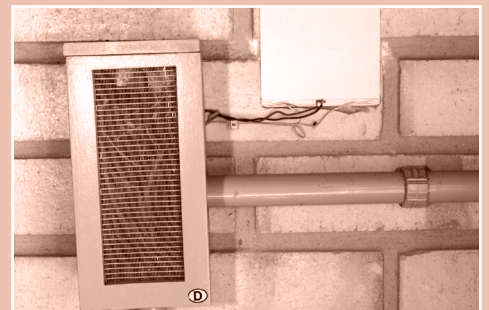
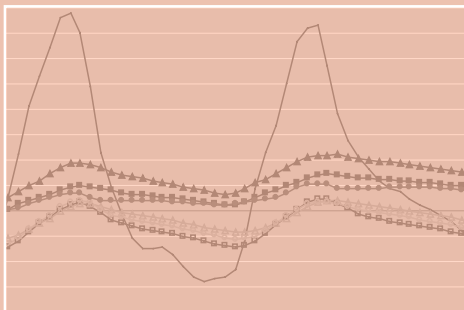
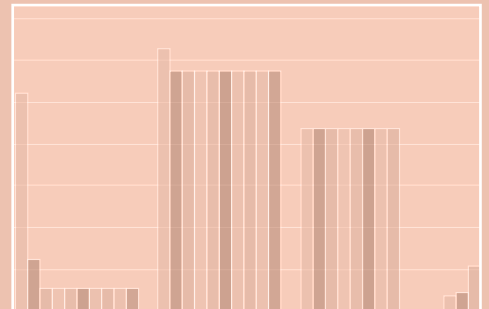
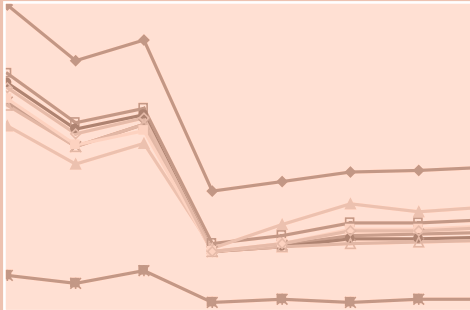


Casa Eficiente

Simulação Computacional do Desempenho Termo-Energético



Casa Eficiente:

Simulação Computacional do Desempenho Termo-Energético

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 Marinowski
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 Grunewald Miglievich Leduc
Maria Tereza Marques da Silveira
Patrícia Zofoli Dorna
Rebeca Obadia Pontes
Rodrigo da Costa Casella
Viviane Gomes Almeida

ELETROBRAS ELETROSUL

Equipe Técnica

Eduardo Campos
Jorge Luis Alves
Henrique Brognoli Martins
Aniceto Carlos Kroker Pelka
Ruy de Castro Sobrosa Neto
Fernando Luiz Boveroli 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 : simulação computacional do desempenho termo-energético / editores: Roberto Lamberts...
[et al.]. – Florianópolis : UFSC/LabEEE; 2010.
v. 4 (53 p.) : il. ; graf. ; tabs.

Inclui bibliografia
ISBN: 978-85-7426-099-0

1. Arquitetura e conservação de energia – Avaliação – Simulação por computador. 2. Conforto térmico – Avaliação. 3. Habitações – Ventilação – Simulação por computador. I. Lamberts, Roberto. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Laboratório de Eficiência Energética em Edificações.

CDU: 72:697

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 ELETROBRÁS 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 Eletrobrás

A Eficiência e o Futuro

Alinhada à missão da Eletrobrás, a Eletrosul, como empresa do Sistema Eletrobrás, 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 bioclimáticas, a Eletrosul, em parceria com a Universidade Federal de Santa Catarina e a Eletrobrás, 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 Eletrobrás Eletrosul

Sumário

PREFÁCIO.....	7
RESUMO EXECUTIVO.....	13
1. INTRODUÇÃO.....	15
2. SIMULAÇÕES PARA O PROJETO DA CASA EFICIENTE.....	17
2.1. Modelos Simulados.....	17
2.2. Resultados Principais.....	21
3. SIMULAÇÕES DA CASA EFICIENTE APÓS SUA CONSTRUÇÃO.....	27
3.1. Calibração do Modelo Computacional da Casa Eficiente.....	27
3.1.1. Modelo Inicial.....	28
3.1.2. Ajustes do Modelo.....	35
3.1.3. Resultados e Modelo Final.....	36
3.2. Análises do Desempenho Térmico da Casa Eficiente.....	40
3.2.1. A Utilização da Ventilação Diurna e Noturna para o Conforto no Verão.....	41
3.2.2. A Importância do Aquecimento Solar Passivo para o Conforto no Inverno.....	46
3.2.3. O Desempenho das Coberturas da Casa Eficiente.....	48
4. CONCLUSÕES.....	51
REFERÊNCIAS.....	52

Prefácio

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

Em setembro de 2002, técnicos da ELETROSUL e da ELETROBRÁS 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.

Com a criação do Procel Edifica pela ELETROBRÁS/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, ELETROBRÁS/PROCEL e a UFSC evoluíram, 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 encaminhadas para a rede coletora e as águas cinzas tratadas são armazenadas para uso na irrigação do jardim da Casa.



FIGURA 1 – Vista Sudoeste da Casa.



FIGURA 2 – Vista Sudeste da Casa.



FIGURA 3 – Vista Nordeste da Casa.



FIGURA 4 – Vista Noroeste da Casa.

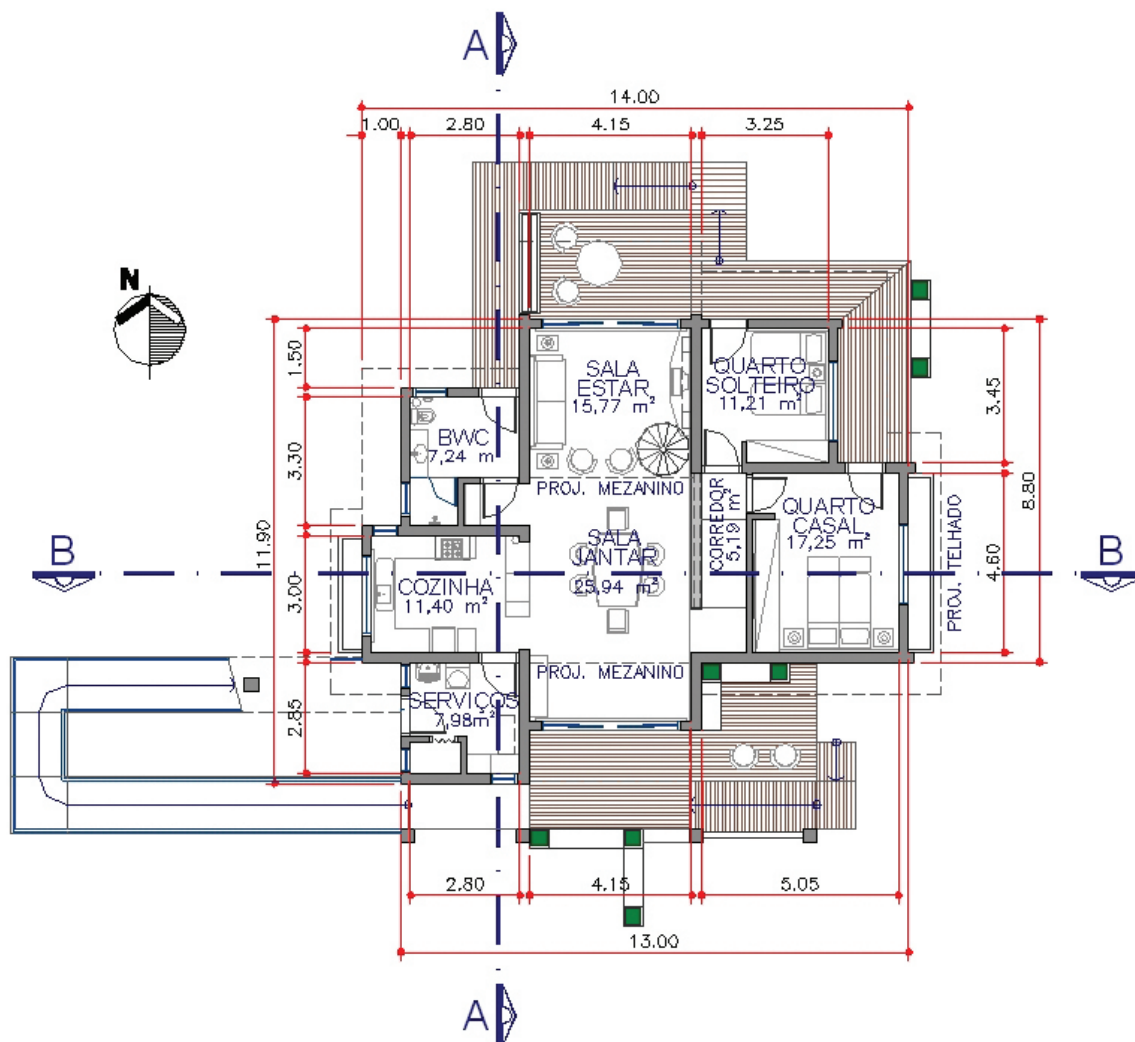


FIGURA 5 – Planta baixa da Casa Eficiente – pavimento térreo.

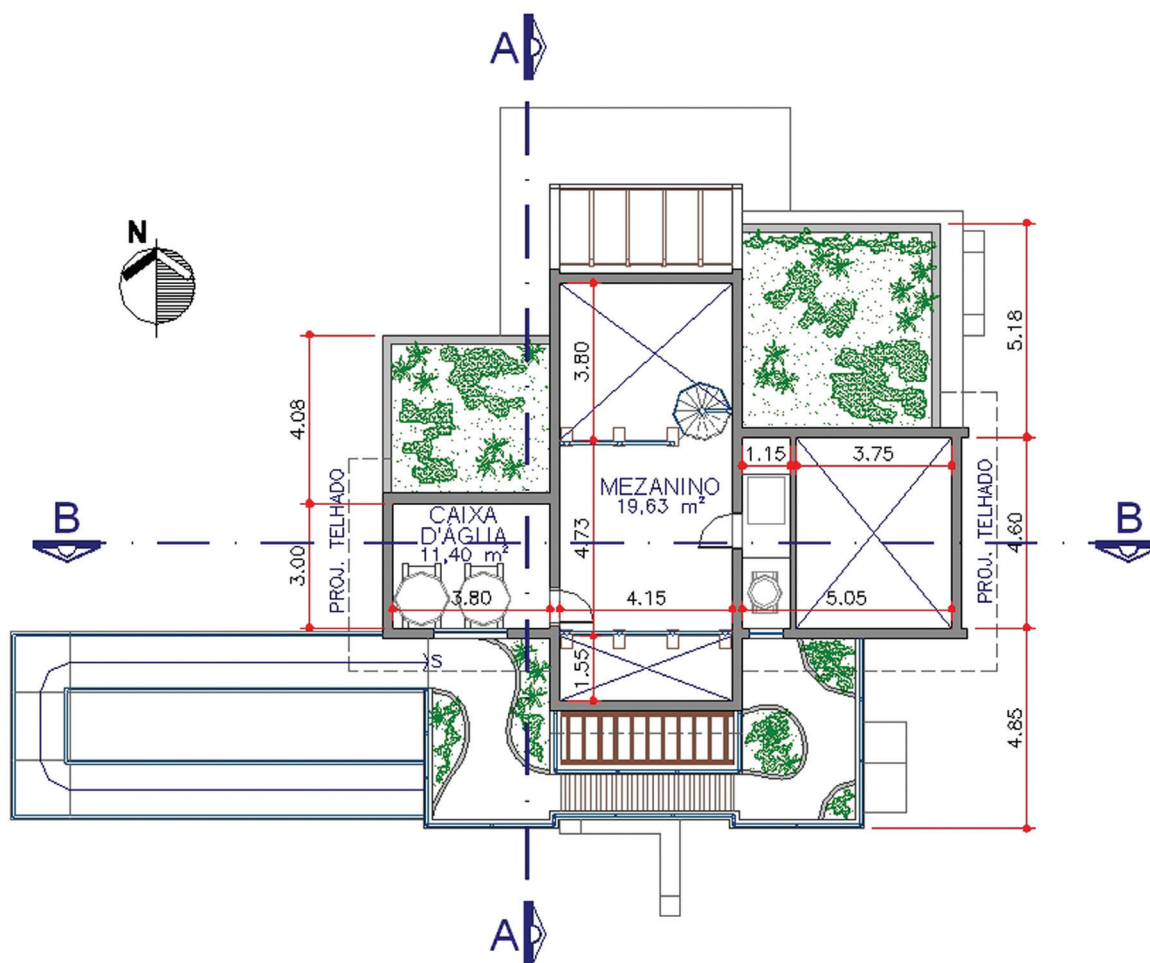


FIGURA 6 – Planta baixa da Casa Eficiente – mezanino.

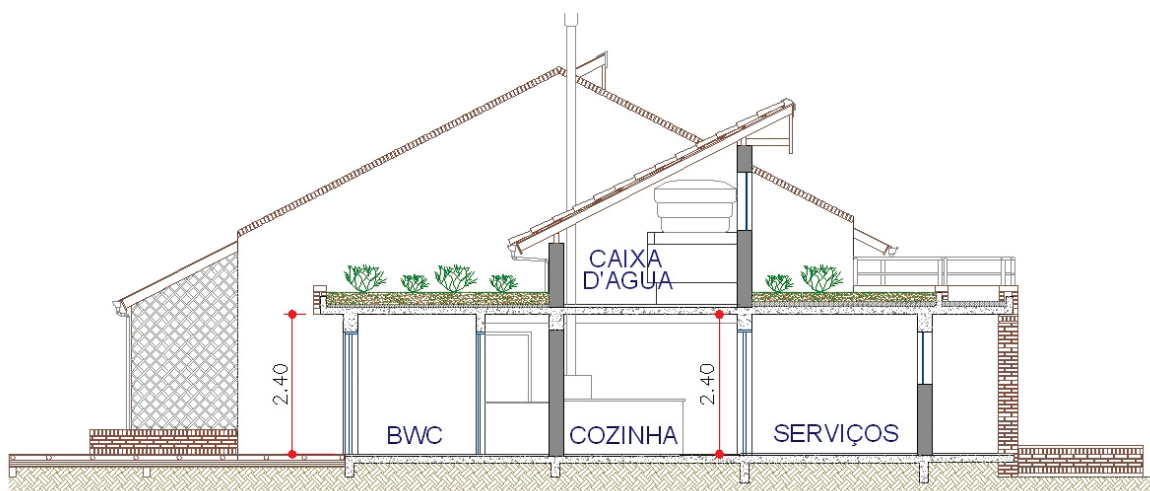


FIGURA 7 – Corte AA.

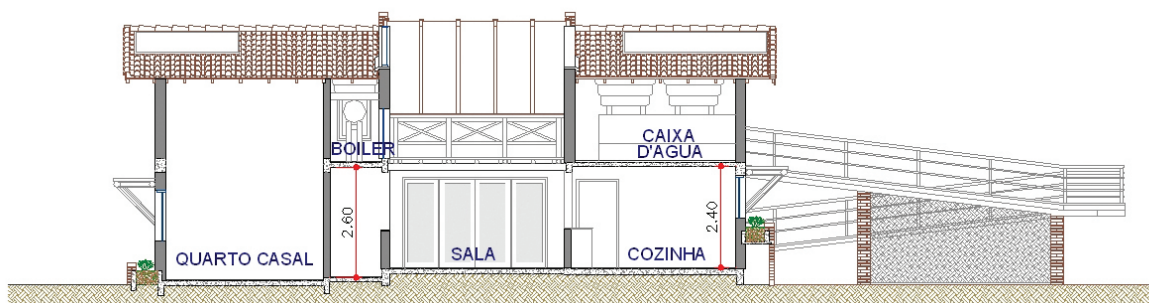


FIGURA 8 – Corte BB.

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 ELETROBRÁS/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

Os programas computacionais para simulação de edificações são importantes ferramentas para análises detalhadas de desempenho termo-energético. Ao longo das pesquisas realizadas com a Casa Eficiente, o programa *EnergyPlus* foi utilizado em diversas simulações computacionais. Elas foram utilizadas para permitir e facilitar algumas análises de desempenho térmico dos componentes construtivos, de eficiência energética, do uso da ventilação natural e do uso do aquecimento solar passivo.

Nas pesquisas envolvendo a Casa Eficiente, foram realizadas simulações tanto nas etapas iniciais de projeto, quanto após a sua construção. Nas simulações realizadas antes da construção, foram avaliados dez modelos, com a mesma planta e volumetria da residência, alterando parâmetros construtivos e de uso e ocupação. Dessa forma, pôde-se verificar a influência de cada estratégia de interesse, tais como cobertura com isolamento térmico, parede dupla e com isolamento, proteção solar nas aberturas, vidros duplos, equipamentos eficientes e ventilação natural.

Como resultado final destas primeiras simulações, concluiu-se que o uso dessas estratégias em uma configuração única resultaria em um melhor desempenho termo-energético da edificação. Foi possível diminuir o consumo energético e melhorar as condições de conforto térmico para os usuários. Tal configuração corresponde ao adotado no projeto arquitetônico da Casa Eficiente.

Já com as simulações efetuadas após a construção foi possível testar e calibrar o modelo computacional, verificando a semelhança de seu comportamento térmico com o verificado em medições na Casa Eficiente. Com essa calibração, após alguns ajustes, foi definido um modelo que representa com bastante proximidade os valores medidos na Casa. Apesar de algumas diferenças, o modelo final foi considerado adequado para as simulações de análises de desempenho térmico da Casa Eficiente. Em seguida, foram realizadas análises de desempenho térmico da Casa Eficiente, obtendo como resultado os graus-hora de desconforto na edificação, e sua comparação com o encontrado no ambiente externo.

Foram realizadas simulações com diferentes opções de ventilação para o período do verão, demonstrando que a ventilação pode ser uma grande aliada para o conforto térmico dos usuários do ambiente quando bem utilizada, mas também pode prejudicar o conforto quando utilizada sem critério. As simulações mostraram que o conforto térmico no período de verão é favorecido pela integração entre ventilação diurna e noturna, sendo ela controlada pelo valor da temperatura do ar no interior e no exterior da edificação. Entre utilizar apenas ventilação diurna ou noturna, a segunda opção foi mais favorável ao conforto.

A vantagem da utilização do aquecimento solar passivo para melhoria do conforto no período de inverno foi testada com simulações computacionais, variando a abertura das persianas. Os resultados apontaram que a abertura das persianas no período diurno, ao permitir o aproveitamento do sol para aquecimento no inverno, favoreceu o conforto térmico dos usuários nos ambientes da Casa.

Por fim, a simulação computacional foi utilizada para comparar o comportamento dos diferentes tipos de cobertura existentes na Casa. Os resultados mostraram que, tanto a cobertura com telha metálica (sala), quanto a com telha de barro (quarto de casal), promovem grande ganho de calor no período diurno, durante o verão, e grande perda de calor no período noturno, durante o inverno, significando que elas

ganham e perdem calor nos momentos mais indesejados. Já o telhado vegetado (quarto de solteiro e banheiro), tem maiores ganhos de calor no período noturno e ganhos menores, ou até perdas, de calor no período diurno. Desta forma, o telhado vegetado mostrou ser a cobertura que mais favorece o desempenho térmico da Casa.

Todos os estudos realizados, demonstraram a importância e grande utilidade da simulação computacional nas análises termo-energéticas de edificações, como a Casa Eficiente. Com elas, foi possível estudar o comportamento térmico e consumo energético da edificação, mesmo antes da sua construção. A simulação também colaborou para o entendimento das trocas de calor na Casa, do efeito da ventilação natural e do aquecimento solar em seu desempenho térmico.

1. Introdução

Autora:

Cláudia Donald Pereira

Diversas ferramentas computacionais de simulação têm sido desenvolvidas com o intuito de facilitar a análise e avaliação de projetos e edifícios quanto ao seu comportamento energético, térmico, acústico e de iluminação, entre outros. Elas têm se tornado cada vez mais importantes, ganhando destaque em pesquisas de diversos países. O Departamento de Energia dos Estados Unidos tem disponível na Internet (DOE, 2007) uma lista com 347 programas de simulação de edificações, para análises de eficiência energética, energias renováveis e sustentabilidade em edifícios.

O programa *EnergyPlus*, desenvolvido pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos, é um dos mais utilizados para análises termo-energéticas de edificações. Ele foi criado com o objetivo principal de estimar trocas térmicas, níveis de iluminação e consumo energético de edifícios, a partir da modelagem física do edifício e seus sistemas de ventilação, iluminação, aquecimento e resfriamento. Atualmente, com as versões mais novas do programa, é possível ainda adicionar ventilação natural, usos de água, sistemas fotovoltaicos, índices de conforto térmico, entre outros.

Com o *EnergyPlus*, são realizadas simulações para diferentes climas, conforme o interesse do usuário, a partir de um arquivo climático com dados horários. Como resultado, obtêm-se uma série de dados calculados, tais como temperaturas internas, temperaturas superficiais, fluxo de calor pelos componentes do edifício, ganhos internos de calor, consumo energético, trocas de ar, etc.

Infelizmente, esse tipo de ferramenta é ainda pouco utilizada pelos profissionais atuantes na construção civil. Isso deve-se principalmente à complexidade dos programas e a consequente dificuldade no aprendizado. Westphal e Lamberts (2005) destacam que a complexidade dos fenômenos envolvendo o comportamento térmico de edifícios implica em uma grande quantidade de dados de entrada nas simulações, o que requer conhecimentos multidisciplinares dos usuários.

Embora não sejam pequenas as dificuldades, as simulações têm sido de grande valia nas pesquisas com análises termo-energéticas de edificações. Batista et al. (2005) defendem que programas como o *EnergyPlus* são ferramentas valiosas para o projetista, exigindo, contudo, um conhecimento aprofundado a respeito das diversas variáveis envolvidas no balanço térmico de uma edificação. Isso faz-se necessário para assegurar a correta interpretação dos resultados das simulações, auxiliando em sua posterior aplicação no projeto de edificações energeticamente eficientes e capazes de garantir a satisfação dos seus usuários.

Ao longo das pesquisas realizadas com a Casa Eficiente, o programa *EnergyPlus* foi utilizado em diversas simulações computacionais. Elas ocorreram tanto antes da construção da Casa, para auxiliar nas decisões de projeto, avaliando as melhores estratégias a serem adotadas, quanto após sua inauguração, auxiliando em estudos e análises de desempenho térmico e eficiência energética.

Este livro tem como objetivo descrever as simulações computacionais realizadas para a Casa Eficiente, desde o seu projeto até o momento atual, bem como apresentar os resultados destas simulações e as conclusões obtidas a partir deles. O Capítulo 2 deste livro, apresenta as simulações que foram realizadas durante o desenvolvimento do projeto da Casa Eficiente. Já no Capítulo 3, são mostradas as simulações realizadas após a construção da Casa, a fim de facilitar as análises do seu desempenho térmico. Por fim, no Capítulo 4, apresentam-se as principais conclusões obtidas a partir dos estudos da Casa Eficiente, utilizando a simulação computacional.



2. Simulações para o projeto da Casa Eficiente

Autoras:

Cláudia Donald Pereira

Juliana Oliveira Batista

Neste capítulo são apresentadas as simulações realizadas durante o desenvolvimento do projeto da Casa Eficiente, que colaboraram para a comprovação dos benefícios obtidos a partir da adoção de estratégias passivas de condicionamento ambiental, bem como do uso de equipamentos e hábitos de consumo eficientes.

O projeto da Casa Eficiente foi fundamentado em vários estudos de bioclimatologia, para adequação da edificação às condições e clima do local. Entre tais estudos, foram realizadas simulações computacionais utilizando o programa *EnergyPlus*, com o objetivo de avaliar e quantificar os benefícios relacionados à adoção de estratégias passivas de condicionamento ambiental, implementadas no projeto da Casa Eficiente. Além disso, as simulações objetivaram demonstrar o impacto da adoção de hábitos de consumo eficientes por parte dos usuários da edificação e também da substituição de lâmpadas e equipamentos elétricos por alternativas com menor consumo de energia.

Foram simuladas as seguintes estratégias passivas de condicionamento ambiental: ventilação natural diurna e insuflamento mecânico do ar externo à noite, durante o verão; sombreamento das aberturas e emprego de vidros duplos; emprego de isolamento térmico nas paredes e coberturas. Não foram simulados os sistemas relacionados ao uso racional da água e ao sistema de geração de energia fotovoltaica interligada à rede, que foram incorporados ao projeto.

Para estas simulações termo-energéticas foram empregados os dados do ano climático de referência – *TRY (Test Reference Year)* para a cidade de Florianópolis. Dessa forma, a carga térmica interna da edificação é calculada hora a hora para as condições climáticas da região, tornando possível estimar o consumo de energia elétrica relativa ao condicionamento ambiental, bem como aos demais sistemas instalados na residência. Os modelos definidos para este estudo são descritos a seguir.

2.1. Modelos Simulados

Nesta etapa, dez modelos computacionais foram elaborados para a realização das simulações. Em todos eles foi utilizada a mesma planta e volumetria da residência, conforme a Figura 2.1. Considerou-se quatro ocupantes na residência, variando-se os períodos de permanência em cada ambiente de acordo com o horário e o dia da semana. Puderam se caracterizar também os padrões de uso de cada ambiente ou zona térmica, considerando-se períodos diferenciados de acionamento das lâmpadas e demais cargas elétricas

instaladas, definindo-se a temperatura de controle do sistema de condicionamento de ar (*set points* de temperatura) para o inverno e verão, a fim de melhor representar condições reais de uso de uma residência ocupada por uma família. Mesmo o projeto da Casa Eficiente não contando com aparelhos de ar-condicionado o uso desse equipamento foi simulado, a fim de efetuar comparações de consumo energético. A Tabela 2.1 apresenta o resumo das estratégias simuladas.

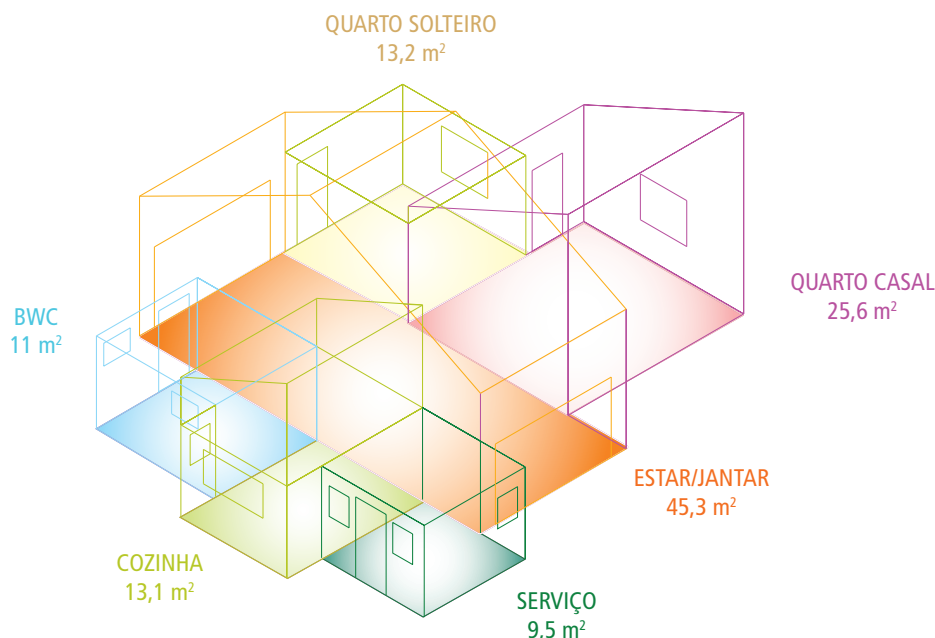


FIGURA 2.1 – Perspectiva do modelo simulado.

TABELA 2.1 – Resumo das características das alternativas simuladas.

Alternativas simuladas	Tecnologias incorporadas ao projeto
MODELO 1: Caso de Referência	Padrões construtivos comumente empregados.
MODELO 2: MODELO 1 + Equipamentos eficientes	Uso de equipamentos eficientes (lâmpadas e eletrodomésticos).
MODELO 3: MODELO 2 + Uso eficiente dos equipamentos	Uso de equipamentos eficientes associados à redução no período de uso da iluminação artificial e equipamentos.
MODELO 4: MODELO 3 + Coberturas com isolamento térmico	Uso de câmara de ar, isolamento refletivo de alumínio, manta de lã de rocha e forro de madeira junto com telha de barro.
MODELO 5: MODELO 3 + Paredes duplas com isolamento térmico	Uso de paredes duplas de tijolo maciço com manta isolante de lã de rocha.
MODELO 6: MODELO 3 + Paredes duplas e coberturas com isolamento	Emprego conjunto da cobertura com isolamento (MODELO 4) e paredes duplas (MODELO 5).
MODELO 7: MODELO 3 + Aberturas com protetores solares	Inserção de protetores solares horizontais e venezianas nas aberturas.
MODELO 8: MODELO 3 + Vidros duplos	Emprego de vidros duplos nas aberturas.
MODELO 9: MODELO 3 + Condicionamento alternativo (passivo)	Adoção da ventilação natural, inclusive no período noturno (quartos), em substituição aos condicionadores de ar tipo "janela".
MODELO 10: MODELOS 6 + 7 + 8 + 9 (Casa Eficiente)	Proposta equivalente ao projeto real, com a incorporação das tecnologias empregadas nos modelos 6, 7, 8 e 9.

O primeiro modelo, denominado Caso de Referência, foi desenvolvido para avaliar o consumo de energia elétrica obtido pela edificação com padrões construtivos comumente empregados em Florianópolis. Tais padrões são caracterizados pela inadequação ao clima local, reunindo elementos e sistemas considerados ineficientes sob os pontos de vista bioclimático e energético. Utilizaram-se cobertura de fibrocimento com forro de madeira, paredes simples de tijolo sem isolamento térmico, janelas com vidros simples e sem proteções solares.

Além disso, o Modelo 1 utilizou climatização artificial nos quartos e na sala, com condicionadores de ar ineficientes do tipo janela, classificados como etiqueta “D” pelo INMETRO. Tais condicionadores de ar, nos meses de outubro a dezembro, eram acionados sempre que a temperatura interna fosse superior a 24°C, a fim de resfriar o ambiente. Entre abril e setembro, os equipamentos eram acionados sempre que a temperatura fosse inferior a 18°C, a fim de aquecer o ambiente. Para a iluminação artificial foram adotadas lâmpadas incandescentes, e os demais equipamentos também eram de baixa eficiência, com as cargas térmicas indicadas na Figura 2.2. Nesse modelo também foram simulados hábitos de consumo pouco eficientes por parte dos usuários da edificação, em relação ao uso da iluminação artificial e ao acionamento dos condicionadores de ar. O Caso de Referência serviu como base para a avaliação do desempenho de cada modelo simulado.

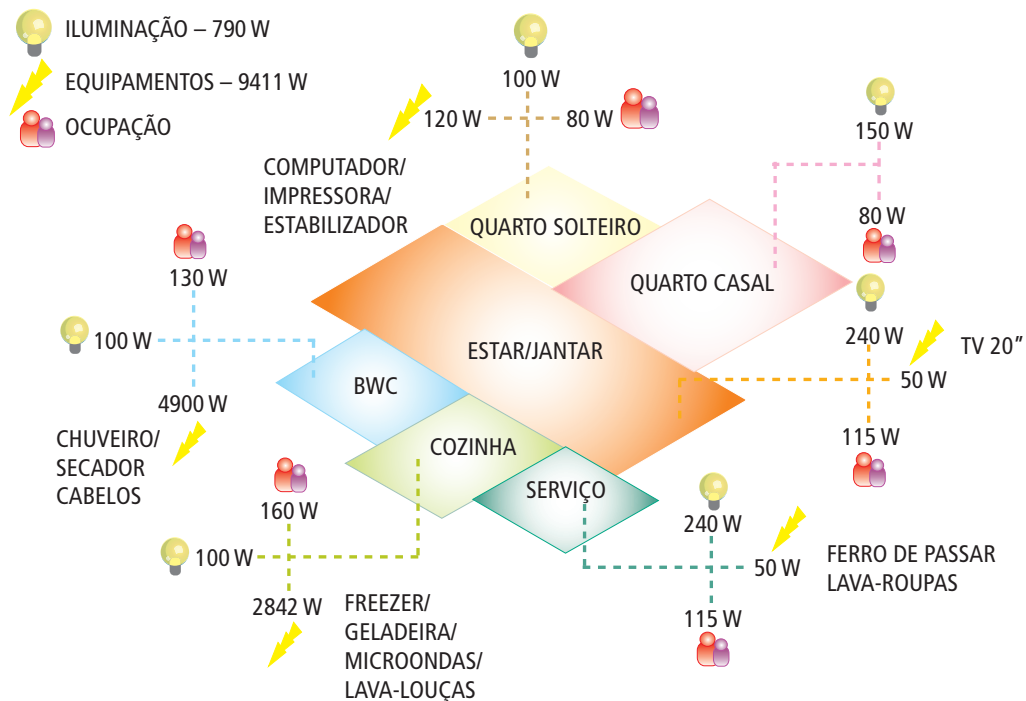


FIGURA 2.2 – Cargas internas do Modelo 1.

Nos demais modelos foram simuladas tecnologias diferenciadas, com o emprego de componentes do envelope construtivo e estratégias de condicionamento ambiental adequadas ao clima de Florianópolis, possibilitando avaliar individualmente a influência de cada uma delas no desempenho térmico e energético da Casa Eficiente. As tecnologias foram propostas visando o uso racional da

energia elétrica e menor impacto ambiental do projeto, utilizando configurações construtivas com isolamento térmico, estratégias de condicionamento passivo em substituição ao condicionamento artificial, uso de eletrodomésticos e sistemas de iluminação eficientes, além de padrões racionais de uso da edificação.

O Modelo 2 possui as mesmas características construtivas do Caso de Referência, com exceção das cargas internas. Os equipamentos elétricos, que eram de baixa eficiência, foram substituídos por equipamentos eficientes, ou seja, equipamentos classificados com o selo do PROCEL equivalente a máxima eficiência energética em cada caso (etiqueta “A” do INMETRO). Foram substituídos o freezer, geladeira e condicionadores de ar. As lâmpadas incandescentes também foram substituídas por lâmpadas fluorescentes compactas.

O Modelo 3 foi baseado no Modelo 2, mas com diferenças no padrão de uso da residência, representando o comportamento de uma família com um uso mais racional de energia. Dessa forma, pôde-se identificar a influência de mudanças de hábito no consumo de energia elétrica.

O Modelo 4 manteve os mesmos padrões de uso, ocupação e cargas internas do Modelo 3. Nele foi alterada a configuração da cobertura, acrescentado o isolamento térmico, em todos os ambientes. Assim, busca-se a redução da carga térmica originada pela exposição da cobertura à radiação solar.

O Modelo 5 foi definido a partir do Modelo 3, com a substituição das paredes simples em tijolo maciço por paredes duplas em tijolo maciço com isolamento térmico, com manta de lã de rocha. Este tipo de parede, assim como o tipo de cobertura empregado no Modelo 4, apresenta transmitância e atraso térmicos inferiores aos limites máximos recomendados pela NBR 15220-3 (ABNT, 2005b) para o clima de Florianópolis, classificado na Zona Bioclimática 3, mostrados na Tabela 2.2.

TABELA 2.2 – Diretrizes para a Zona Bioclimática 3.

Indicação de vedações externas para a Zona Bioclimática 3	Transmitância térmica – U (W/m ² .K)	Atraso térmico – ϕ (horas)
Parede: Leve refletora	$U \leq 3,60$	$\phi \leq 4,3$
Cobertura: Leve isolada	$U \leq 2,00$	$\phi \leq 3,3$

No Modelo 6 foram utilizados os tipos de cobertura e de parede empregados nos Modelos 4 e 5, mantendo-se as demais características do Modelo 3.

No Modelo 7 foram empregados protetores solares em todas as aberturas, mantendo-se as demais características correspondentes ao Modelo 3. Foram empregados protetores solares horizontais fixos e persianas de enrolar. Todos os protetores tiveram suas dimensões calculadas com o auxílio de cartas solares, a fim de evitar a penetração da radiação solar no verão, mas permiti-la durante o inverno.

No Modelo 8 mantiveram-se as características do Modelo 3, alterando o tipo de vidro empregado nas aberturas. Foi utilizada uma configuração composta por duas lâminas de vidro com câmara de ar intermediária, resultando em um Fator Solar (FS) igual a 0,75, em vez do vidro simples empregado nas simulações anteriores (FS = 0,87).

O Modelo 9 foi simulado aplicando estratégias de condicionamento ambiental passivo como alternativa ao condicionamento artificial: ventilação cruzada durante o dia e insuflamento mecânico do ar à noite no verão. Construída a partir do Modelo 3, nesta alternativa foram retirados dos quartos e da sala os condicionadores de ar do tipo janela, e inseridos nos dois quartos equipamentos denominados insufladores, destinados a introduzir nos ambientes o ar externo, durante a noite, sempre que a temperatura interna fosse superior a 24°C. A potência de cada equipamento corresponde a 100W. A ventilação natural foi empregada em todos os ambientes, em períodos fixos ao longo do ano.

No último modelo, Modelo 10, foi realizada a incorporação conjunta das tecnologias propostas nas simulações anteriores. Nele foram reunidas a adoção de equipamentos eficientes e padrão de uso eficiente dos equipamentos e iluminação, emprego conjunto de paredes duplas e cobertura com isolamento térmico, emprego de proteção solar e vidros duplos nas aberturas e emprego do condicionamento ambiental passivo. Além dessas características, o Modelo 10 procurou representar o projeto final da Casa Eficiente e, portanto, adotou os mesmos tipos de cobertura indicados no projeto da residência: telhado vegetado sobre o quarto de solteiro e banheiro, cobertura em telha metálica com isolamento de manta de lã de rocha na cobertura central e cobertura em telha cerâmica com isolamento térmico sobre a cozinha e quarto de casal.

Desse modo, foi possível realizar uma estimativa do desempenho térmico e energético da Casa Eficiente e avaliar o impacto da adoção das estratégias incorporadas ao projeto, por exemplo, comparando-se os percentuais de economia de energia elétrica obtidos pela proposta final em relação ao Caso Base.

Por utilizarem uma versão mais antiga do programa *EnergyPlus*, versão 1.2.0, estas simulações apresentam algumas limitações que impediram uma modelagem mais aproximada ao projeto. A simulação da ventilação natural foi realizada de forma simplificada, adotando taxas fixas de renovação de ar por hora para cada ambiente. As estratégias ligadas ao sistema de geração de energia fotovoltaica interligada à rede e ao uso racional da água, que foram incorporadas ao projeto, não foram incluídas nas simulações.

2.2. Resultados Principais

Os resultados destas simulações dizem respeito a estimativas de consumo de energia elétrica para as diferentes alternativas de projeto. Tais estimativas são expressas pelos consumos mensais e usos finais de energia elétrica no período de um ano. O desempenho térmico da residência foi analisado com base no somatório de graus-hora necessários para o resfriamento da edificação durante o verão e seu aquecimento durante o inverno. A temperatura limite adotada para o verão foi 24°C e para o inverno 18°C.

Somatório de graus-hora representa a quantidade de graus excedentes das temperaturas internas em relação a uma temperatura limite máxima adotada como referência no verão (graus-hora necessários para resfriamento), ou quantos graus “faltaram” para que as temperaturas internas alcançassem uma temperatura limite mínima adotada para o inverno (graus-hora necessários para aquecimento).

O cálculo do somatório de graus-hora é exemplificado na Figura 2.3 e na Tabela 2.3. Verifica-se quantos graus a temperatura média horária do ar no interior do ambiente está acima da temperatura limite máxima, adotada como 24°C, ou abaixo da temperatura limite mínima, considerada como 18°C. A soma dessas diferenças, a cada hora, é o valor total de graus-hora.

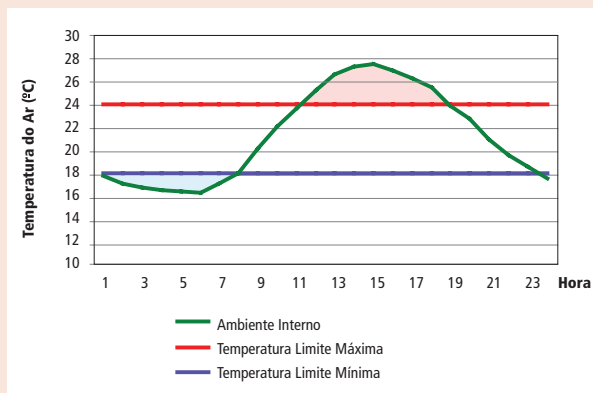


FIGURA 2.3 – Exemplo de cálculo de graus-hora.

TABELA 2.3 – Exemplo de cálculo de graus-hora.

Horário	1h	2h	3h	4h	5h	6h	7h	8h	9h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h	20h	21h	22h	23h	24h	SOMA
Temp. Ambiente Interno (°C)	17,7	17,0	16,7	16,5	16,4	16,3	17,0	18,0	20,1	22,1	23,6	25,2	26,6	27,3	27,5	26,9	26,2	25,4	23,9	22,7	20,9	19,6	18,5	17,5	-
Graus acima do Limite Máximo	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,2	2,6	3,3	3,5	2,9	2,2	1,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	17,1
Graus abaixo do Limite Mínimo	0,3	1,0	1,3	1,5	1,6	1,7	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	8,9	
Total de graus-hora em 1 dia																								26,0	

O consumo mensal de energia elétrica para os dez casos simulados é apresentado na Figura 2.4. Observa-se que os maiores consumos são verificados nos meses de verão, elevando-se de dezembro a março, enquanto nos meses de abril a setembro o consumo é menor. Nos Modelos 9 e 10 (linhas sobrepostas no gráfico), destaca-se a significativa redução de consumo nos meses de verão, em média 70% a menos em relação ao Caso de Referência, enquanto os demais modelos simulados apresentam consumos mais próximos do Caso de Referência. Isso se deve, principalmente, à retirada dos condicionadores de ar nesses dois modelos. Ainda nos Modelos 9 e 10, os consumos de cada mês são mais uniformes e mantêm-se mais próximos em relação à média dos consumos mensais destes modelos: 313 kWh. Esse valor de média mensal poderia ser considerado ainda um pouco elevado para uma família com hábitos conscientes e equipamentos eficientes, porém ele foi obtido com a utilização de uma série de equipamentos domésticos de alta potência. Mais detalhes podem ser encontrados no relatório de Batista et al. (2006).

Os resultados obtidos com estas simulações demonstraram que a associação de estratégias simuladas no Modelo 10, que representa a Casa Eficiente, resultou numa redução de 64% no consumo anual de energia elétrica em relação ao Caso de Referência.

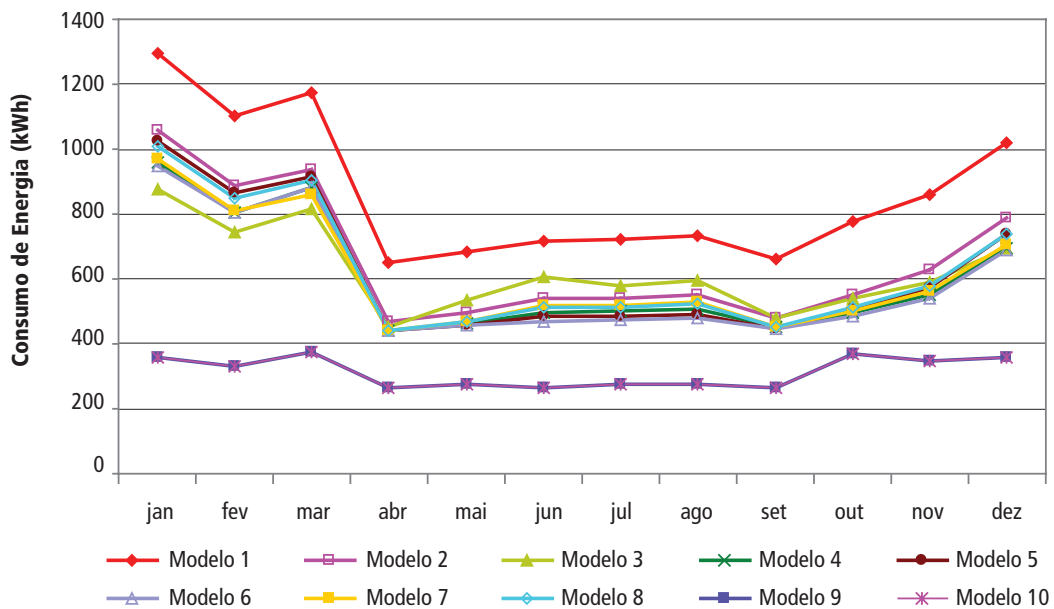


FIGURA 2.4 – Variação do consumo mensal de energia elétrica das alternativas simuladas.

Analisando os usos finais de energia, mostrados na Figura 2.5, é possível verificar uma grande redução no consumo anual relativo à iluminação artificial em todos os modelos, quando comparados ao Caso de Referência: 89%, exceto no Modelo 2, cuja redução foi de 76%. Isso se deve ao fato de no Modelo 2 terem sido adicionados equipamentos eficientes (no lugar de equipamentos ineficientes), e os Modelos 3 a 10 terem adotado padrões de uso mais eficientes (com equipamentos eficientes). No caso dos Modelos 9 e 10 existe um consumo com os insufladores de ar nos quartos, que não existe no Caso de Referência e demais alternativas. No entanto, esse consumo é compensado pela economia obtida com o condicionamento artificial (aquecimento, resfriamento e ventilação), já que nos Modelos 9 e 10 essa parcela é nula.

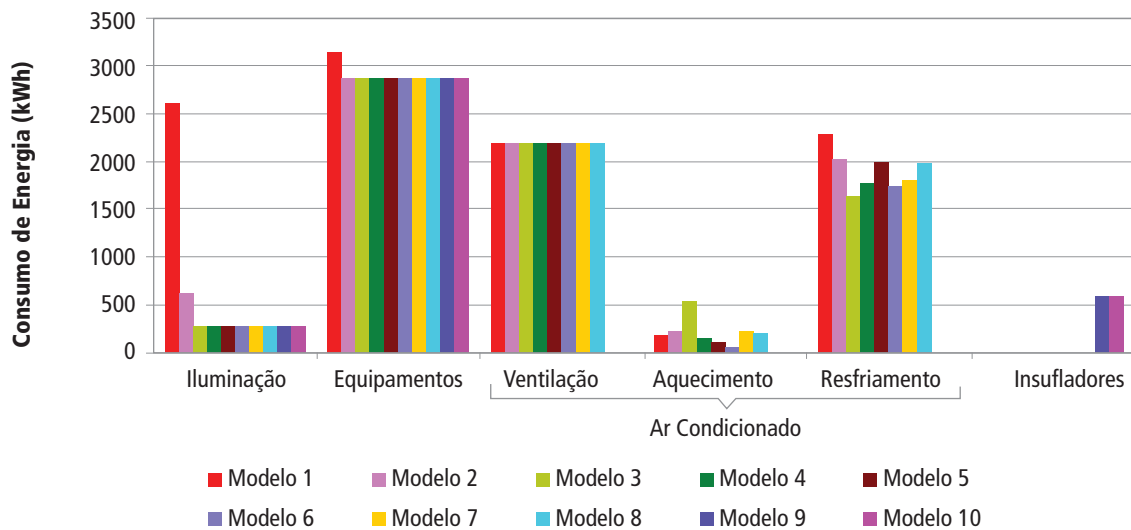


FIGURA 2.5 – Consumo anual de energia elétrica por uso final das alternativas simuladas.

Observa-se também que, a despeito das diferenças entre o Modelo 10 e o Modelo 9 quanto às configurações dos componentes construtivos, ambos apresentaram o mesmo consumo de energia. No entanto, convém destacar que o emprego das tipologias de parede, cobertura, vidros das aberturas e proteções solares simulados nos Modelos 4 a 8 se justifica não só pela redução no consumo de energia, mas também pelos benefícios ao desempenho térmico da edificação e, por conseguinte, ao conforto térmico dos usuários.

O desempenho térmico satisfatório do Modelo 10 pode ser constatado comparando-se o somatório de graus-hora obtidos em cada ambiente interno com o somatório correspondente ao ambiente externo, com base no arquivo climático para o ano de referência (TRY) de Florianópolis.

As Figuras 2.6 e 2.7 ilustram a comparação entre os somatórios de graus-hora dos ambientes internos e externos no verão e inverno, respectivamente. Observa-se que os somatórios de graus-hora dos ambientes internos foram inferiores ao somatório do ambiente externo, salientando-se que tal resultado foi alcançado com o uso de estratégias passivas de condicionamento ambiental, associadas à mudança de hábitos dos ocupantes da residência e à substituição dos equipamentos elétricos por alternativas mais eficientes. No verão foram verificadas significativas reduções no somatório de graus-hora em relação ao ambiente externo, inclusive nos ambientes de maior permanência, destacando-se o quarto de casal: 91%. Na sala de estar/jantar, a redução foi de 23%. No inverno, a simulação indicou reduções ainda maiores no somatório de graus-hora em relação ao ambiente externo: superiores a 86% em quase todos os cômodos, exceto no quarto de casal, onde o somatório de graus-hora foi 50% menor do que o valor correspondente para o ambiente externo.

Com isso, é possível concluir que a adoção de materiais com inércia e isolamento térmico no envelope do edifício resultaram em uma grande melhoria no desempenho térmico da edificação e, consequentemente, no conforto térmico dos usuários.

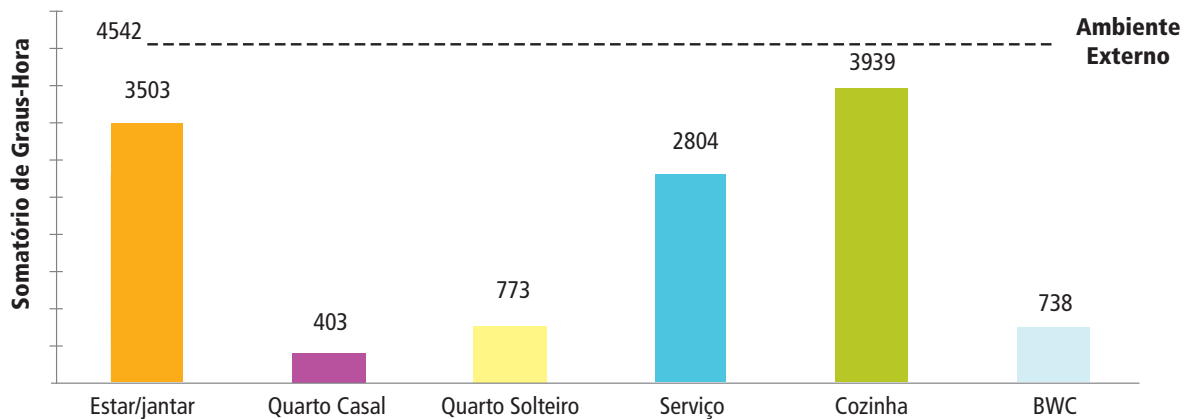


FIGURA 2.6 – Somatórios de graus-hora necessários para resfriamento no verão: Modelo 10 (Casa Eficiente).

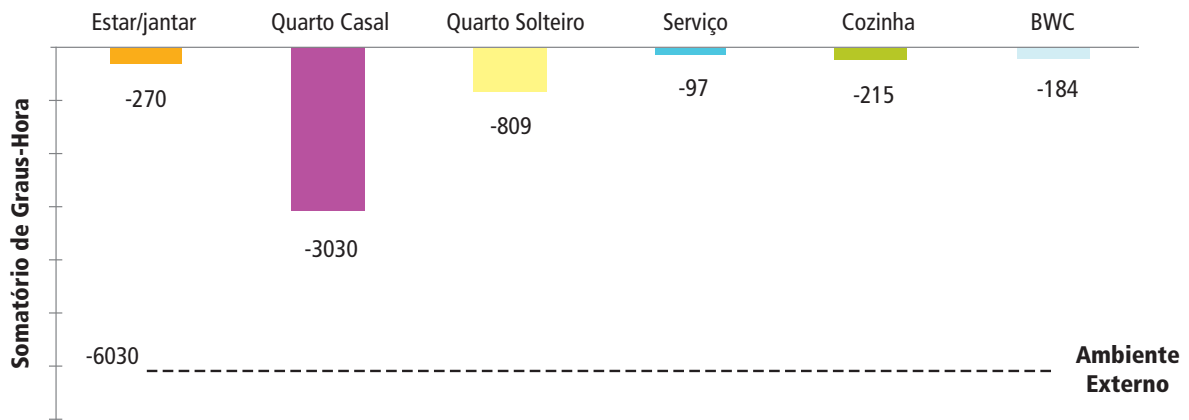


FIGURA 2.7 – Somatórios de graus-hora necessários para aquecimento no inverno: Modelo 10 (Casa Eficiente).

Mais detalhes em relação a estas simulações para projeto podem ser encontrados no relatório “Simulação Térmica e Energética da Casa Eficiente” (BATISTA et al., 2006).



3. Simulações da Casa Eficiente após sua Construção

Autores:
Cláudia Donald Pereira
Enedir Ghisi

Este capítulo apresenta as simulações computacionais realizadas após a construção da Casa Eficiente, a fim de avaliar seu desempenho térmico em diferentes situações de uso e ocupação da edificação, e em diferentes períodos do ano.

Após a construção da Casa Eficiente, foram realizadas simulações no programa computacional *EnergyPlus*, versão 2.2.0, com o objetivo de conhecer e avaliar seu desempenho termo-energético. Para estas simulações, foi criado um modelo representando ao máximo a Casa construída, definido com as mesmas dimensões, volumetria, aberturas e materiais. Ele possui algumas diferenças em relação ao modelo simulado anteriormente, pois as versões mais novas do programa *EnergyPlus* permitem um maior e mais fácil detalhamento da volumetria, materiais e da ventilação natural.

3.1. Calibração do Modelo Computacional da Casa Eficiente

Para garantir que os resultados obtidos por simulação representassem com proximidade o real comportamento da Casa Eficiente, foram realizadas calibrações do modelo computacional. Westphal e Lamberts (2005) consideram que, para que o programa computacional apresente resultados confiáveis, é essencial que o modelo de simulação seja corretamente calibrado.

Para esta calibração, optou-se por fazer a comparação de dados de medições na Casa com dados obtidos por simulação. Foram definidas duas semanas de monitoramento da temperatura do ar no interior de alguns ambientes da Casa, em dois diferentes meses: dezembro de 2007 e janeiro de 2008. Nesses períodos, as condições de ocupação e manipulação das aberturas foram controladas. Em dezembro de 2007 a Casa permaneceu sem ventilação (janelas e portas externas fechadas) e sem ocupação. Em janeiro de 2008 a Casa foi ocupada e ventilada. Os ambientes utilizados para a calibração foram a sala, o quarto de casal e o banheiro. Em cada um deles foi instalado um Hobo, aproximadamente no centro do cômodo.

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 3.1. Para medição de temperatura, sua resolução é de 0,03°C, com precisão de $\pm 0,35^\circ\text{C}$.



FIGURA 3.1 – Hobos U12 *data logger*.

Para as simulações de calibração foi utilizado um arquivo climático com dados da cidade de Florianópolis medidos na estação meteorológica do Laboratório de Engenharia de Processos de Conversão e Tecnologia de Energia (LEPTEN) do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC. Essa estação está localizada a aproximadamente 550 metros da edificação estudada, e registra dados de temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade e direção do vento, pressão atmosférica e radiação solar global, direta e difusa. A estação meteorológica da Casa Eficiente não foi utilizada, pois ainda estava em fase de testes durante os meses de dezembro de 2007 e janeiro de 2008. Os dados das variáveis ambientais externas foram obtidos nesses dois meses definidos para monitoramento da edificação e, para estas análises de calibração, foram utilizados dados de duas semanas, sendo cada semana em um mês.

3.1.1. Modelo Inicial

Para a simulação de edificações no *EnergyPlus*, é necessária a definição de zonas térmicas do modelo. Assim, a Casa Eficiente foi modelada com nove zonas térmicas, cada uma representando os seguintes ambientes: área de serviços, cozinha, banheiro, salas, corredor, quarto de casal, quarto de solteiro, área das caixas d'água, área do reservatório de água quente (*boiler*). A Figura 3.2 mostra duas perspectivas desse modelo e a Figura 3.3 mostra suas plantas.

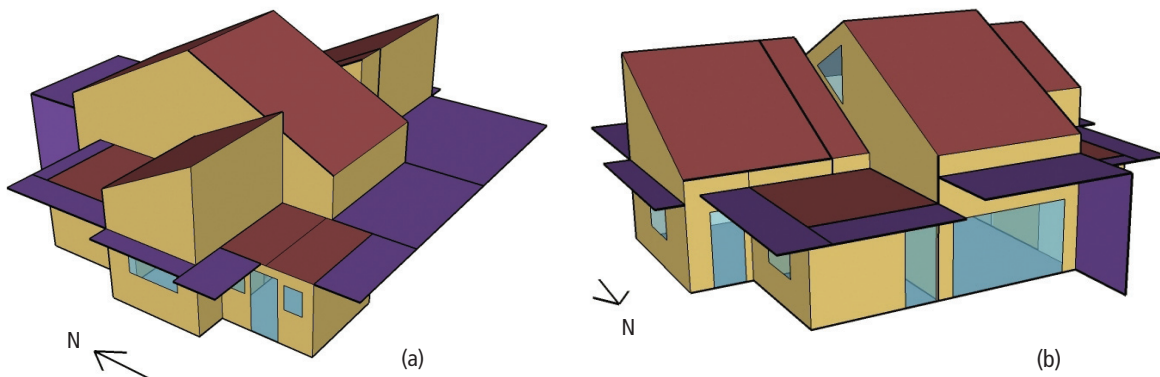
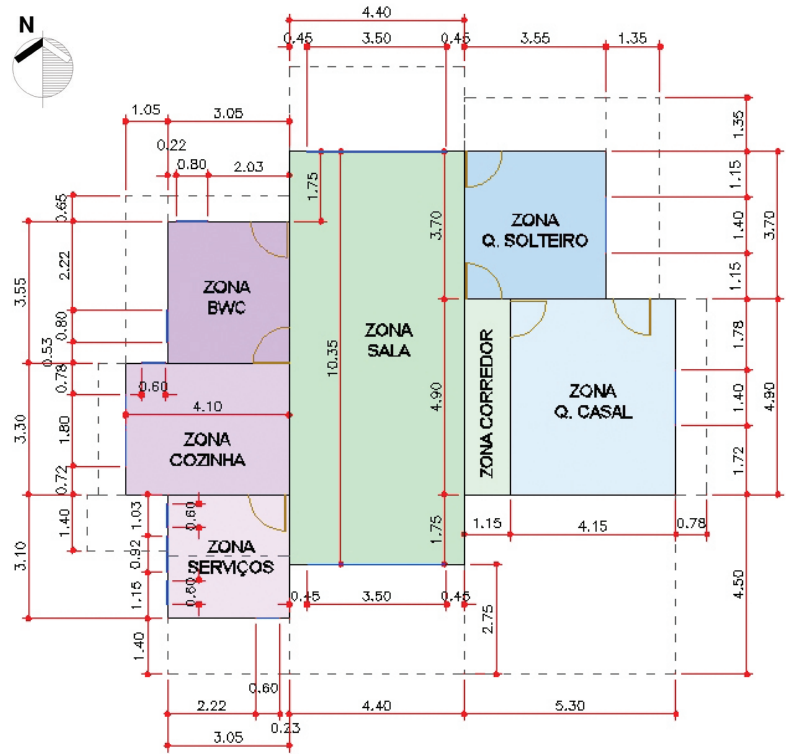
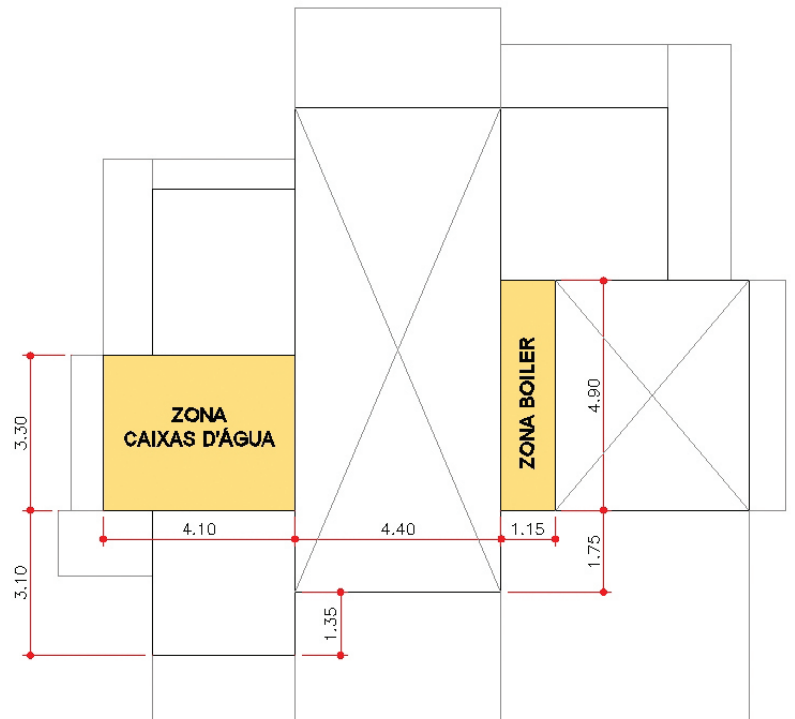


FIGURA 3.2 – Perspectivas do modelo de simulação da Casa Eficiente: (a) vista Sudoeste e (b) vista Nordeste

As aberturas (portas e janelas) foram modeladas conforme o existente na Casa, com as persianas externas. Também foram incluídas no modelo as proteções solares existentes nas diversas fachadas da residência. Para os dados de temperatura do solo, foram utilizados valores de médias mensais de temperatura medidos no solo abaixo da Casa Eficiente.



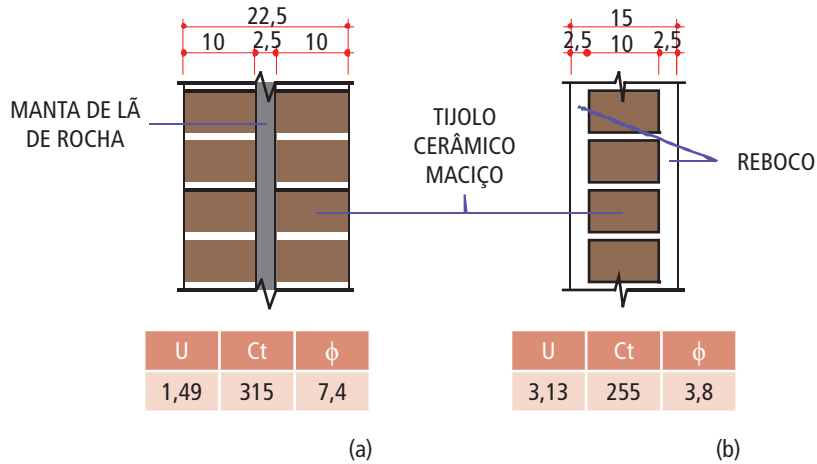
(a)



(b)

FIGURA 3.3 – Plantas baixas do modelo de simulação da Casa Eficiente: pavimento térreo (a) e pavimento superior (b).

Quanto aos materiais, utilizaram-se, também, os mesmos da Casa Eficiente. Foram definidos dois tipos de paredes: duplas e simples. As paredes duplas possuem três camadas: tijolo, manta de lã de rocha e tijolo. A parede simples ocorre no caso de apenas uma parede interna do modelo, e possui três camadas: reboco, tijolo e reboco. Esquemas desses dois tipos de parede são mostrados na Figura 3.4.



NOTA: U = Transmitância térmica ($W/m^2.K$); Ct = Capacidade térmica ($kJ/m^2.K$); φ = Atraso térmico (horas).

FIGURA 3.4 – Esquemas das paredes: (a) dupla e (b) simples.

Transmitância térmica (U) é uma propriedade dos componentes construtivos relacionada à permissão da passagem de energia, medida em $W/m^2.K$. 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.

Capacidade térmica (Ct) 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.

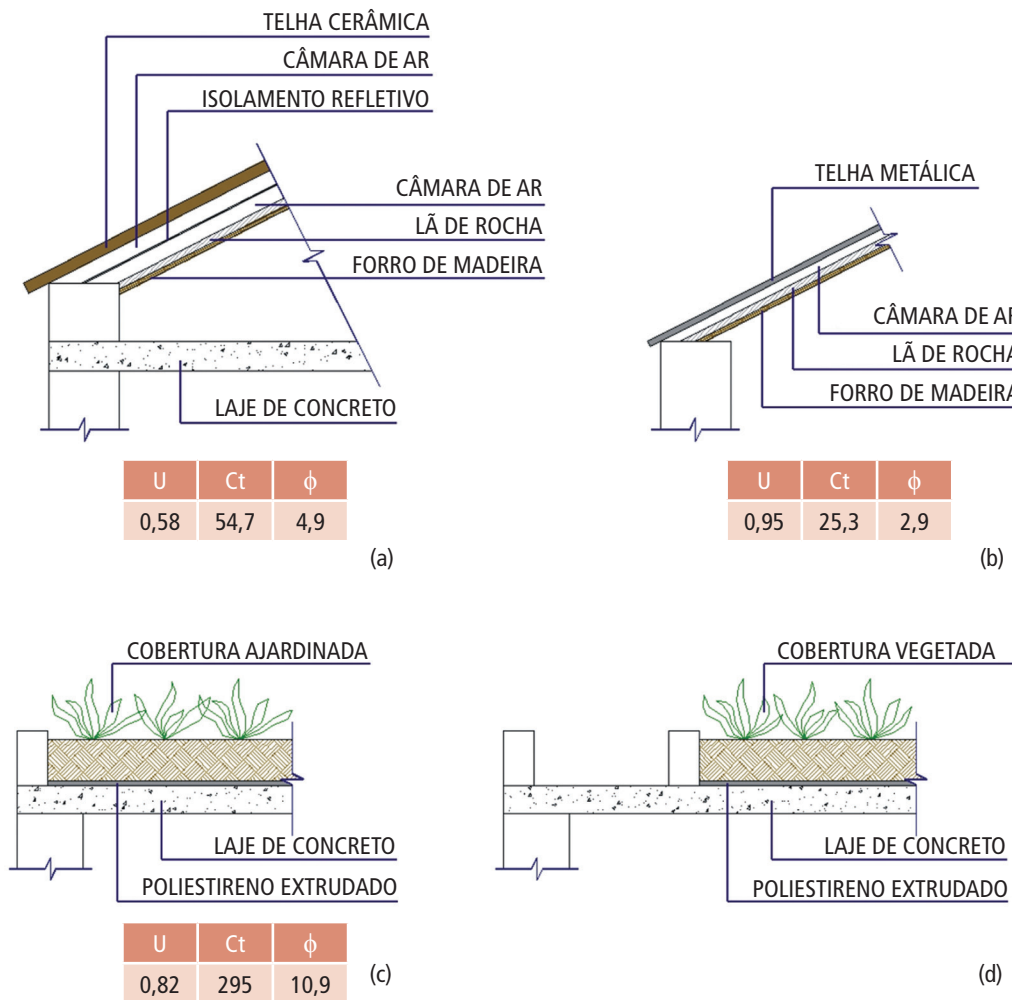
Atraso térmico (φ) indica o tempo transcorrido entre uma variação térmica em um meio, e sua manifestação na superfície oposta de um componente construtivo. Por exemplo: o tempo transcorrido entre o pico de temperatura máxima do ar externo e a temperatura máxima do ar em um ambiente interno.

O piso de toda a Casa foi modelado com uma camada de concreto, com 10cm de espessura. Diferentes tipos de cobertura foram criados para o modelo, conforme o existente na residência estudada. As zonas térmicas foram simuladas com as opções de coberturas descritas a seguir. Um esquema de cada uma delas é mostrado na Figura 3.5.

- ⚡ Cozinha e corredor: por possuírem outras zonas acima delas (área das caixas d'água, área do boiler), sua cobertura é apenas uma laje horizontal de concreto.
- ⚡ Quarto de casal, área das caixas d'água (em cima da cozinha) e área do boiler (em cima do corredor): sua cobertura possui seis camadas, sendo elas de telha cerâmica, câmara de ar, isolamento refletivo (polietileno aluminizado), câmara de ar, manta de lã de rocha e forro de madeira.

- ⚡ Salas: sua cobertura possui quatro camadas, sendo elas de telha metálica com pintura branca nas duas faces, câmara de ar, manta de lã de rocha e forro de madeira. Além disso, metade da área da cobertura da sala (a parte mais ao Norte) possui mais duas camadas acima da telha: outra câmara de ar e uma camada de vidro opaco representando o painel fotovoltaico.
- ⚡ Banheiro e quarto de solteiro: sua cobertura possui três camadas, sendo uma cobertura vegetada sobre uma laje horizontal, com isolamento térmico de poliestireno extrudado entre elas.
- ⚡ Área de serviços: essa zona possui dois tipos de cobertura, porque esse cômodo apresenta uma cobertura com laje horizontal, apenas parcialmente coberta por vegetação. Assim, para a simulação, sua cobertura foi modelada uma parte apenas com uma camada de laje de concreto, e outra parte com três camadas: laje de concreto, isolamento térmico e cobertura vegetada.

As janelas e portas externas possuem duas camadas de vidro incolor de 3,0mm de espessura, com uma camada de ar no interior, de espessura 12mm. Apenas a porta externa do banheiro não é de vidro, e sim de PVC. As demais portas da Casa (portas internas) são de madeira com pintura branca.



NOTA: U = Transmitância térmica (W/m².K); Ct = Capacidade térmica (kJ/m².K); ϕ = Atraso térmico (horas).

FIGURA 3.5 – Esquemas das coberturas: (a) com telha cerâmica, (b) com telha metálica, (c) cobertura vegetada, (d) cobertura vegetada + laje concreto.

As propriedades térmicas da maior parte dos materiais usados, tais como condutividade térmica, densidade, calor específico, absorvância para radiação solar e resistência térmica, foram obtidas na norma NBR 15220 (ABNT, 2005a; 2005b). Apenas as características utilizadas para a parede de tijolos cerâmicos maciços foram obtidas em Ordenes et al. (2003), de forma que fosse considerada a influência da argamassa de assentamento, adotando valores para um material equivalente. Esses dados são apresentados na Tabela 3.1.

Os ganhos internos de calor foram incluídos na simulação, conforme o uso ocorrido na edificação durante os dias de monitoramento, nos dois períodos determinados (em dezembro de 2007 e janeiro de 2008). Tendo em vista que, nesses períodos, a edificação foi ocupada apenas durante o dia, seus usuários aproveitaram ao máximo a iluminação natural, com o mínimo uso de lâmpadas. Por isso, no modelo de calibração não foram incluídos ganhos de calor pela iluminação.

Quanto aos equipamentos elétricos, dois aparelhos foram considerados: uma geladeira e um computador. A geladeira permaneceu ligada 24 horas por dia, todos os dias, na zona da cozinha. O computador também permaneceu ligado 24 horas por dia, todos os dias, na zona do quarto de casal. Para a geladeira considerou-se uma potência média de 50W, e para o computador de 130W. Esses valores foram obtidos a partir de medições de consumo desses eletrodomésticos da Casa, utilizando um medidor portátil de consumo, marca *Yokogawa*. O valor adotado para a fração radiante de ganho de calor foi 0,5 para os dois equipamentos, que é o valor comumente utilizado por grande parte dos pesquisadores, tendo em vista que a divisão entre as parcelas radiante e convectiva (de ganho de calor) para grande parte dos equipamentos é geralmente uniforme (ASHRAE, 2005b).

TABELA 3.1 – Características dos materiais utilizados na simulação computacional.

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

A ocupação dos usuários não foi constante durante o monitoramento. No período de dezembro/2007 a Casa permaneceu sem usuários. Em todos os fins de semana a Casa também permaneceu sem usuários. Para o mês de janeiro/2008, foram criados padrões de ocupação definindo a quantidade de usuários em cada zona do modelo, para cada um dos dias monitorados.

Foram também definidas as atividades realizadas em cada zona, resultando em diferentes produções de calor. Esses dados, apresentados na Tabela 3.2, foram baseados nos valores de taxa metabólica (W/m^2) da ASHRAE (2005a), considerando uma área de pele média de $1,80m^2$. Nas simulações, o valor do calor produzido (W) é multiplicado pela quantidade de pessoas na zona térmica.

TABELA 3.2 – Atividades realizadas e calor produzido nas zonas térmicas do modelo.

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

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

No mês de dezembro, todas as janelas e portas externas permaneceram fechadas. No mês de janeiro, a abertura das janelas e portas externas, nos dias úteis, aconteceu entre 9 e 12 horas e entre 14 e 17 horas. Nos fins de semana (sábado e domingo) elas permaneceram sempre fechadas. As portas externas do banheiro, do quarto de casal e do quarto de solteiro, e a janela da parede Norte da cozinha, permaneceram sempre fechadas.

A infiltração de ar é definida no *AirflowNetwork* por um parâmetro chamado *Air Mass Flow Coefficient When Opening is Closed* (coeficiente de fluxo de massa de ar quando as aberturas estão fechadas), dado em $kg/s.m$ (para 1 Pa por metro de fresta). O valor utilizado nesse parâmetro foi $0,001 kg/s.m$, o mesmo adotado nos exemplos de simulação do programa *EnergyPlus*.

Com relação às trocas de ar, quando as janelas e portas são abertas, uma das definições no *AirflowNetwork* é feita pelo item *Discharge Coefficient* (coeficiente de descarga). O valor utilizado nesse parâmetro foi 0,6 para janelas e portas, tendo em vista que, segundo Flourentzou et al. (1998), é indicado um valor de 0,6 (com precisão de $\pm 0,1$) para o coeficiente de descarga para aberturas retangulares (janelas e portas). Outro fator importante para definição da ventilação natural são os coeficientes de pressão (*Wind Pressure Coefficient*), definidos para cada abertura da edificação, para diferentes direções do vento. Estes são dados de difícil obtenção, que dependem da volumetria do edifício, do seu entorno e de qualquer tipo de obstáculo à passagem do vento. Para estas simulações, o coeficiente de pressão foi obtido com auxílio do programa *Cp Generator*, desenvolvido no *TNO Building Research* (TNO, 2008). Além disso, deve-se definir um valor de expoente para a velocidade do vento tendo em vista a rugosidade do entorno (*Exponent of Wind velocity Profile*), que pode variar de 0 a 0,5. O valor adotado para esse expoente foi 0,32.

Foram também modeladas as persianas existentes em algumas janelas e portas externas. Elas foram inseridas no programa *EnergyPlus* como do tipo *Shade*, sendo o material de PVC branco, conforme o esquema da Figura 3.6. O padrão de aberturas dessas persianas também foi definido em função do comportamento verificado durante os períodos de monitoramento da edificação real. No período de dezembro todas as persianas permaneceram fechadas 24 horas, todos os dias. No monitoramento de janeiro sua abertura se deu entre 8 e 12 horas e entre 14 e 17 horas. Nos fins de semana (sábado e domingo) elas permaneceram sempre fechadas. As persianas das portas externas do quarto de casal e do quarto de solteiro, e da janela da parede Norte da cozinha permaneceram sempre fechadas.

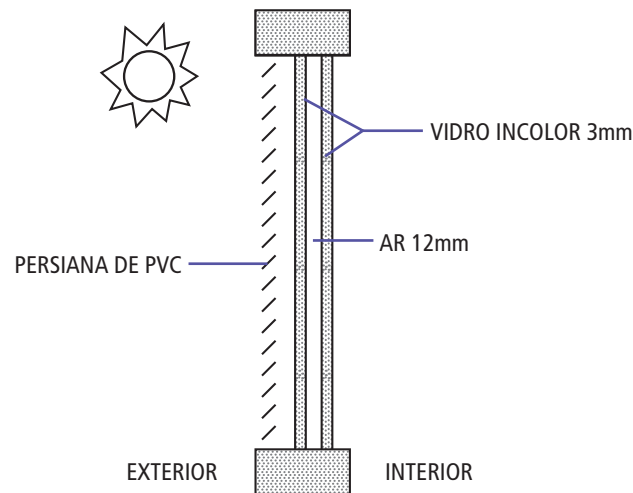


FIGURA 3.6 – Esquema das Persianas.

Para comparação dos resultados dessa simulação com os valores medidos na edificação real, foi requerida, como dado de saída do modelo, a temperatura média do ar no interior da edificação, sendo utilizados os valores das zonas da sala, banheiro e quarto de casal. Para cada um dos dois períodos definidos, foram escolhidos três dias mais significativos para as análises. Esses dias foram escolhidos por estarem em uma sequência de dias com comportamento semelhante, proporcionando uma estabilidade no comportamento térmico da Casa. Os dados obtidos por medição e simulação foram comparados e verificada a diferença média, calculada como a média das diferenças de temperatura do ar simulada e medida, conforme a Equação 3.1.

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

Onde:

- :: Dm é a diferença média [°C];
- :: yi é a temperatura horária obtida por simulação [°C];
- :: xi é a temperatura horária medida na edificação [°C];
- :: N é o número de observações.

3.1.2. Ajustes do Modelo

Após a primeira simulação do modelo inicial de calibração, foram realizadas outras simulações modificando alguns parâmetros do modelo e comparando seus resultados com as medições efetuadas previamente na Casa. A cada simulação um novo parâmetro foi alterado, sendo que, quando o resultado obtido era satisfatório (mais parecido com as medições), a alteração era mantida nas simulações seguintes.

Os primeiros parâmetros alterados foram comparados com as medições realizadas no mês de dezembro de 2007, quando a Casa foi monitorada sem ocupação e sem ventilação (janelas e portas fechadas). São eles:

- ⚡ Resistência térmica dos componentes do envelope: as propriedades térmicas dos componentes construtivos utilizados no modelo inicial, obtidas da norma NBR 15220, são apontadas pela própria norma como sendo apenas indicativas, porque podem variar em função da matéria-prima e da forma de fabricação. Para verificar a influência de diferenças nos valores da resistência térmica dos materiais, foram realizadas simulações alterando a resistência térmica de todos os componentes construtivos em -10%, +10% e +20%.
- ⚡ Absortância dos materiais do envelope: no modelo inicial, a absortância dos materiais foram definidas pela observação das cores na edificação estudada e adotando valores de norma. Porém, esta observação simples não define tais valores com precisão, mesmo porque a sujeira pode provocar alterações nessa propriedade. Assim, para confirmar o valor da absortância dos materiais utilizados no envelope da Casa estudada, foram realizadas medições no local utilizando um espectrofotômetro. Com os valores medidos, a absortância pôde ser calculada utilizando-se planilhas eletrônicas. Os valores obtidos e utilizados nessa simulação estão indicados na Tabela 3.3.

TABELA 3.3 – Valor corrigido de absortância dos materiais.

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

- ⚡ Ganho interno de calor por equipamentos: para a simulação inicial adotou-se o valor 0,5 para a fração radiante de ganho de calor pelos equipamentos, resultando, conseqüentemente, em 0,5 para a fração convectiva. Porém, apesar de a divisão entre as parcelas radiante e convectiva (de ganho de calor) para grande parte dos equipamentos ser geralmente uniforme, há uma importante diferença no caso de equipamentos que possuem ventilador para resfriamento, como no caso de computadores. Sendo assim, foi realizada uma simulação adotando, para a fração radiante de ganho de calor, o valor 0,20 para o computador (com monitor) e o valor 0,35 para a geladeira, baseando-se em informações apresentadas pela ASHRAE (2005b).
- ⚡ Infiltração de ar: o valor utilizado inicialmente no parâmetro ***Air Mass Flow Coefficient When Opening is Closed*** foi 0,001 kg/s.m. Nessa alteração, adotou-se o valor 0,0001 kg/s.m para as janelas e portas de correr, e de 0,0005 kg/s.m para as janelas máximo-ar, conforme pode ser obtido a partir de Liddament (1986).

Após estas primeiras análises, foram realizadas outras alterações, utilizando-se os dados da medição do mês de janeiro de 2007 para comparações. Foram alterados os parâmetros relacionados à ventilação natural descritos a seguir. Pela dificuldade de obtenção dos valores de coeficiente de pressão, eles não foram variados nos ajustes do modelo.

- :: Coeficiente de descarga: o valor utilizado como coeficiente de descarga nas simulações iniciais foi 0,6 para janelas e portas. Porém, como Flourentzou et al. (1998) indicam o valor de 0,6 com precisão de $\pm 0,1$, foram realizadas simulações alterando o coeficiente de descarga para 0,7 e para 0,5, a fim de analisar a influência de alterações nesse parâmetro.
- :: Expoente da velocidade do vento: o valor de 0,32, inicialmente adotado para esse expoente, foi alterado para 0,5, que é o limite máximo aceito pelo programa. Esse valor significaria um entorno com alta rugosidade, ou seja, muitas obstruções.

3.1.3. Resultados e Modelo Final

Os resultados descritos a seguir dizem respeito à comparação dos valores de temperatura média do ar obtidos por simulação e por medição na Casa Eficiente. Os ambientes utilizados foram sala, banheiro e quarto de casal. A Tabela 3.4 resume as simulações realizadas para calibração do modelo.

TABELA 3.4 – Resumo das simulações para calibração do modelo.

Modelo	Descrição/Alteração	Mês analisado
1 (inicial)	Modelo inicial	Dezembro/2007
2	Modelo inicial + Resistência térmica - 10%	Dezembro/2007
3	Modelo inicial + Resistência térmica + 10%	Dezembro/2007
4	Modelo inicial + Resistência térmica + 20%	Dezembro/2007
5	Modelo inicial + Absortância	Dezembro/2007
6	Modelo 5 + Ganho por equipamento	Dezembro/2007
7	Modelo 6 + Infiltração de ar	Dezembro/2007 e Janeiro/2008
8	Modelo 7 + Coeficiente de descarga = 0,7	Janeiro/2008
9	Modelo 7 + Coeficiente de descarga = 0,5	Janeiro/2008
10 (final)	Modelo 7 + Expoente da velocidade do vento = 0,5	Janeiro/2008

Todos os gráficos apresentados são referentes a três dias, compreendidos entre o período total de monitoramento da edificação, em cada mês. Os gráficos mostram os valores de temperatura média do ar medidos e simulados. Os dados obtidos por medição e simulação foram comparados e verificada a diferença média entre os valores.

As primeiras simulações foram comparadas com a medição realizada em dezembro de 2007, quando a Casa foi monitorada com janelas e portas externas fechadas, ou seja, sem ventilação. No primeiro caso simulado, utilizando-se o modelo inicial descrito no item 3.1.1, obteve-se os resultados mostrados na Figura 3.7, para três dias, nos três ambientes monitorados. Verifica-se que os comportamentos das curvas de temperatura são semelhantes, porém os simulados estão sempre um pouco abaixo dos medidos, sendo

a diferença média de 1,4°C na sala, 1,7°C no quarto e 1,1°C no banheiro, conforme indicado na Tabela 3.5. Com relação à amplitude da variação de temperatura no período, pode-se observar que na medição as amplitudes são de 2,1°C na sala, 2,6°C no quarto de casal e 1,7°C no banheiro. Já na simulação, a sala apresenta amplitude de 2,5°C, o quarto de 1,9°C e no banheiro a amplitude é de 2,3°C.

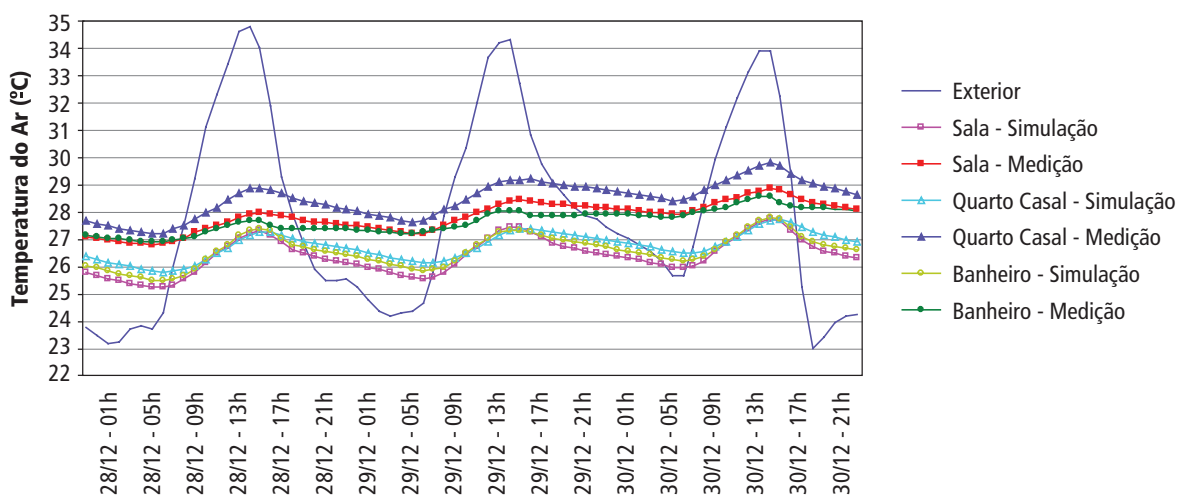


FIGURA 3.7 – Comparação entre temperaturas medidas e simuladas – modelo inicial – mês de dezembro/2007.

TABELA 3.5 – Resultados das simulações comparadas às medições de dezembro/2007.

Nº	SIMULAÇÃO Descrição	DIFERENÇA (°C)									AMPLITUDE (°C)			Alterações adotadas	
		MÍNIMA			MÁXIMA			MÉDIA			S	Q	B		
		S	Q	B	S	Q	B	S	Q	B					
-	Medição	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,1	2,6	1,7	-
1	Modelo inicial	0,7	1,3	0,2	2,0	2,2	1,7	1,4	1,7	1,1	2,5	1,9	2,3	-	
2	Simulação 1 + diminuição de 10% na resistência térmica	0,6	1,3	0,1	2,0	2,2	1,7	1,4	1,7	1,0	2,6	2,0	2,4	Não	
3	Simulação 1 + aumento de 10% na resistência térmica	0,7	1,3	0,2	2,0	2,2	1,7	1,4	1,7	1,1	2,4	1,8	2,2	Não	
4	Simulação 1 + aumento de 20% na resistência térmica	0,8	1,3	0,2	2,0	2,3	1,7	1,5	1,7	1,1	2,3	1,7	2,2	Não	
5	Simulação 1 + alteração nas absortâncias	0,3	1,1	0,0	1,8	2,1	1,6	1,2	1,5	0,9	2,7	2,0	2,4	Sim	
6	Simulação 4 + aumento do ganho de calor por equipamentos	0,3	1,0	0,0	1,8	1,9	1,5	1,2	1,4	0,9	2,7	2,0	2,3	Sim	
7	Simulação 5 + alteração na infiltração de ar	0,5	0,9	0,2	1,8	1,9	1,5	1,2	1,4	0,9	2,5	1,9	2,1	Sim	

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

As três simulações seguintes foram realizadas alterando a resistência térmica dos componentes construtivos da Casa em menos 10%, mais 10% e mais 20%. Como mostrado na Tabela 3.5, as diferenças em relação ao

modelo inicial foram mínimas. No modelo com resistência +10% não houve alterações nos valores de diferença média. No modelo com resistência -10% apenas a diferença média no banheiro teve uma pequena alteração, para 1,0°C, e no modelo com resistência +20% apenas a sala teve uma pequena alteração: a diferença média foi de 1,5°C. Analisando as amplitudes de temperatura, na simulação com resistência +10% a sala apresentou amplitude de 2,4°C, o quarto de 1,8°C e o banheiro de 2,2°C. Na simulação com resistência +20%, as amplitudes ficaram um pouco menores, sendo de 2,3°C na sala, 1,7°C no quarto e 2,2°C no banheiro. Isso significa que nesses dois casos todas as amplitudes diminuíram um pouco em relação ao modelo inicial, porém não a ponto de alcançar os valores medidos. Esses resultados indicaram que tais alterações na resistência dos materiais não contribuíram significativamente na aproximação do modelo com as medições. Sendo assim, as demais simulações foram realizadas mantendo-se os valores de resistência originais, do modelo inicial.

A quinta simulação teve alterados os valores de absorvância dos materiais do envelope da edificação. Pelos resultados na Tabela 3.5, verifica-se que a diferença média foi de 1,2°C na sala, 1,5°C no quarto e 0,9°C no banheiro. Ou seja, as diferenças de temperatura foram menores na média. Esses dados de absorvância foram mantidos nas simulações seguintes, pois, além de terem colaborado para uma pequena diminuição nas diferenças médias, são mais representativos do existente na Casa.

A sexta simulação foi realizada alterando a fração radiante de ganho de calor pelos equipamentos. Analisando os resultados (Tabela 3.5) vê-se que a diferença média foi de 1,2°C na sala, 1,4°C no quarto de casal e 0,9°C no banheiro. Isso significa que apenas no quarto houve uma alteração de valor em relação à simulação anterior, porque ele é o único dos três cômodos analisados que possui equipamento (um computador). Com relação às amplitudes das temperaturas, elas também quase não sofreram alterações, sendo de 2,7°C na sala, 2,0°C no quarto e 2,3°C no banheiro. Essa alteração é pouco significativa neste modelo porque ele possui uma quantidade pequena de equipamentos: apenas dois. Ainda assim, a alteração foi mantida para as simulações seguintes por provocar uma pequena melhoria nos resultados do quarto de casal.

No sétimo caso simulado, o modelo sofreu alterações no parâmetro de definição da infiltração de ar. Com os resultados, mostrados na Figura 3.8, verifica-se que não houve mudanças significativas nas diferenças médias. Ocorreram algumas leves diminuições nas amplitudes de temperatura dos ambientes, que passaram a 2,5°C na sala, 1,9°C no quarto e 2,1°C no banheiro. Esses valores da infiltração foram mantidos nas simulações seguintes.

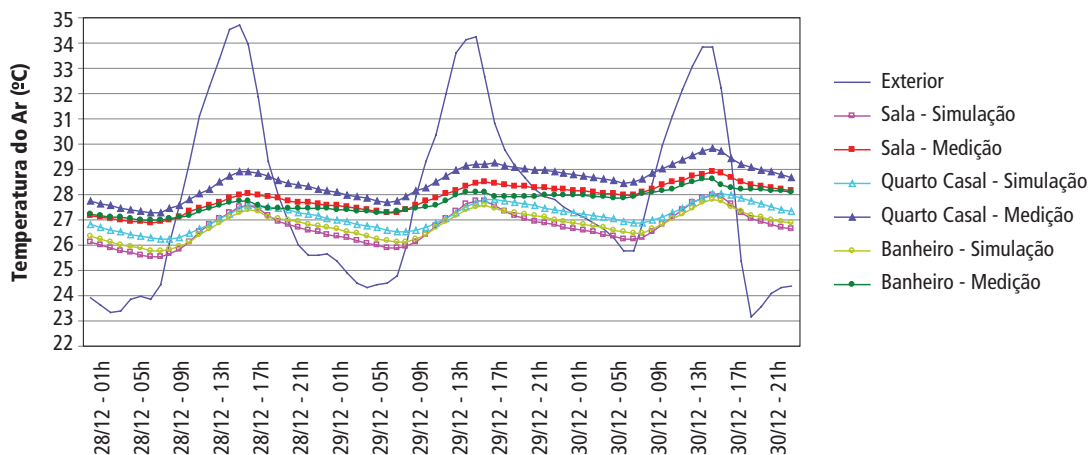


FIGURA 3.8 – Comparação entre temperaturas medidas e simuladas – modelo com alteração na infiltração de ar – mês de dezembro/2007.

As últimas simulações foram comparadas com a medição realizada em janeiro de 2008, quando a Casa foi monitorada com ocupação e abertura de janelas e portas. A Figura 3.9 mostra os resultados para a simulação do sétimo caso (com alteração na infiltração de ar) quando comparado com as medições em três dias de janeiro, ou seja, com ventilação natural. Verifica-se que a influência da ventilação na temperatura interna dos ambientes é mais significativa na simulação do que a que ocorreu de fato no monitoramento, principalmente na sala e banheiro. Nos horários da noite, quando as janelas estavam fechadas, os resultados da simulação são semelhantes aos medidos. Porém, nos horários diurnos, quando as janelas estavam abertas, os resultados da simulação apresentaram picos mais elevados que os das medições. A Tabela 3.6 mostra que essas diferenças chegam ao máximo de 2,0°C na sala, 1,9°C no quarto e 2,2°C no banheiro. Apesar disso, as diferenças médias podem ser consideradas pequenas: 0,2°C na sala, 0,4°C no quarto e 0,6°C no banheiro. Analisando as amplitudes de temperatura no período, verifica-se que nas medições obteve-se amplitude de 3,0°C na sala, 2,8°C no quarto de casal e 2,5°C no banheiro. Já nas simulações, as amplitudes obtidas foram maiores: 4,8°C na sala, 3,3°C no quarto e 4,3°C no banheiro.

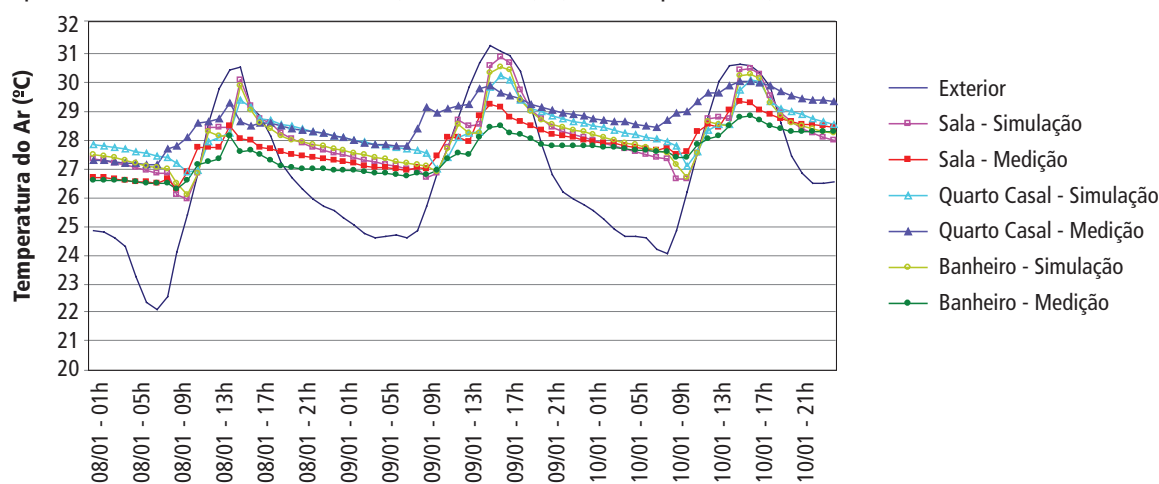


FIGURA 3.9 – Comparação entre temperaturas medidas e simuladas – modelo com alteração na infiltração de ar – mês de janeiro/2008.

TABELA 3.6 – Resultados das simulações comparadas às medições de janeiro/2008.

N°	SIMULAÇÃO Descrição	DIFERENÇA (°C)									AMPLITUDE (°C)			Alterações adotadas
		MÍNIMA			MÁXIMA			MÉDIA			S	Q	B	
		S	Q	B	S	Q	B	S	Q	B				
-	Medição	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3,0	2,8	2,5	-
7	Simulação 6 + alteração na infiltração de ar	1,0	0,7	0,7	2,0	1,9	2,2	0,2	0,4	0,6	4,8	3,3	4,3	Sim
8	Simulação 7 + coeficiente de descarga = 0,7	1,0	0,8	0,8	2,1	2,0	2,3	0,3	0,4	0,6	4,9	3,4	4,5	Não
9	Simulação 7 + coeficiente de descarga = 0,5	0,9	0,6	0,6	2,0	1,9	2,1	0,2	0,4	0,6	4,7	3,0	4,2	Não
10	Simulação 7 + expoente da velocidade do vento = 0,5	0,8	0,5	0,4	1,7	1,6	1,8	0,2	0,4	0,5	4,3	2,6	3,6	Sim

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

Para verificar a influência do coeficiente de descarga na simulação da ventilação, foram realizadas simulações alterando seu o valor para 0,7 e para 0,5. Com os resultados da Tabela 3.6, percebe-se que esta alteração provocou um pequeno aumento nas amplitudes de temperatura obtidos na simulação, tornando os resultados mais diferentes em relação aos medidos. Já nos resultados da simulação com coeficiente de descarga igual a 0,5, verifica-se uma pequena diminuição nas amplitudes de temperatura, porém não há alterações nas diferenças médias. As amplitudes de temperatura desta simulação ficaram em 4,7°C na sala, 3,0°C no quarto e 4,2°C no banheiro. Os resultados ficaram mais próximos às medições, mas ainda com diferenças máximas de 2,0°C na sala, 1,9°C no quarto e 2,1°C no banheiro, sempre nos momentos mais quentes do dia, com ventilação. Estas alterações não foram mantidas.

Essas diferenças podem ser provocadas por imprecisão nos valores de coeficiente de pressão. Porém, como este é um parâmetro complexo, com a inclusão de uma série de valores, para cada abertura e para diferentes ângulos de vento, seria difícil definir uma variação para ele. Assim, para tentar minimizar as diferenças nos resultados, optou-se por modificar o expoente da velocidade do vento, relacionado à rugosidade do entorno. Os resultados desta última simulação são mostrados na Figura 3.10. Tais resultados se mostram um pouco mais próximos às medições, com erros máximos de 1,7°C na sala, 1,6°C no quarto e 1,8°C no banheiro. Os erros médios foram de 0,2°C na sala, 0,4°C no quarto e 0,5°C no banheiro. As amplitudes de temperatura na simulação foram de 4,3°C na sala, 2,6°C no quarto e 3,6°C no banheiro.

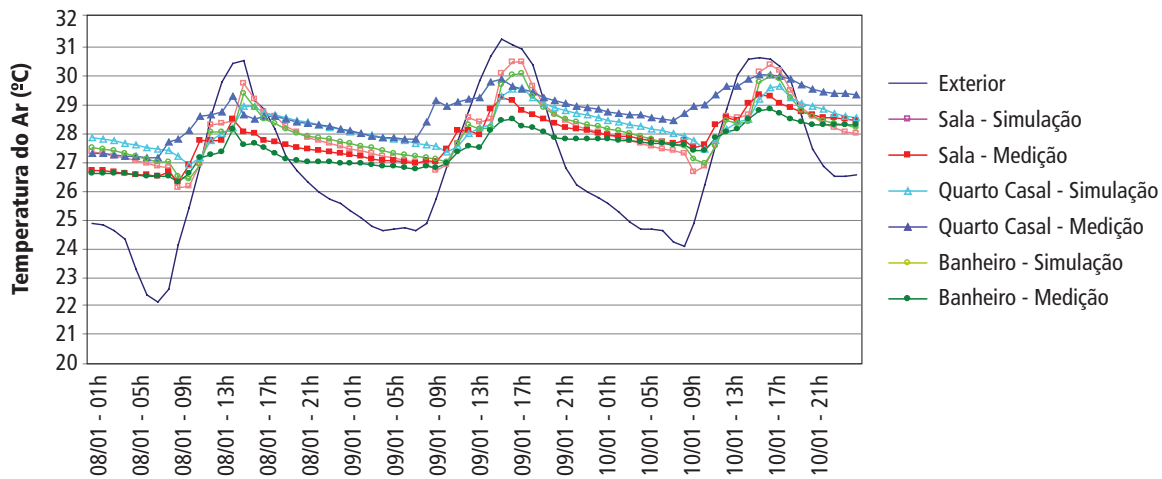


FIGURA 3.10 – Comparação entre temperaturas medidas e simuladas – modelo com alteração no expoente da velocidade do vento para 0,5 – mês de janeiro/2008.

Apesar de algumas diferenças que se mantiveram, esse modelo final foi considerado adequado para as simulações seguintes, de análises de desempenho térmico da Casa Eficiente.

3.2. Análises do Desempenho Térmico da Casa Eficiente

Uma edificação pode ser considerada com bom desempenho térmico, na medida em que apresenta características físicas e construtivas (volumetria, materiais, aberturas) que permitem a manutenção de condições de conforto para seus usuários, com a mínima necessidade de equipamentos mecânicos para isso (condicionadores de ar, ventiladores).

Conforto térmico é definido pela ANSI/ASHRAE (2004) como um estado de espírito do usuário, que expressa sua satisfação com o ambiente térmico onde está inserido. Esse conforto depende de algumas características do próprio usuário, como taxa metabólica e vestimenta, mas também de características do ambiente: temperatura do ar, temperatura radiante, velocidade do ar e umidade do ar.

O programa computacional *EnergyPlus*, versão 2.2.0, foi utilizado para a realização de simulações do modelo representativo da Casa Eficiente, para análises de seu desempenho térmico, conforme se descreve a seguir.

3.2.1. A Utilização da Ventilação Diurna e Noturna para o Conforto no Verão

Uma questão essencial para o bom desempenho térmico de edificações como a Casa Eficiente é o controle das aberturas para ventilação. O vento pode tanto ser um grande aliado no conforto, como pode também, se mal empregado, se transformar em vilão. Segundo Givoni (1992) existem duas maneiras de promover o conforto utilizando a ventilação. Uma é por efeito direto, provocando um aumento da velocidade do ar no interior, e então proporcionando uma sensação de resfriamento para os usuários. A outra maneira é indireta, ventilando o edifício somente à noite e, assim, resfriando a massa interna da edificação.

O emprego da ventilação diurna pode promover conforto pelo aumento da velocidade do ar no interior, que aumenta o limite superior de aceitabilidade da temperatura e umidade. Porém, é preciso ter certo cuidado, pois, quando um edifício é ventilado durante o dia, a temperatura em seu interior fica próxima aos valores de temperatura do ambiente externo. Se a temperatura do exterior é muito alta, a ventilação pode resultar em piora no conforto dos usuários.

O que se verifica na maior parte das residências é que os usuários abrem as janelas e portas para ventilação quando se sentem com calor ou quando percebem muita umidade no ambiente, e fecham quando estão com frio, independentemente da temperatura externa. Verifica-se, também, que esses elementos são abertos principalmente no período diurno, sendo geralmente fechados à noite.

Para verificar e analisar qual seria a melhor estratégia de uso da ventilação na Casa Eficiente, foram realizadas quatro simulações, com diferentes padrões de abertura. Essas simulações são descritas nos itens a seguir. Todas elas foram realizadas apenas para o período mais quente do ano, considerado de novembro a abril. Foi utilizado o arquivo climático com dados do ano climático de referência (TRY) para a cidade de Florianópolis.

Após as simulações, foram verificados e comparados os graus-hora de desconforto dos quatro casos. O cálculo foi realizado utilizando-se os dados de temperatura do ar da sala e dos quartos. As temperaturas limite de conforto adotadas foram de 18°C a 26°C. O limite superior de conforto foi estendido em relação ao adotado no item 2.2 deste livro (de 24°C para 26°C) considerando-se que é possível que o usuário sinta-se confortável em temperaturas até 26°C, ou até superiores, tendo em vista determinados valores de umidade e velocidade do vento.

3.2.1.1. Simulação 1 – Sem Ventilação

A primeira simulação, para servir como parâmetro de comparação, foi realizada sem ventilação. Ou seja, foi realizada a simulação com janelas e portas externas fechadas durante todos os dias.

3.2.1.2. Simulação 2 – Ventilação Diurna

Na segunda simulação, o modelo foi definido com ventilação natural apenas diurna, em horários pré-definidos, independentemente da temperatura externa. As janelas e portas externas são abertas das 8 às 21 horas, todos os dias. No período noturno, elas permanecem fechadas. As portas externas dos dois quartos e do banheiro são mantidas sempre fechadas.

3.2.1.3. Simulação 3 – Ventilação Noturna

No terceiro caso, o modelo foi simulado utilizando-se apenas a ventilação noturna. Assim, todos os dias, no período das 21 às 8 horas, as janelas são mantidas abertas nos dois quartos, na cozinha, banheiro e área de serviços, permitindo a ventilação natural. Durante o período diurno a Casa é mantida com janelas e portas externas fechadas. As portas externas dos dois quartos e do banheiro são mantidas sempre fechadas.

3.2.1.4. Simulação 4 – Ventilação Diurna e Noturna

Neste último caso, a simulação foi realizada combinando a ventilação diurna com a ventilação noturna, definidas em horários que seriam ideais. Assim, permite-se a ventilação apenas quando a temperatura interna está acima de 26°C e a temperatura do ar no exterior é mais baixa que a interna. As portas externas dos dois quartos e do banheiro são mantidas sempre fechadas.

3.2.1.5. Comparação dos Resultados

Durante os seis meses (novembro a abril) escolhidos para as análises de graus-hora de desconforto, o comportamento da temperatura externa do ar, referente ao ano climático de referência para Florianópolis, se deu conforme o apresentado na Figura 3.11. Verifica-se que a temperatura média do ar no período foi de 23,1°C. A temperatura máxima foi de 35,7°C e ocorreu no dia 08 de janeiro. Tendo em vista a faixa de conforto entre 18°C e 26°C, percebe-se que a maior parte do desconforto no período foi devido ao calor.

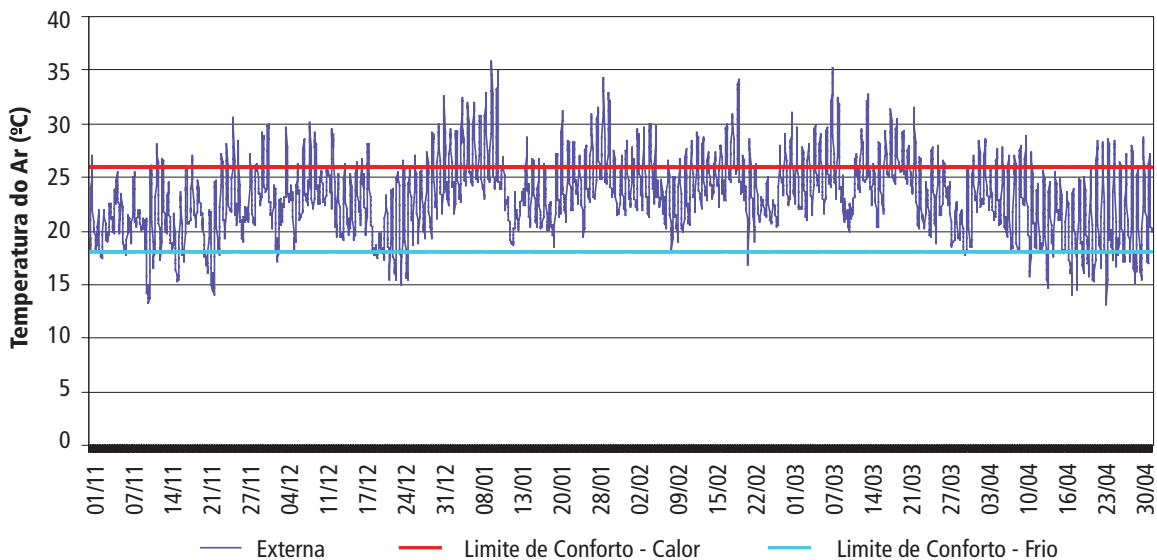


FIGURA 3.11 – Variação da temperatura externa do ar de novembro a abril do ano climático de referência.

As simulações foram realizadas com as quatro opções de ventilação descritas anteriormente. A Tabela 3.7 e a Figura 3.12 mostram os resultados de graus-hora de desconforto nos seis meses indicados, para todos os casos simulados e para o ambiente externo. É possível perceber que em todos os casos, dentro da Casa houve menos desconforto em relação ao exterior.

Comparando as quatro opções simuladas, a ventilação diurna foi a pior opção para a sala e quarto de solteiro. Para o quarto de casal, a pior opção foi sem ventilação. A simulação com ventilação apenas noturna foi a única na qual houve desconforto por frio dentro da casa, porém foram valores baixos. A ventilação noturna mostrou-se mais adequada do que a diurna e do que sem ventilação, para todos os ambientes. Dos quatro casos, o que apresentou menores valores de graus-hora de desconforto foi o com a combinação da ventilação diurna e noturna, para horários ideais. Ele foi melhor nos três ambientes analisados.

TABELA 3.7 – Graus-hora de desconforto – diferentes casos de ventilação.

Casos/Ambientes		Total	Calor	Frio
Externo		2110,6	1769,2	341,4
Sem Ventilação	Sala	1475,8	1475,8	0
	Quarto Casal	1832,7	1832,7	0
	Quarto Solteiro	1337,1	1337,1	0
Ventilação Diurna	Sala	1708,2	1708,2	0
	Quarto Casal	1778,2	1778,2	0
	Quarto Solteiro	1571,8	1571,8	0
Ventilação Noturna	Sala	911,8	874,6	37,2
	Quarto Casal	912,2	911,2	1
	Quarto Solteiro	571,5	565,3	6,2
Ventilação Diurna e Noturna	Sala	760,1	760,1	0
	Quarto Casal	896,7	896,7	0
	Quarto Solteiro	537,5	537,5	0

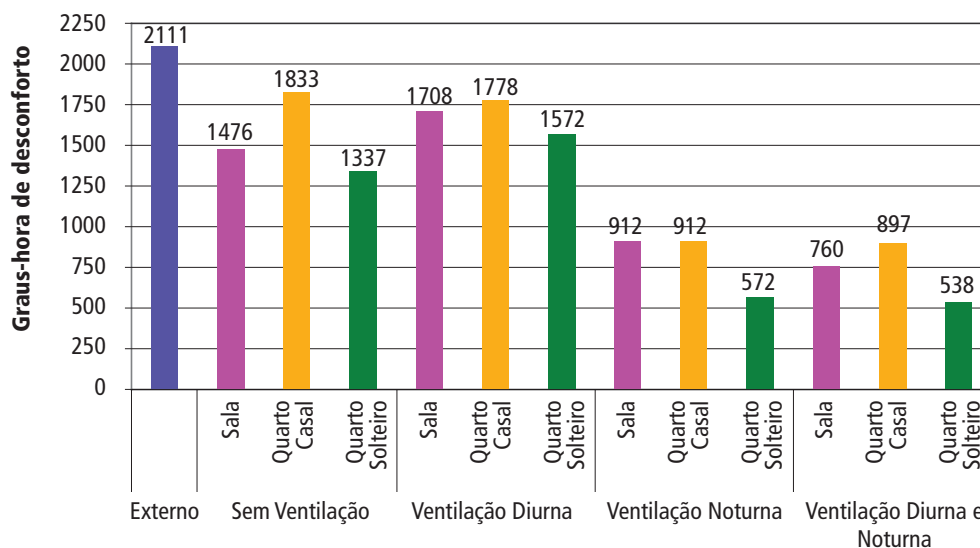


FIGURA 3.12 – Graus-hora de desconforto – diferentes casos de ventilação.

A seguir são mostrados gráficos de temperatura dos quatro casos simulados, para o mês de janeiro, que foi o que apresentou maior pico de temperatura externa do ar dentre os seis meses analisados (Figuras 3.13 a 3.16).

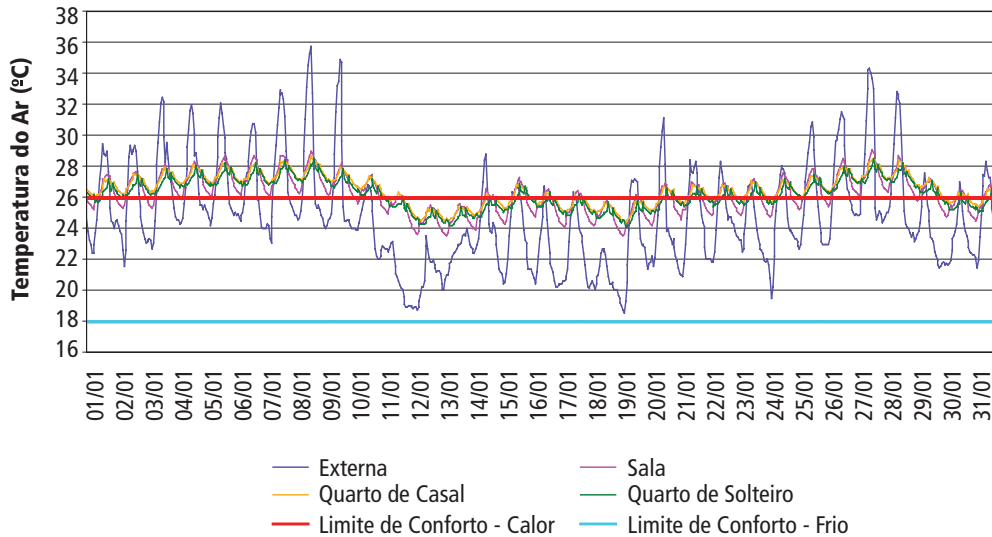


FIGURA 3.13 – Variação da temperatura em janeiro – Modelo sem ventilação.

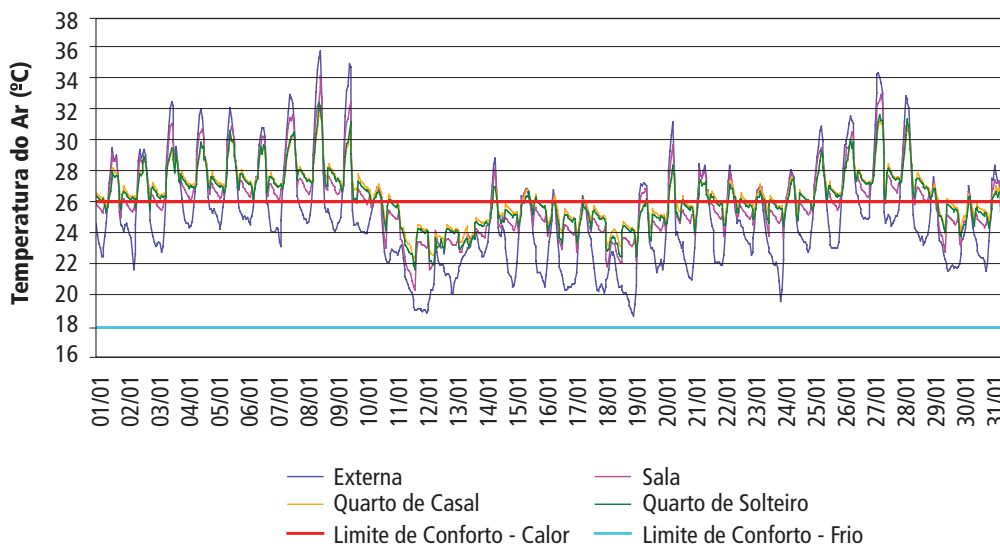


FIGURA 3.14 – Variação da temperatura em janeiro – Modelo com ventilação diurna.

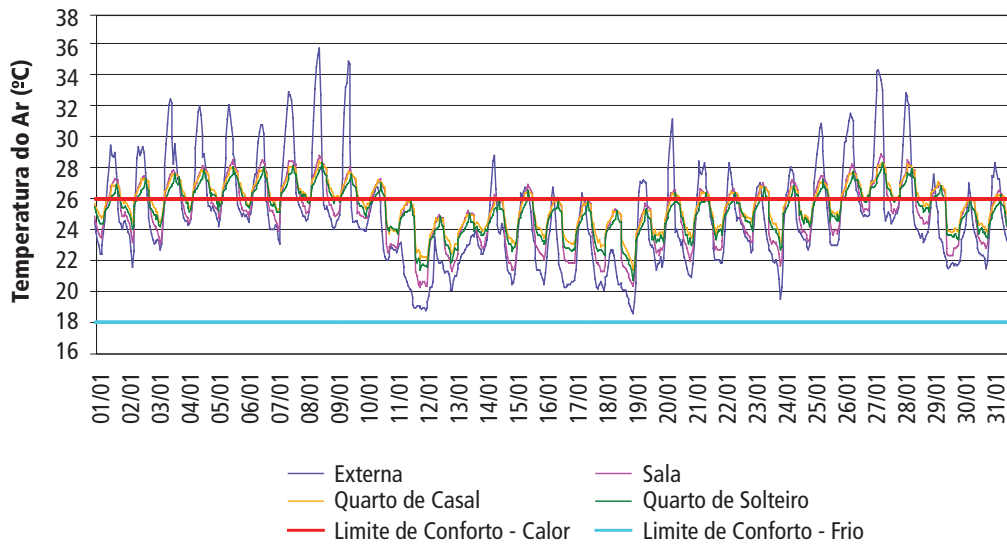


FIGURA 3.15 – Variação da temperatura em janeiro – Modelo com ventilação noturna.

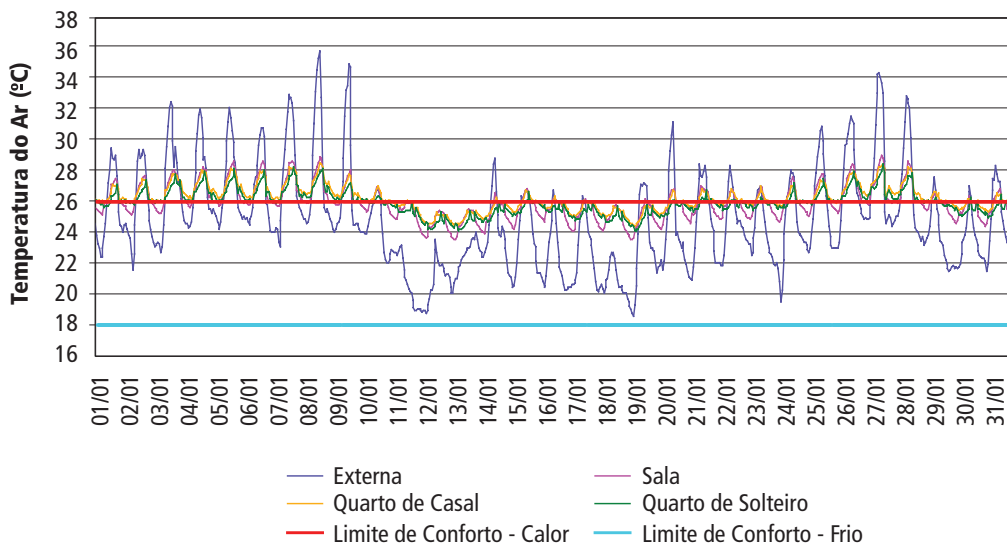


FIGURA 3.16 – Variação da temperatura em janeiro – Modelo com ventilação diurna e noturna, em horários ideais.

Com isso é possível entender que a ventilação pode ser uma grande aliada para o conforto térmico do ambiente quando bem utilizada, mas também pode prejudicar o conforto quando utilizada sem critério. Os experimentos realizados mostraram que, para o caso da Casa Eficiente, o conforto térmico no período de verão é mais favorecido pela integração entre ventilação diurna e noturna, mas controlada pelo valor da temperatura do ar no interior e no exterior da edificação. Entre utilizar apenas ventilação diurna ou noturna, a segunda opção foi mais favorável ao conforto dos usuários.

3.2.2. A Importância do Aquecimento Solar Passivo para o Conforto no Inverno

Uma das principais estratégias de condicionamento térmico passivo indicadas para a Zona Bioclimática 3, onde se encontra a cidade de Florianópolis, para o período de inverno, é o aquecimento solar da edificação (ABNT, 2005b). Isso significa que nos dias frios, é importante permitir a incidência de radiação solar sobre a edificação.

As persianas são dispositivos utilizados para permitir ou não a entrada da radiação solar através das aberturas (janelas e portas de vidro). Ela é um componente importante pois, nos períodos mais quentes (verão), a radiação solar direta é indesejada, mas nos períodos mais frios (inverno), indica-se o aproveitamento do sol para aquecimento passivo.

A simulação computacional foi utilizada para verificar a influência da abertura e fechamento das persianas no comportamento térmico da Casa Eficiente. Foram realizadas duas simulações, utilizando o modelo representativo da Casa Eficiente, alterando apenas a abertura das persianas. Na primeira simulação, as persianas foram mantidas fechadas durante todo o dia. Na segunda, as persianas foram abertas todos os dias, no período das 7 às 22 horas. Ambas foram realizadas apenas para o período mais frio do ano, considerado de maio a outubro. Foi utilizado o arquivo climático com dados do ano climático de referência (TRY) para a cidade de Florianópolis.

Após as simulações, foram verificados e comparados os graus-hora de desconforto dos dois casos e do ambiente externo. O cálculo foi realizado utilizando-se os dados de temperatura do ar da sala e dos quartos, considerando-se as temperaturas limites de conforto de 18°C a 26°C.

Durante os seis meses analisados, de maio a outubro, o comportamento da temperatura externa do ar, referente ao ano climático de referência para Florianópolis, teve o comportamento mostrado na Figura 3.17. Verifica-se que a temperatura média do ar no período foi de 18,2°C. A temperatura mínima ocorreu em 6 de agosto, e foi de 3,1°C. Considerando a faixa de conforto entre 18°C e 26°C, percebe-se que a maior parte do desconforto no período foi devido ao frio.

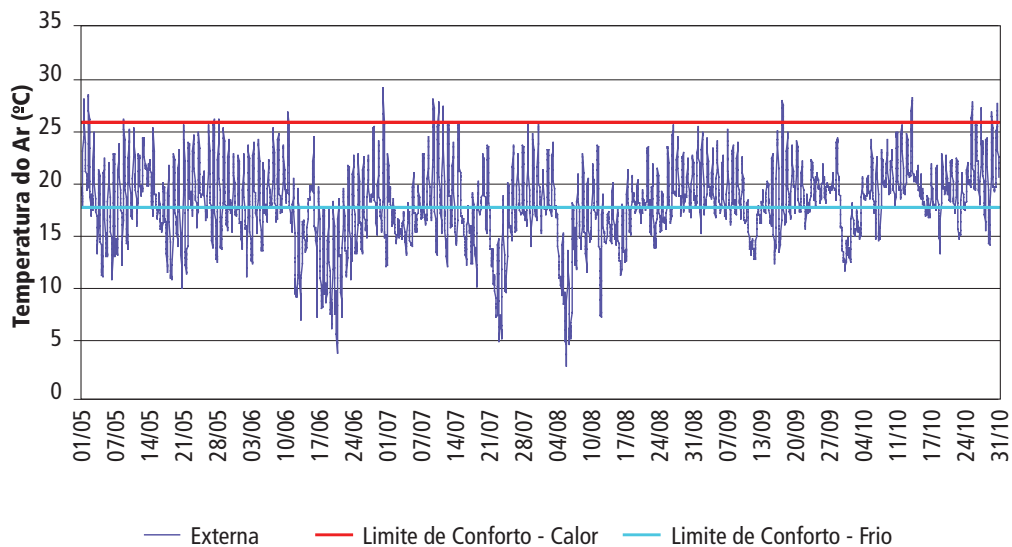


FIGURA 3.17 – Variação da temperatura externa do ar de maio a outubro do ano climático de referência.

As duas simulações realizadas apresentaram os resultados de graus-hora de desconforto (nos seis meses indicados) mostrados na Tabela 3.8 e na Figura 3.18. Verifica-se que o desconforto no exterior da Casa foi aproximadamente 25 vezes maior que o desconforto no interior da edificação, em qualquer dos ambientes, nas duas simulações. Nos três ambientes analisados, a quantidade de graus-hora de desconforto foi menor para o caso com abertura das persianas.

TABELA 3.8 – Graus-hora de desconforto – com e sem abertura de persianas.

Casos/Ambientes		Total	Calor	Frio
Externo		5754,8	65,8	5689,0
Persianas fechadas	Sala	227,0	0	227,0
	Quarto Casal	90,9	0	90,9
	Quarto Solteiro	116,1	0	116,1
Persianas abertas das 7 às 22h	Sala	110,4	0	110,4
	Quarto Casal	35,2	0	35,2
	Quarto Solteiro	27,6	0	27,6

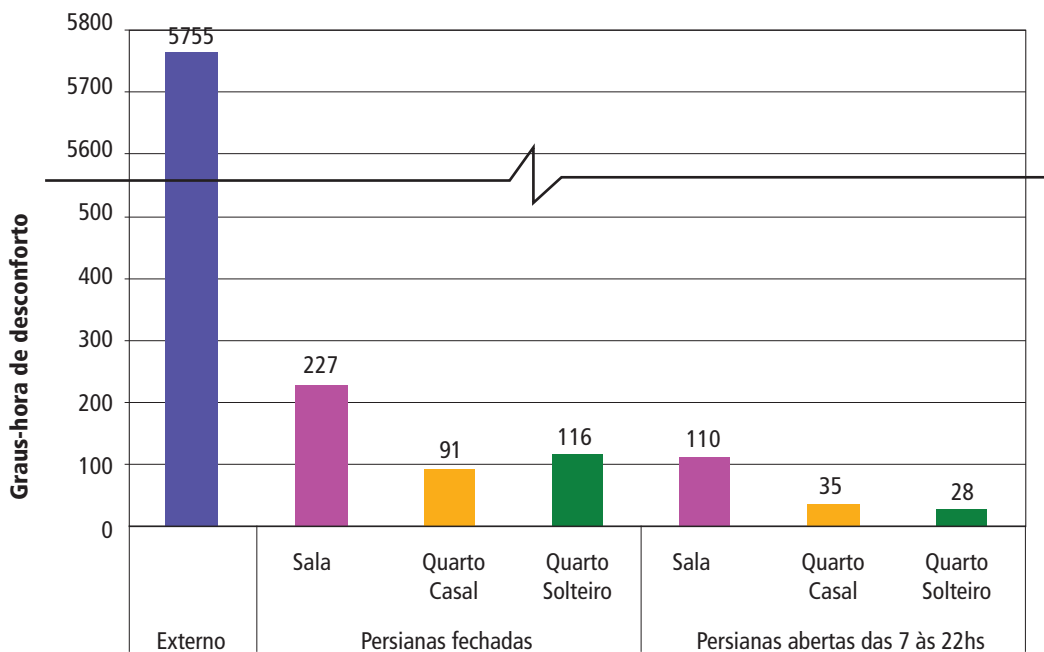


FIGURA 3.18 – Graus-hora de desconforto – com e sem abertura de persianas.

As Figuras 3.19 e 3.20 mostram gráficos de temperatura das duas simulações, para o mês de agosto, que apresentou a menor temperatura externa do ar dentre os seis meses analisados. Observando-as, é possível verificar que, no caso com as persianas abertas, as temperaturas dos dois quartos mantêm-se acima dos 18°C em quase todos os dias, com exceção apenas dos dias 6 a 8 de agosto. Durante todos os dias desse mês, o aproveitamento do sol para aquecimento foi favorável ao conforto.

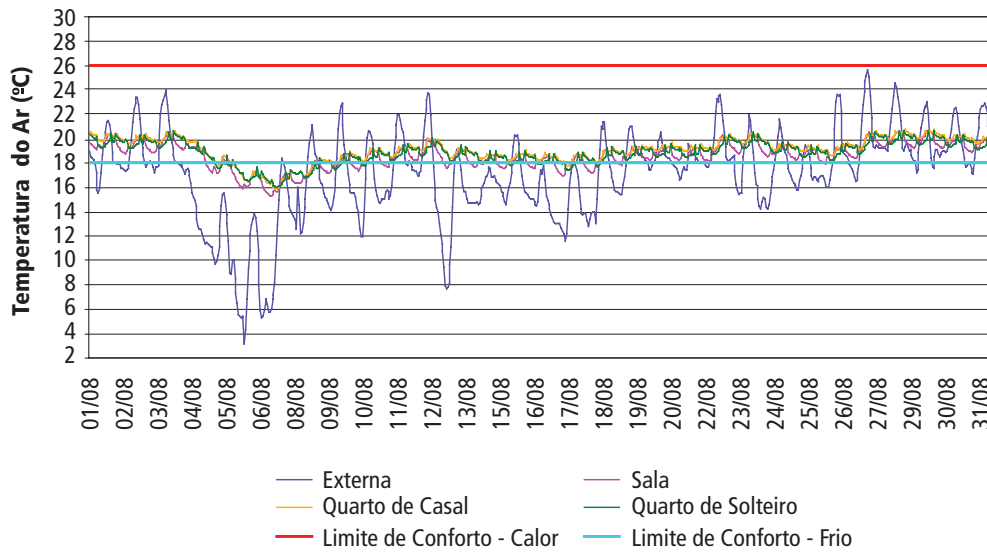


FIGURA 3.19 – Variação da temperatura em agosto – Modelo com persianas fechadas.

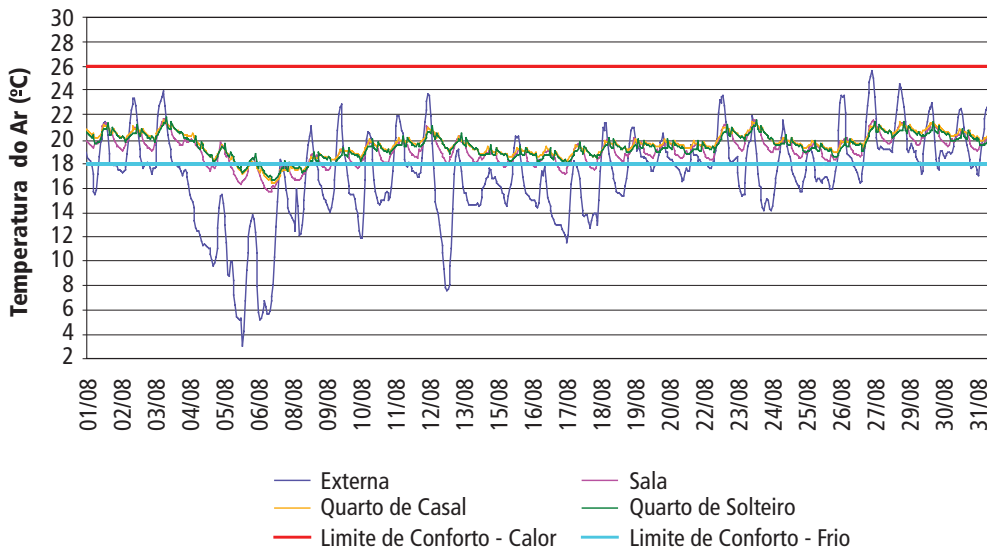


FIGURA 3.20 – Variação da temperatura em agosto – Modelo com persianas abertas das 7 às 22hs.

3.2.3. O Desempenho das Coberturas da Casa Eficiente

A cobertura tem um papel essencial no desempenho térmico de edificações térreas. Isso porque ela é a superfície com maior exposição à radiação solar e, conseqüentemente, uma das principais responsáveis pelo ganho de calor da edificação.

Nas decisões projetuais da Casa Eficiente, houve também uma preocupação com a escolha do tipo de cobertura, a fim de favorecer seu desempenho térmico. Ela foi construída adotando-se três soluções principais para sua cobertura:

- ❑ telha metálica, com isolamento térmico;
- ❑ telha de barro, com isolamento térmico e refletivo;
- ❑ telhado vegetado.

A cobertura metálica foi utilizada sobre o ambiente da sala; a cobertura de telha de barro foi utilizada sobre o quarto de casal e a cozinha; e o telhado vegetado foi adotado no banheiro, quarto de solteiro e área de serviços.

Com o modelo computacional representativo da Casa Eficiente, foi realizada uma simulação, e obtidos como dados de saída os valores de ganho de calor dos ambientes a partir de suas coberturas. Dessa forma, foi possível comparar a quantidade de calor que cada tipo de cobertura transmite ao ambiente sobre o qual está colocada. Foi utilizado o arquivo climático com dados do ano climático de referência (TRY) para a cidade de Florianópolis. São apresentados os dados de quatro ambientes: sala, quarto de casal, quarto de solteiro e banheiro.

Os ganhos de calor dos ambientes a partir de suas coberturas, foi comparado para os dias com a máxima e a mínima temperatura do ar do ano climático de referência de Florianópolis. A Figura 3.21 mostra o gráfico para o dia com temperatura máxima: 8 de janeiro, bem como o dia anterior e o dia seguinte. A Figura 3.22 mostra o gráfico para o dia com temperatura mínima: 6 de agosto, mais um dia antes e um dia depois. Verifica-se que a cobertura metálica (sala) é a que promove maior ganho de calor para o ambiente interno.

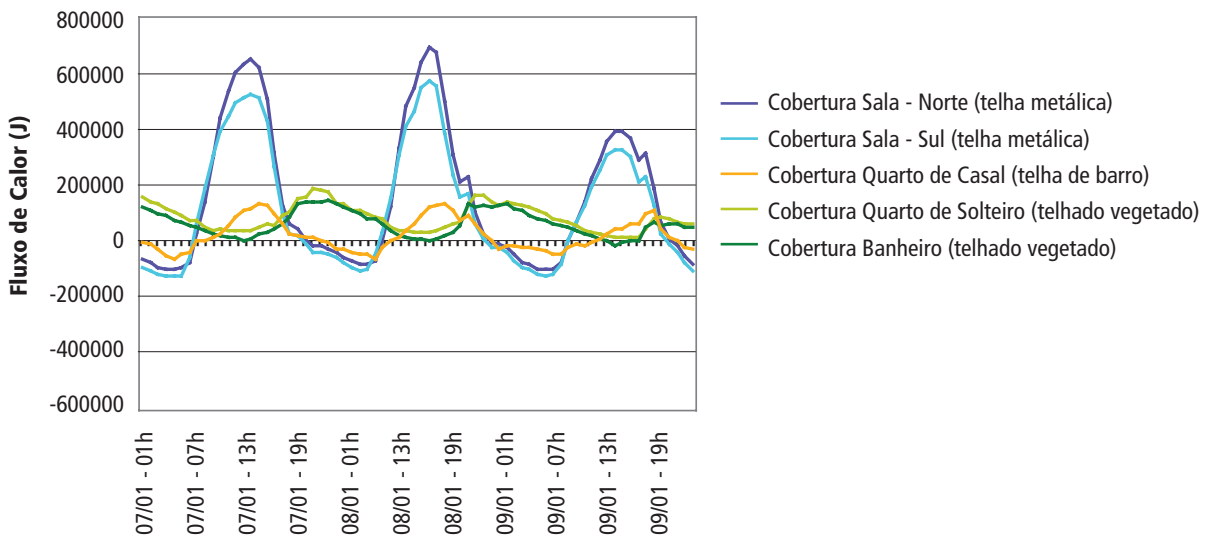


FIGURA 3.21 – Fluxo de calor pelas coberturas – dias 7 a 9 de janeiro.

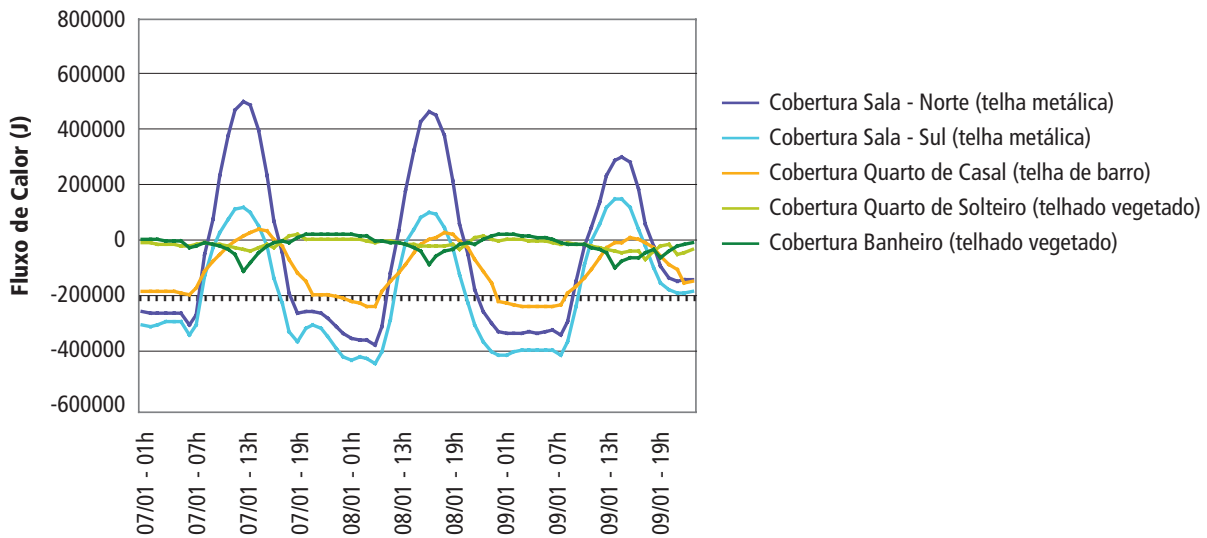


FIGURA 3.22 – Fluxo de calor pelas coberturas – dias 5 a 7 de agosto.

Observa-se que na Figura 3.21, no gráfico do período de verão (7 a 9 de janeiro), tanto a cobertura com telha metálica (sala) quanto a com telha de barro (quarto de casal), promovem ganho de calor no período diurno e perda de calor no período noturno. Isso confirma a necessidade de haver preocupação com a definição da cobertura, pois ela ganha grande quantidade de calor no momento mais indesejado do dia, quando a temperatura do ar está mais alta. Já o telhado vegetado (quarto de solteiro e banheiro), tem maiores ganhos de calor no período noturno e ganhos menores, ou até perdas de calor no período diurno. Dessa forma, o telhado vegetado mostrou ser a cobertura que mais favorece o desempenho térmico da Casa.

Na Figura 3.22, referente ao período de inverno (5 a 7 de agosto) verifica-se novamente que, as coberturas com telha metálica e com telha de barro, promovem ganho de calor no período diurno e perda de calor no período noturno. Porém, no inverno, as perdas noturnas são bem mais elevadas, desfavorecendo o conforto nos momentos em que os ambientes apresentam temperatura do ar mais baixa. Em contrapartida, o telhado vegetado apresenta pequenos ganhos de calor no período noturno, e pequenas perdas de calor durante o dia.

4. Conclusões

O uso de programas computacionais para simulação de edificações tem se mostrado eficiente no auxílio às análises de desempenho termo-energético. Nas pesquisas realizadas com a Casa Eficiente, o programa *EnergyPlus* foi utilizado em diversas simulações computacionais, tanto nas etapas iniciais de projeto, como após a sua construção. Elas permitiram e facilitaram algumas análises de desempenho térmico dos componentes construtivos, de eficiência energética, do uso da ventilação natural, do uso do aquecimento solar passivo.

Nas simulações realizadas antes da construção, avaliando dez modelos com a mesma planta e volumetria da residência, mas com alterações em parâmetros construtivos e de uso e ocupação, pôde-se verificar a influência de cada estratégia de interesse no desempenho da Casa Eficiente. Como resultado, concluiu-se que a reunião dessas estratégias em uma configuração única resultaria em um melhor desempenho termo-energético da edificação. Assim, tal configuração foi adotada no projeto arquitetônico da Casa Eficiente.

Nas simulações efetuadas após a construção, foi possível testar e calibrar um modelo computacional representativo da Casa Eficiente, e utilizá-lo em análises de desempenho térmico. Realizando simulações com diferentes opções de ventilação para o período do verão, verificou-se que a ventilação pode ser uma grande aliada para o conforto térmico do ambiente quando bem utilizada, mas também pode prejudicar o conforto quando utilizada sem critério. Para o caso da Casa Eficiente, o conforto térmico no período de verão foi mais favorecido pela integração entre ventilação diurna e noturna, controlada pelo valor da temperatura do ar no interior e no exterior da edificação. Entre utilizar apenas ventilação diurna ou noturna, a segunda opção foi mais favorável ao conforto. Destaca-se que a maior parte da população local costuma abrir as janelas para ventilação durante o dia e fechá-las à noite. Isso significa que a ventilação mais favorável não é o que geralmente se utiliza nas residências.

Simulações também foram utilizadas para verificar a influência da utilização do aquecimento solar passivo para melhoria do conforto no período de inverno, variando a abertura das persianas. Os resultados apontaram que a abertura das persianas no período diurno, permitindo o aproveitamento do sol para aquecimento, favoreceu o conforto nos ambientes da Casa.

Em uma última análise, comparou-se o comportamento dos diferentes tipos de cobertura existentes na casa. Os resultados mostraram que, tanto as coberturas com telha metálica como as com telha de barro, promovem, no verão, grande ganho de calor no período diurno e, no inverno, grande perda de calor no período noturno. Isso significa que elas ganham e perdem calor nos momentos mais indesejados. O telhado vegetado, contudo, tem maiores ganhos de calor no período noturno e ganhos menores, ou até perdas de calor, no período diurno, sendo assim a cobertura que mais favorece o desempenho térmico da Casa Eficiente.

Referências

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-2**: Desempenho térmico de edificações – Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro, 2005a.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-3**: Desempenho térmico de edificações – Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e estratégias de condicionamento térmico passivo para habitações de interesse social. Rio de Janeiro, 2005b.
- ANSI/ASHRAE – AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE/AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **ANSI/ASHRAE 55-2004**: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. Atlanta, 2004.
- ASHRAE – AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **2005 ASHRAE Handbook – Fundamentals**. Capítulo 8: Thermal Comfort. Atlanta, 2005a.
- ASHRAE – AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **2005 ASHRAE Handbook – Fundamentals**. Capítulo 29: Nonresidential Cooling and Heating Load Calculation Procedures. Atlanta, 2005b.
- BATISTA, J. O.; LAMBERTS, R.; WESTPHAL, F. S. Avaliação de Desempenho Térmico de Componentes Construtivos Utilizando o EnergyPlus. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 8., 2005, Maceió. **Anais...** Maceió: ANTAC, 2005. p. 145-154.
- BATISTA, J. O.; WESTPHAL, F. S.; LAMBERTS, R. **Simulação Térmica e Energética da Casa Eficiente**. Relatório de Pesquisa, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional 2007: Ano Base 2006**. Relatório Final. Rio de Janeiro: EPE, 2007.
- DOE – U. S. DEPARTMENT OF ENERGY. **Building Energy Software Tools Directory**. Disponível em: <http://www.eere.energy.gov/buildings/tools_directory/alpha_list.cfm>. Acesso em: 24 abr. 2007.
- FLOURENTZOU, F.; VAN DER MAAS, J.; ROULET, C. A. Natural ventilation for passive cooling: measurement of discharge coefficients. **Energy and Buildings**, v.27, nº1, p. 283-292, 1998.
- GIVONI, B. Comfort climate analysis and building design guidelines. **Energy and Buildings**, v.18, nº1, p. 11-23, 1992.
- LIDDAMENT, M. W. **Air Infiltration Calculation Techniques – An Applications Guide**. AIVC – Air Infiltration and Ventilation Centre, 1986.
- ORDENES, M.; PEDRINI, A.; GHISI, E.; LAMBERTS, R. **Metodologia Utilizada na Elaboração da Biblioteca de Materiais e Componentes Construtivos Brasileiros para Simulações no Visualdoe-3.1**. Relatório Interno, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

- TNO Building Research. **Cp Generator**. Disponível em: <<http://cpgen.bouw.tno.nl/cp>>. Acesso em: 10 mai. 2008.
- WESTPHAL, F. S.; LAMBERTS, R. Building Simulation Calibration Using Sensitivity Analysis. In: BUILDING SIMULATION, 9., 2005, Montreal. **Proceedings...** Montreal: IBPSA, 2005. p. 1331-1338.

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 978-85-7426-099-0



LabEEE



Ministério de
Minas e Energia

