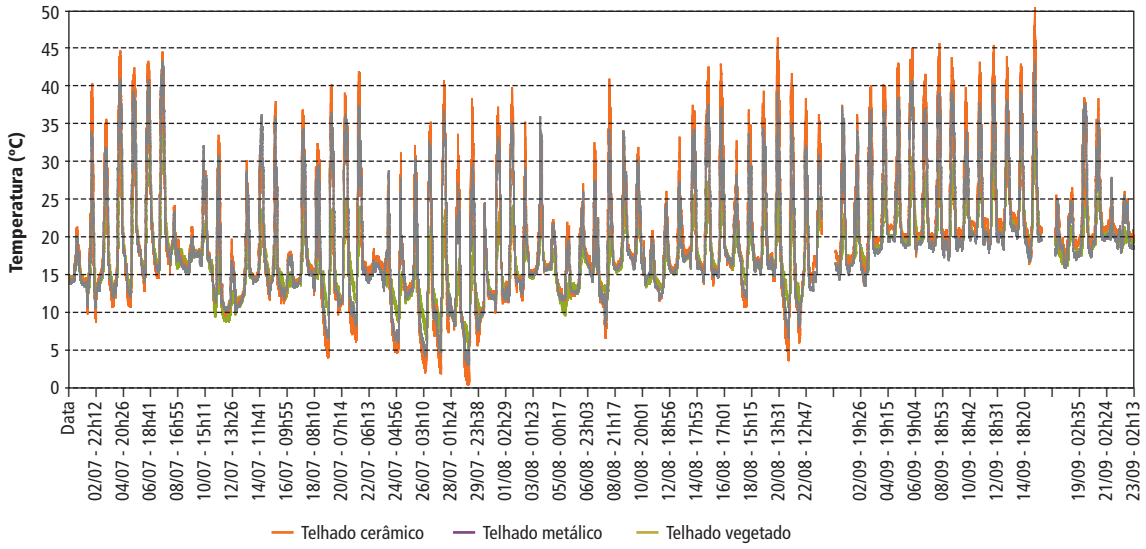


FIGURA 5.29 – Temperaturas superficiais externas das coberturas (julho a setembro de 2007).

TABELA 5.13 – Balanço das temperaturas superficiais externas das coberturas (julho a setembro de 2007).

Temperaturas superficiais externas	Telhado vegetado	Telhado cerâmico	Telhado metálico
Máxima (ºC)	39,2	50,6	43,5
Média (ºC)	17,8	19,6	19,2
Mínima (ºC)	5,5	0,6	3,2
Amplitude média no período (ºC)	33,7	50	40,3
% de valores maior que 25ºC	6,1	18	18,5
% de valores maior que 30ºC	1,5	10,9	10,7
% de valores maior que 40ºC	0	1,6	0,4
% de valores menor que 10ºC	2,6	5,6	4,7
% de valores menor que 5ºC	0	1,2	0,5

5.8.1.2. Fluxos de calor

A Figura 5.30 mostra a totalidade dos dados válidos de fluxos analisados no período de inverno. Devido a problemas no funcionamento do fluxímetro do quarto de casal durante o mês de setembro, considerou-se para este balanço apenas os meses de julho e agosto, um total de 22.605 registros. Consideram-se aqui novamente as interrupções nos períodos de 23/08 a 31/08.

Na Tabela 5.14 são apresentados os valores de fluxo de calor para o período de inverno. Observa-se que o telhado vegetado foi a cobertura que mais perdeu calor com um total de perda de 4512,3 Wh/m² contra 2679,7 e 3362,2 Wh/m², respectivamente, para as coberturas cerâmica e metálica. O ganho de calor pelo telhado vegetado no período foi de apenas 50,9 Wh/m² contra 1024,2 e 2081,3 Wh/m², respectivamente, para as coberturas cerâmica e metálica.

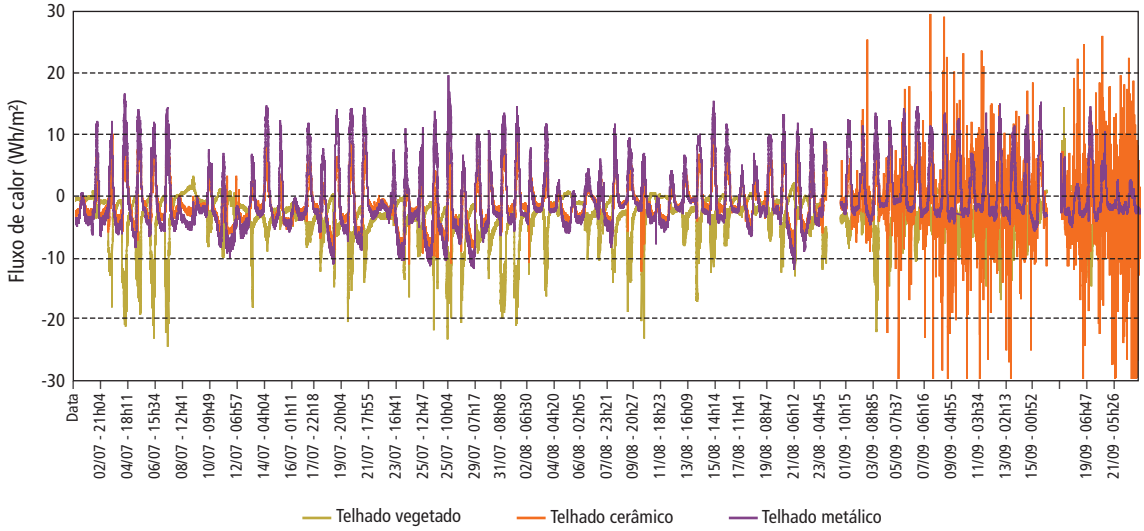


FIGURA 5.30 – Fluxos de calor através das coberturas (julho a setembro de 2007).

TABELA 5.14 – Perfil dos fluxos de calor através das coberturas – inverno (julho a agosto de 2007).

Coberturas	Fluxos (Wh/m²) – Inverno 2007
Vegetado – ganho de calor	50,9
Vegetado – perda de calor	4512,3
Cerâmico – ganho de calor	1024,2
Cerâmico – perda de calor	2679,7
Metálico – ganho de calor	2081,3
Metálico – perda de calor	3362,2

5.8.2. Primavera – outubro a dezembro de 2007

5.8.2.1. Temperatura superficial externa

A Figura 5.31 mostra a totalidade dos dados válidos de temperaturas superficiais externas das coberturas analisadas no período de primavera, um total de 20.736 registros. Neste período houve interrupções no sistema nos seguintes períodos: dia 03/10, dias 06 a 08/10, dias 01 a 05/11, dia 12/11, dias 13 a 27/11, dias 01 a 02/12, dias 14 a 20/12 e dias 23 a 31/12.

Na Tabela 5.15 são apresentadas as máximas, médias e mínimas para estas coberturas e as porcentagens em que as temperaturas superficiais das coberturas analisadas excedem (para mais ou para menos) alguns valores de temperaturas pré-estabelecidos. As máximas para os telhados vegetado, cerâmico e metálico foram, respectivamente, 37,3ºC, 54,7ºC, 51,1ºC, as médias 22,7ºC, 25,6ºC e 24,5ºC e as mínimas 12,1ºC, 13,6ºC e 12,6ºC.

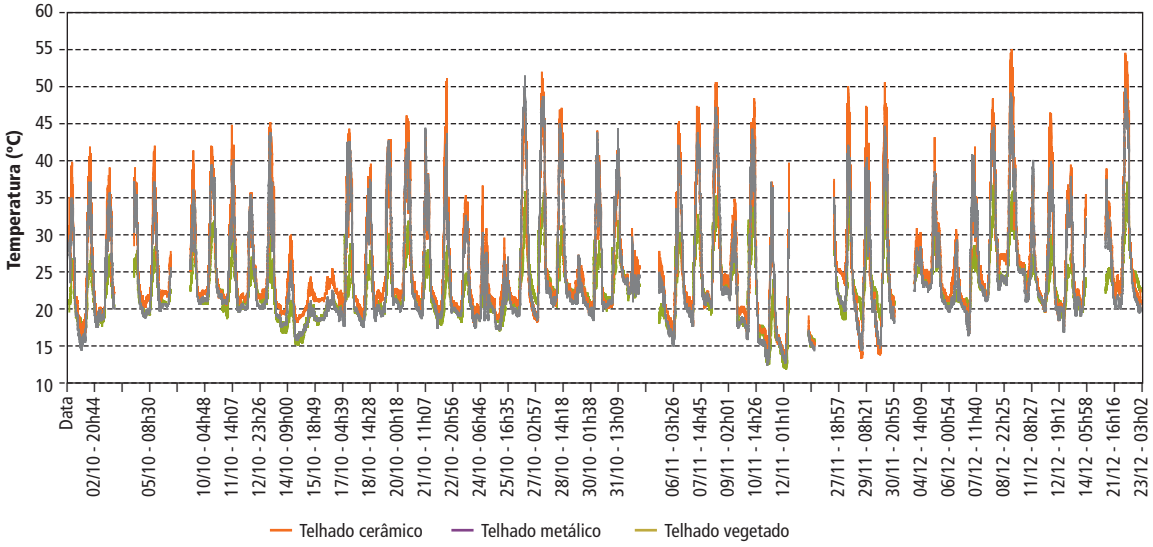


FIGURA 5.31 – Temperaturas superficiais externas das coberturas (outubro a dezembro de 2007).

TABELA 5.15 – Balanço das temperaturas superficiais externas das coberturas (outubro a dezembro de 2007).

Temperaturas superficiais externas	Telhado vegetado	Telhado cerâmico	Telhado metálico
Máxima (ºC)	37,3	54,7	51,1
Média (ºC)	22,7	25,6	24,5
Mínima (ºC)	12,1	13,6	12,6
Amplitude média no período (ºC)	25,2	44,1	38,5
% de valores maior que 25ºC	23,3	37,4	32,4
% de valores maior que 30ºC	5,1	20,7	20,4
% de valores maior que 40ºC	0,0	5,5	4,5
% de valores menor que 15ºC	1,2	0,9	1,2
% de valores menor que 13ºC	0,4	0,0	0,05

5.8.2.2. Fluxos de calor

A Figura 5.32 mostra a totalidade dos dados válidos de fluxos analisados no período de primavera. Devido a problemas no funcionamento do fluxímetro do quarto de casal durante o mês de outubro, considerou-se para este balanço apenas os meses de novembro e dezembro, um total de 8.972 registros. Consideram-se aqui novamente as interrupções citadas anteriormente.

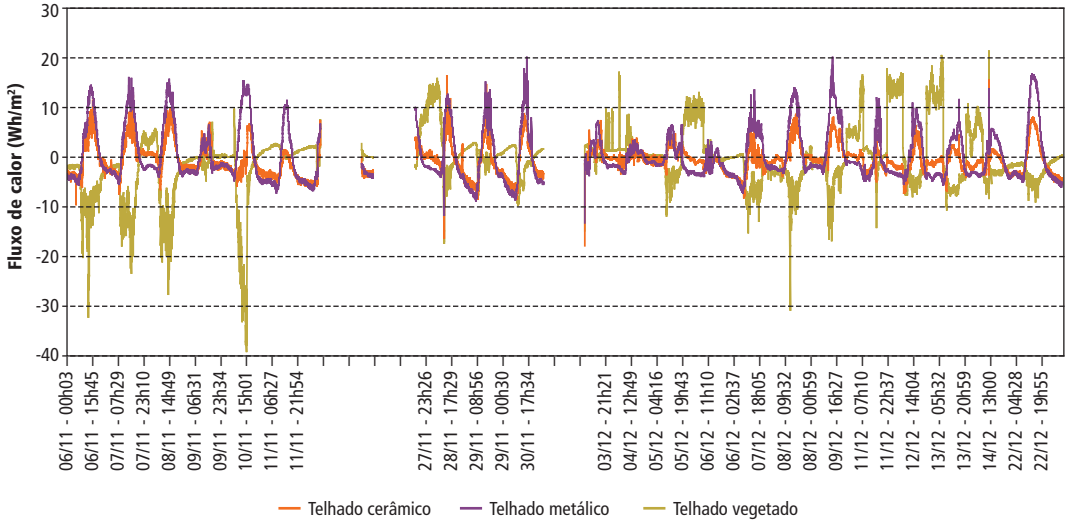


FIGURA 5.32 – Fluxos de calor através das coberturas (novembro a dezembro de 2007).

Na Tabela 5.16 são apresentados os valores de fluxo de calor para o período de primavera. Observa-se que no período o telhado vegetado foi a cobertura que mais perdeu calor com um total de perda de 1156,0 Wh/m^2 contra 610,9 e 873,1 Wh/m^2, respectivamente, para as coberturas cerâmica e metálica. O ganho de calor pelo telhado vegetado no período foi de 1032,9 Wh/m^2 contra 599,2 e 1280,6 Wh/m^2, respectivamente, para as coberturas cerâmica e vegetada.

TABELA 5.16 – Perfil dos fluxos de calor através das coberturas – inverno (novembro a dezembro de 2007).

Coberturas	Fluxos (Wh/m^2) – Primavera 2007
Vegetado – ganho de calor	1032,9
Vegetado – perda de calor	1156,0
Cerâmico – ganho de calor	599,2
Cerâmico – perda de calor	610,9
Metálico – ganho de calor	1280,6
Metálico – perda de calor	873,1

5.8.3. Verão – janeiro a março de 2008

5.8.3.1. Temperatura superficial externa

A Figura 5.33 mostra a totalidade dos dados válidos de temperaturas superficiais externas das coberturas analisadas no período de verão, um total de 24.782 registros. Neste período, houve interrupções no sistema nos períodos de 01 a 06/01 e 01 a 11/02. Na Tabela 5.17 são apresentadas as máximas, médias e mínimas para estas coberturas e as porcentagens em que as temperaturas superficiais das coberturas analisadas excedem (para mais ou para menos) alguns valores de temperaturas pré-estabelecidos. As máximas para os telhados vegetado, cerâmico e metálico foram, respectivamente, 45,3ºC, 57,7ºC, 52,7ºC, as médias 25,5ºC, 28,3ºC e 27,3ºC e as mínimas 17,8ºC, 16,5ºC e 16,0 ºC.

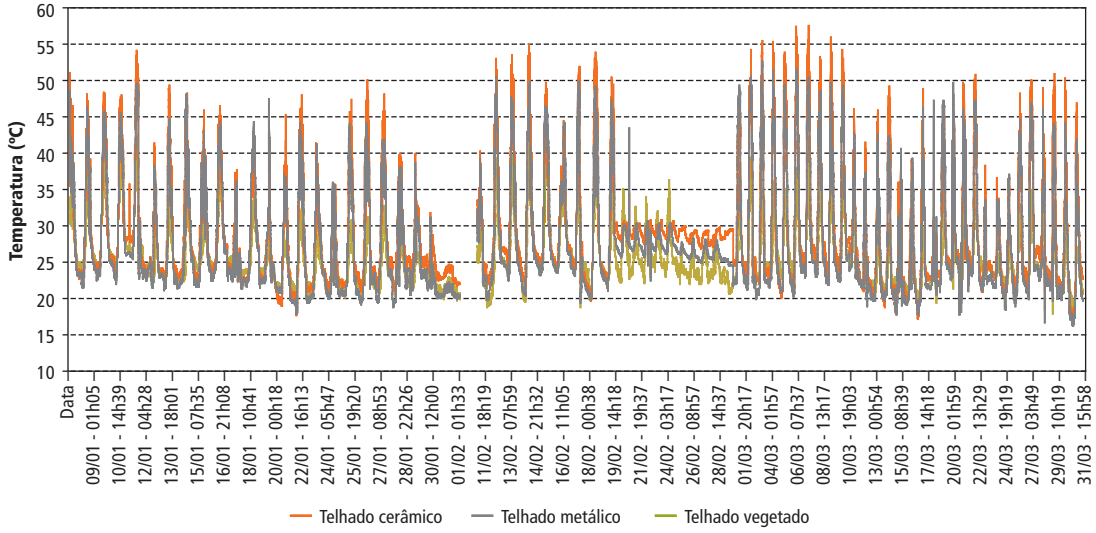


FIGURA 5.33 – Temperaturas superficiais externas das coberturas (janeiro a março de 2008).

TABELA 5.17 – Balanço das temperaturas superficiais externas das coberturas (janeiro a março de 2008).

Temperaturas superficiais externas	Telhado vegetado	Telhado cerâmico	Telhado metálico
Máxima (ºC)	45,3	57,7	52,7
Média (ºC)	25,5	28,3	27,3
Mínima (ºC)	17,8	16,5	16,0
Amplitude média no período (ºC)	27,5	41,2	36,7
% de valores maior que 25ºC	43,0	58,8	49,3
% de valores maior que 30ºC	13,2	25,5	24,8
% de valores maior que 40ºC	0,4	9,5	8,9
% de valores menor que 20ºC	1,2	2	4,4

5.8.3.2. Fluxos de calor

A Figura 5.34 mostra a totalidade dos dados válidos de fluxos analisados no período de verão. No período de 18/01 a 18/02 observa-se um comportamento anômalo ao esperado no fluxo de calor da cobertura vegetada, com valores de ganhos noturnos muito elevados. Porém, a evolução das temperaturas superficiais internas da cobertura no quarto de solteiro não acompanhou o comportamento do fluxo como observado nos outros períodos. A avaliação dos dados ambientais e do conteúdo volumétrico de água na camada de solo também não evidenciou nenhuma alteração que pudesse ter levado a estes resultados de fluxo.

Optou-se por não incluir este período no balanço, totalizando 16.035 registros. Consideram-se aqui novamente as interrupções citadas anteriormente. Observa-se na Tabela 5.18 que o telhado vegetado e o telhado metálico tiveram quase que a mesma perda de calor, com totais de perda de 2182,8 e 2222,8 Wh/m², respectivamente. Na cobertura cerâmica a perda foi de 1607,1 Wh/m². O ganho de calor pelo telhado vegetado no período foi de 704,4 Wh/m² contra 1298,8 e 3222,4 Wh/m², respectivamente, para as coberturas cerâmica e metálica.

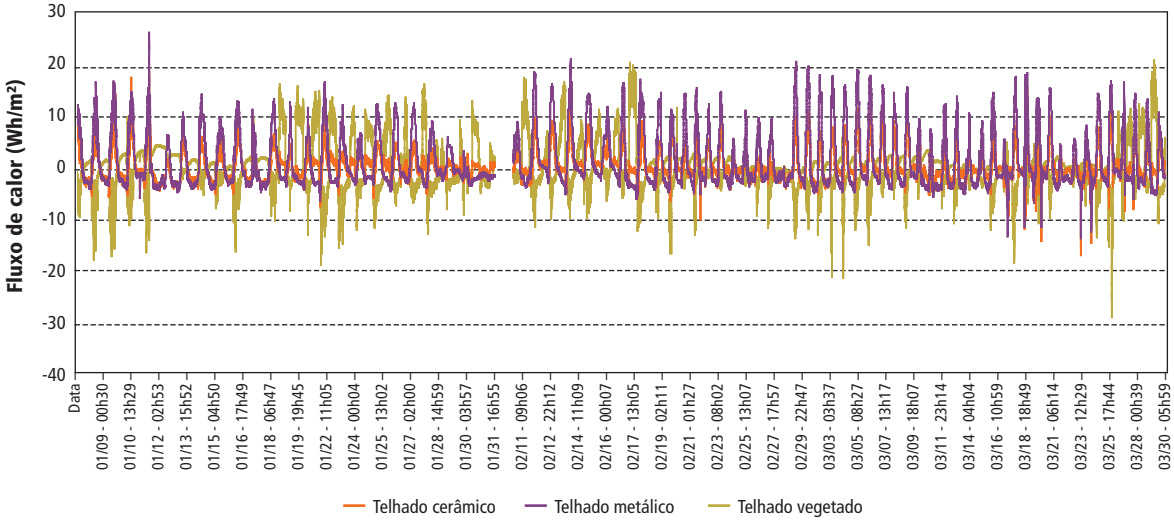


FIGURA 5.34 – Fluxos de calor através das coberturas (janeiro a março de 2008).

TABELA 5.18 – Perfil dos fluxos de calor através das coberturas – inverno (janeiro a março de 2008).

Coberturas	Fluxos (Wh/m²) – Verão 2008
Vegetado – ganho de calor	704,4
Vegetado – perda de calor	2182,8
Cerâmico – ganho de calor	1298,8
Cerâmico – perda de calor	1607,1
Metálico – ganho de calor	3222,4
Metálico – perda de calor	2222,8

5.8.4. Outono – abril a junho de 2008

5.8.4.1. Temperatura superficial externa

A Figura 5.35 mostra a totalidade dos dados válidos de temperaturas superficiais externas das coberturas analisadas no período de outono, um total de 25.841 registros. Neste período, houve apenas o comportamento anômalo no sistema detectado no dia 31/06, sendo este descartado da análise. Na Tabela 5.19 são apresentadas as máximas, médias e mínimas para estas coberturas e as porcentagens em que as temperaturas superficiais das coberturas analisadas excedem (para mais ou para menos) alguns valores de temperaturas pré-estabelecidos. As máximas para os telhados vegetado, cerâmico e metálico foram, respectivamente, 40,9ºC, 58,2ºC, 52,7ºC, as médias 20,0ºC, 23,0ºC e 21,7ºC e as mínimas 6,6 ºC, 3,3ºC e 4,7ºC.

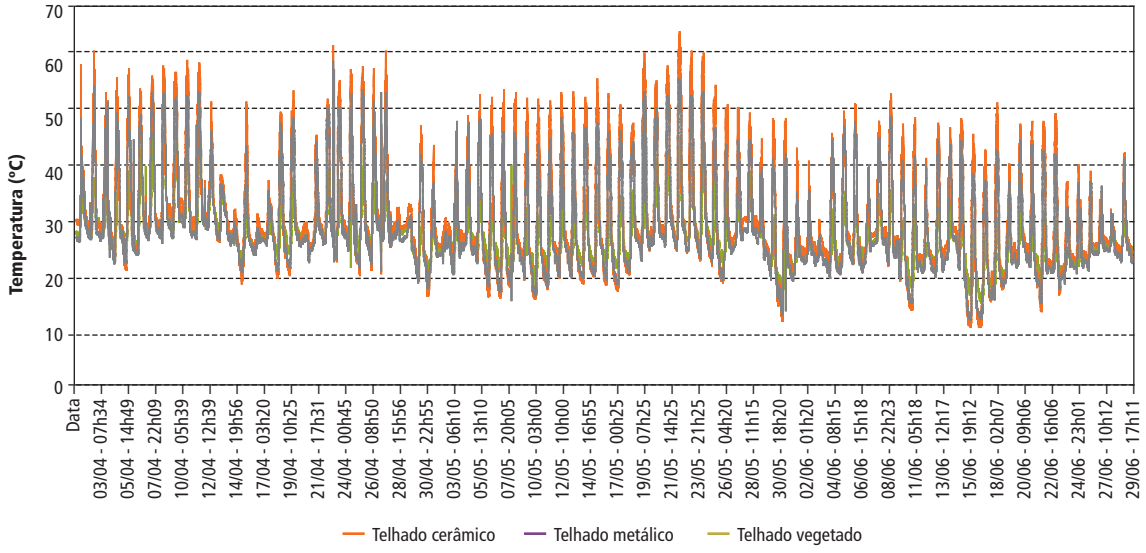


FIGURA 5.35 – Temperaturas superficiais externa das coberturas (abril a junho de 2008).

TABELA 5.19 – Balanço das temperaturas superficiais externas das coberturas (abril a junho de 2008).

Temperaturas superficiais externas	Telhado vegetado	Telhado cerâmico	Telhado metálico
Máxima (ºC)	40,9	58,2	52,7
Média (ºC)	20,0	23,0	21,7
Mínima (ºC)	6,6	3,3	4,7
Amplitude média no período (ºC)	34,3	54,9	48,0
% de valores maior que 25ºC	11,5	28	25,3
% de valores maior que 30ºC	3,7	19,2	17,3
% de valores maior que 40ºC	0,01	7,4	4,5
% de valores menor que 10ºC	0,7	3,0	2,7
% de valores menor que 5ºC	0,0	0,6	0,03

5.8.4.2. Fluxos de calor

A Figura 5.36 mostra a totalidade dos dados válidos de fluxos analisados no período de outono. Considera-se aqui novamente o descarte do dia 30/06 e também os descartes dos dias 01 a 04/04, período em que o fluxímetro do telhado vegetado novamente apresentou leituras incoerentes, totalizando 25.792 registros.

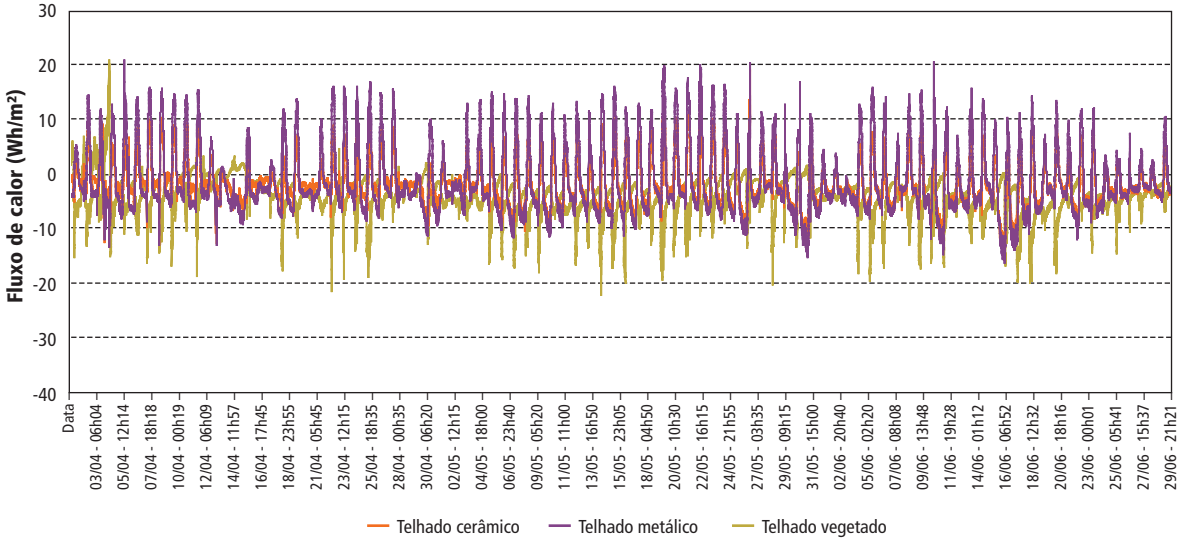


FIGURA 5.36 – Fluxos de calor através das coberturas (abril a junho de 2008).

Na Tabela 5.20 são apresentados os valores de fluxo de calor para o período de outono. Observa-se que o telhado vegetado foi a cobertura que mais perdeu calor com um total de perda de 7226,9 Wh/m² contra 4543,8 e 5714,4 Wh/m², respectivamente, para as coberturas cerâmica e metálica. O ganho de calor pelo telhado vegetado no período foi de apenas 204,5 Wh/m² contra 2345,6 e 4816,1 Wh/m², respectivamente, para as coberturas cerâmica e metálica.

TABELA 5.20 – Perfil dos fluxos de calor através das coberturas – inverno (abril a junho de 2008).

Coberturas	Fluxos (Wh/m²) – Outono 2008
Vegetado – ganho de calor	204,5
Vegetado – perda de calor	7226,9
Cerâmico – ganho de calor	2345,6
Cerâmico – perda de calor	4543,8
Metálico – ganho de calor	4816,1
Metálico – perda de calor	5714,4

5.9. Considerações a respeito do telhado vegetado

Em uma base anual, o telhado vegetado reduziu o ganho de calor em 37 e 63% em relação aos telhados cerâmico e metálico, respectivamente, e aumentou a perda de calor em 22% em relação aos

mesmos durante a primavera/verão. No outono/inverno a redução do ganho pelo telhado vegetado foi de 94 e 88% em relação aos telhados cerâmico e metálico, respectivamente, e o aumento da perda é de 65 e 30% em relação aos mesmos. Fica evidente o cuidado que se deve ter com o dimensionamento de tal dispositivo para que o mesmo não comprometa o desempenho térmico da edificação nos períodos frios. Estudos ainda devem ser realizados para determinação do conjunto físico correto (tipos e espessuras ideais de vegetação e substrato) para obtenção de um melhor desempenho anual do telhado vegetado em Florianópolis. Observa-se, ainda, que os cômodos analisados possuem geometria, orientação e volumes diferenciados. Tais condições influem certamente nas temperaturas superficiais internas e, portanto, nos fluxos de calor, sendo necessárias análises através de simulações térmicas considerando tais parâmetros.

O telhado vegetado reduziu as temperaturas superficiais externas, assim como a amplitude de variação destas. Em todo o período analisado observa-se que a temperatura superficial externa da cobertura vegetada mantém-se dentro da faixa de 5,5 a 45,3ºC. Nas coberturas metálica e cerâmica essa faixa de variação é maior, atingindo valores de 0,6 e 57,7ºC e 3,2 e 52,7ºC, respectivamente, sugerindo que tal dispositivo pode reduzir o stress térmico sobre a laje de cobertura, aumentando o tempo de vida de seus materiais, sugerindo também que a adoção maciça deste dispositivo pode gerar uma redução significativa nos efeitos térmicos das ilhas de calor do ambiente urbano de Florianópolis.

O desenvolvimento tecnológico e científico dos telhados vegetados no país se faz necessário, divulgando aos administradores públicos e à população os benefícios de uma tecnologia que pode colaborar para a diminuição do consumo de energia elétrica para resfriamento e possível opção para amenização dos processos de inundações urbanas, ilhas de calor e aquecimento global. No entanto, ainda requer mais estudos quanto ao dimensionamento e especificação de suas camadas constituintes.

6. Conclusões

Na escala urbana, a relação entre cada edificação e o entorno é recíproca. Ao mesmo tempo em que o entorno afeta a edificação, esta produz impacto sobre o meio circundante. Desse modo, a adequação climática das edificações não é apenas uma das formas de se orientar a concepção arquitetônica, mas uma premissa de projeto.

As análises apresentadas na presente publicação foram construídas com base em dados reais, registrados ao longo de dois anos de monitoramento termo-energético, demonstrando como as estratégias bioclimáticas produziram resultados eficazes para a obtenção do desempenho térmico satisfatório da Casa Eficiente. Verificou-se que a combinação entre inércia térmica, ventilação nos períodos adequados e sombreamento, estratégias incorporadas ao projeto desde a sua concepção, resultou na manutenção de temperaturas internas adequadas ao conforto dos usuários no verão. O mesmo pôde ser observado no inverno, sendo que os resultados satisfatórios dependem, em grande medida, do comportamento do usuário, no que diz respeito à manipulação das esquadrias e dos dispositivos de sombreamento. Também foram demonstrados efeitos negativos, advindos do uso inadequado da edificação, principalmente do tocante à abertura de persianas e admissão da ventilação em períodos quentes no verão.

Os experimentos desenvolvidos também serviram para detectar deficiências do projeto, destacando-se a modificação no posicionamento das esquadrias dos quartos, a fim de favorecer a ventilação cruzada, e o aumento das áreas de abertura de ventilação, consideradas menores do que os limites recomendáveis pela NBR 15220-3 (ABNT, 2005c).

Os experimentos destinados à avaliação da eficácia da ventilação mecânica noturna e do emprego do telhado vegetado demonstraram a viabilidade de estratégias bioclimáticas que apresentam baixo custo de manutenção, mas que causam impactos significativos no desempenho térmico da edificação, favorecendo a obtenção de temperaturas amenas no interior da edificação sem a dependência da utilização de sistemas de condicionamento artificial.

De acordo com os resultados aqui apresentados, pode-se afirmar que a Casa Eficiente cumpriu seu papel de vitrine tecnológica no cenário nacional, no tocante ao estudo do desempenho térmico. Longe de ser considerada como um modelo completo a ser copiado, a Casa Eficiente representa um ponto de partida. As contribuições desta residência experimental compreendem desde as lições de incorporação das estratégias bioclimáticas na concepção do projeto, até os diversos testes realizados *in loco*. Se tais estratégias podem conduzir a definição do partido arquitetônico, testá-las possibilitou a obtenção de um extenso referencial para os projetistas que desejam conceber edificações sob as premissas da bioclimatologia. Embora as soluções e recomendações tenham aplicabilidade restrita a climas semelhantes ao de Florianópolis, a Casa Eficiente constitui-se como um referencial de experiências positivas, ora identificando-se também alguns equívocos, mas, principalmente, demonstrando a necessidade universal de contínuo aprimoramento e modernização do fazer arquitetônico, independentemente do local onde a edificação será construída.

Referências

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9050**: acessibilidade a edificações, mobiliário,espaços e equipamentos urbanos. Rio de Janeiro, 2004.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220**: desempenho térmico de edificações – Parte 1: definições, símbolos e unidades. Rio de Janeiro, 2005a.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220**: 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.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220**: desempenho térmico de edificações – Parte 3: zoneamento bioclimático Brasileiro e estratégias de condicionamento térmico passivo para habitações de interesse social. Rio de Janeiro, 2005c.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575**: edificações habitacionais de até cinco pavimentos – Desempenho. Rio de Janeiro, 2008.

ACROS Fukuoka. 1 fotografia. Disponível em: <http://www.jetsongreen.com/2007/04/flickr_friday_a.html>. Acesso em: nov. 2008.

AKBARI, H.; KURN, D.M.; BRETZ, S.E.; HANDFORD, J.W. **Peak power and cooling energy savings of shade trees**. Energy and Buildings, v.25, p. 139-148, 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. In: ROMAN, H. R.; BONIN, L.C. (Ed.) **Coletânea Habitare**, v. 3, Normatização e certificação na construção habitacional. 2003, p. 43-53.

BASS, B.; BASKARAN, B. **Evaluating rooftop and vertical gardens as an adaptation strategy for urban areas**. National Research Council of Canada Project A020, NRCC, Ottawa, 2001.

BITTENCOURT, L. ; CÂNDIDO, C. **Introdução à ventilação natural**. Maceió: EDUFAL, 2006.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. **Balanço Energético Nacional 2007: Ano Base 2006**. Relatório Final. Rio de Janeiro: EPE, 2007.

CÂNDIDO, C. M. **Ventilação natural e conforto térmico no clima quente e úmido**. Florianópolis: PPGEC – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, 2006. 67 p. (Relatório da disciplina Estudos Avançados de Conforto Térmico).

CARVALHO, C. V. de A. ; MARTHA, L. F. ; TEIXEIRA, W. Fluxovento: um simulador gráfico interativo para o estudo de ventilação em ambientes construído. In: ENCAC-ELACAC 2005 VIII Encontro Nacional sobre Conforto no Ambiente Construído e IV Encontro Latino-Americano sobre Conforto no Ambiente Construído. **Anais...** Maceió, 2005.

CHICAGO City Hall. **Greenroof projects database**. 1 fotografia. Disponível em: <http://www.greenroofs.com/projects/pview.php?id=21>. Acesso em: nov. 2008

CURTIS, W. J.R. **Le Corbusier: Ideas and Forms**. Paidon Press, Oxford, 1986.

DEL BARRIO, E. P. Analysis of the green roofs cooling potential in buildings. **Energy and Buildings**, v. 27, n. 2, p. 179-193, 1998.

ELETROBRAS. **Catálogo Selo Procel 2008: Condicionadores de ar**. Disponível em: <http://www.eletrobras.com/CatalogoSeloProcel2008/janela.html?cod=vencedores>. Acesso em: dez. 2008.

EMILIO AMBASZ & ASSOCIATES, Inc. **Fukuoka Prefectural International Hall**. 1 fotografia. Disponível em: <http://www.emilioambaszandassociates.com/portfolio/type.cfm?type=2>. Acesso em: nov. 2008.

GIVONI, B. Comfort climate analysis and building design guidelines. **Energy and Buildings**, v.18, n.1, p. 11-23, 1992.

GOULART, S. **Dados climáticos para avaliação de desempenho térmico de edificações de Florianópolis. Florianópolis**, Universidade Federal de Santa Catarina, 1993.

KOENIGSBERGER, O.H.; INGERSOLL, T.G.; MAYHEW, A.; SZOKOLAY, S.V. **Viviendas y edificios en zonas calidas y tropicales**. Madri: Paraninfo, 1977.

KOLOKOTRONI, M.; SANTAMOURIS, M. **Ventilation for cooling**. In: Advances in passive cooling. SANTAMOURIS, M. (Ed.). London: EARTHSCAN, 2007, p. 140-189.

KRAYENHOFF, E.S.; MARTILLI, A.; BASS, B.; STULL, R. B. Mesoscale simulation of urban heat mitigation strategies in Toronto, Canada. In: Fifth International Conference on Urban Climate. **Proceedings...** Lodz, Poland, 2003.

KÖHLER, M.; SCHMIDT, M.; GRIMME, F.W.; LAAR, M.; DE ASSUNÇÃO PAIVA, V.L.; TAVARES, S. Green roofs in temperate climates and in the hot-humid tropics – far beyond the aesthetics. In: XVIII International Conference on Passive and Low Energy Architecture – Renewable Energy for a Sustainable Development of the Built Environment. **Anais...** Florianópolis, 2001.

KÖHLER, M.; SCHMIDT, M.; LAAR, M. **Roof Gardens in Brazil**. RIO 3 – World Climate & Energy Event, Rio de Janeiro, 2003.

LabEEE – Laboratório de Eficiência Energética em Edificações. **Arquivos climáticos**. Disponível em: <http://www.labeee.ufsc.br/downloads/downloadaclim.html>. Acesso em: nov. 2009.

LAZZARIN, R. M.; CASTELLOTI, F.; BUSATO, F. Experimental measurements and numerical modeling of a green roof. **Energy and Buildings** v. 37, n. 12, p. 1260-1267, dez. 2005

LBL – Lawrence Berkeley National Laboratory. Heat Island Group. **Sketch of an Urban Heat-Island Profile**. Disponível em: <http://eetd.lbl.gov/HeatIsland/HighTemps/>. Acesso em: nov. 2008.

LIU, K. Energy Efficiency and Environmental Benefits of Rooftop Gardens. **Construction Canada**, v. 44, n. 2, p. 20-23, 2002.

LIU, K. Engineering performance of rooftop gardens through field evaluation. In:18th International Convention of the Roof Consultants Institute. **Proceedings…** p. 93-103, 2003.

MACIEL, A. A. **Centro de Demonstração em Eficiência Energética Eletrosul – CDEEE**. Florianópolis: LABEEE – Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, 2005. (Relatório técnico).

MAGNUSSON, T. **A Showcase of Icelandic National Treasures**. Reykjavik: Iceland Review, 1987.

MEDEIROS, A. T. **Estimativa da evapotranspiração de referência a partir da equação de Penman-Monteith, de medidas lisimétricas e de equações empíricas, em Paraíba, CE**. Tese de Doutorado, ESALQ-USP, Piracicaba, SP, 2002.

MINKE, G. **Dächer begrünen einfach und wirkungsvoll**. 2000.

NASA. Goddard Space Flight Center – Scientific Visualization Studio. **Zoom and spin around Atlanta: Daytime thermal view of the heat island**. Disponível em: <http://svs.gsfc.nasa.gov/vis/a000000/a001000/a001052/index.html>. Acesso em: nov. 2008.

NIACHOU, A.; PAPAKONSTANTINOU, K.; SANTAMOURIS, M.; TSANGRASSOULIS, A.; MIHALAKAKOU, G. Analysis of the green roof thermal properties and investigation of its energy performance. **Energy and Buildings**, v. 33, n. 7, p. 719-729, 2001.

NIMER, E. Climatologia do Brasil. Rio de Janeiro: FIBGE, 1979.

OKE, T. R. The energetic basis of the urban heat island. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v.108, n. 455, p.1-24, 1982.

OLGYAY, V. **Clima y Arquitectura en Colombia**. Universidad del Valle, Facultad de Arquitetura, Cali – Colombia, 1968.

ONMURA, S.; MATSUMOTO M.; HOKOI S. Study on evaporative cooling effect of roof lawn gardens. **Energy and Buildings**, v. 33, n. 7, p. 653-666, 2001.

PAPST, A. L. **Uso de Inércia Térmica em Clima Subtropical – Estudo de caso Florianópolis-SC**. 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999.

PECK, S.; KUHN, M. **Design guidelines for Green Roofs**. Canada Mortgage and Housing Corporation, Canada, 1999.

PEREIRA, F. O. R.; NETO, J. A. B. da C. Princípios para otimização do desempenho térmico de componentes da edificação. In: Simpósio de Desempenho de Materiais e Componentes de Construção Civil, 1. **Anais...** Florianópolis: ANTAC, 1988, p. 124 - 131.

SAILOR, D.J. Mitigation of Urban Heat Islands – Recent Progress and Future Prospects. In: 6th Symposium on the Urban Environment and Forum on Managing our Physical and Natural Resources: Successes and Challenges. **Proceedings...** 2006.

SONNE, J. Energy Performance Aspects of a Florida Green Roof. In: Fifteenth Symposium on Improving Building Systems in Hot and Humid Climates. **Proceedings...** Orlando - FL, jul. 2006.

TAVARES, S.F. **Metodologia para análise do ciclo de vida energético de edificações residenciais brasileiras**. 2006. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

VANCOUVER Library. **EcoBuilding Guild Demonstration Green Roofs**. 1 fotografia. Disponível em: <http://www.hadj.net/green-roofs/photos.html>. Acesso em: nov. 2008.

WATSON, D; LABS, K. **Climatic Building Design**. Energy-efficient building principles and practice. McGraw - Hill book Company. 1983.

WONG, N.H.; CHEN, Y.; ONG, C.L.; SAI, A. Investigation of thermal benefits of rooftop garden in the tropical environment. **Building and Environment**, v. 38, n.2, p. 261-270, 2003.

Localizada em Florianópolis–SC, a Casa Eficiente é resultado da parceria estabelecida entre a ELETROSUL, a ELETROBRAS, através do PROCEL, e a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), através do Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LabEEE).

A Casa Eficiente foi projetada para se tornar uma vitrine de tecnologias de ponta de eficiência energética e conforto ambiental para edificações residenciais. Reúne diversas estratégias de adequação climática, com o aproveitamento da ventilação e da luz natural, adotadas como alternativas ao uso da refrigeração e iluminação artificiais. Conta com aproveitamento da energia solar térmica para aquecimento de água e da energia solar luminosa para a geração de eletricidade através de um painel fotovoltaico interligado à rede. Visando a redução do impacto ambiental e o uso eficiente da água, a Casa Eficiente utiliza água da chuva para fins não potáveis, faz reúso de águas cinzas para irrigação do jardim, e os efluentes recebem tratamento biológico por zona de raízes.

É objetivo de todos os parceiros envolvidos neste empreendimento divulgar as lições aprendidas com os trabalhos realizados na Casa Eficiente, a fim de que este projeto cumpra de modo efetivo seu papel de instrumento disseminador de conceitos e boas práticas no setor da construção civil.

ISBN 978-85-7426-098-3
9 788574 260983

LabEEE

PROCEL
PROGRAMA NACIONAL DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Eletrobras
Eletrosul

Ministério de
Minas e Energia

GOVERNO FEDERAL
BRASIL
PAÍS RICO É PAÍS SEM POBREZA