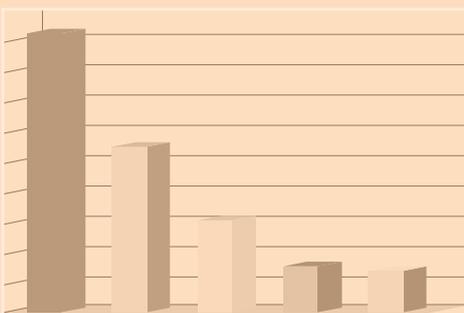
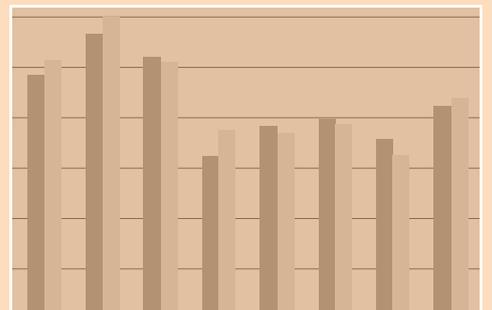
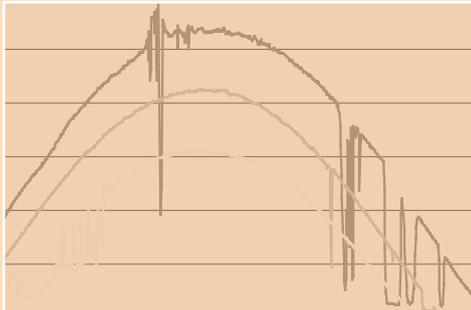


# Casa Eficiente

Consumo e Geração de Energia





# **Casa Eficiente:**

**Consumo e Geração de Energia**

**Editores:**

Roberto Lamberts

Enedir Ghisi

Cláudia Donald Pereira

Juliana Oliveira Batista

**FLORIANÓPOLIS**  
**UFSC**  
**2010**

## **LABEEE – LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES**

### **Coordenador**

Prof. Dr. Roberto Lamberts

### **Pesquisadores da Casa Eficiente**

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

## **ELETOBRAS**

### **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

## **ELETOBRAS 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 : consumo e geração de energia / editores: Roberto Lamberts... [et al.]. – Florianópolis : UFSC/ LabEEE; 2010.  
v. 2 (76 p.) : il. ; graf. ; tabs.  
**Inclui bibliografia**  
**ISBN: 978-85-7426-101-0**  
1. Energia elétrica – Consumo. 2. Instalações elétricas domiciliares. 3. Aquecimento solar de água.  
4. Geração de energia fotovoltaica. 5. Arquitetura e conservação de energia. 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 ELETROBRAS para a construção de um centro de demonstrações em eficiência energética.

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

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

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

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

**Prof. Alvaro Toubes Prata**  
Reitor  
Universidade Federal de Santa Catarina

# Sociedade eficiente e sustentável

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

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

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

**José Antônio Muniz Lopes**  
Presidente da Eletrobras

# A Eficiência e o Futuro

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

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

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

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

**Eurides Luiz Mescolotto**  
Presidente da Eletrobras Eletrosul

# Sumário

PREFÁCIO.....	9
RESUMO EXECUTIVO.....	15
1. INTRODUÇÃO.....	17
2. INSTALAÇÕES ELÉTRICAS DA CASA EFICIENTE.....	23
2.1. O consumo dos equipamentos da Casa Eficiente.....	26
2.2. O sistema de monitoramento da Casa Eficiente.....	28
3. SISTEMA DE AQUECIMENTO SOLAR DE ÁGUA.....	31
3.1. Argumentos para uso da energia solar para aquecimento.....	31
3.2. Bases astronômicas e meteorológicas.....	33
3.3. Aproveitamento térmico da energia solar.....	35
3.4. Componentes do sistema de aquecimento solar de água.....	36
3.4.1. Tipologias.....	36
3.4.2. Coletor solar.....	36
3.4.3. Reservatórios térmicos.....	37
3.4.4. Sistema de aquecimento auxiliar.....	38
3.4.5. Controles e acionamentos.....	38
3.5. Sistemas de aquecimento solar da Casa Eficiente.....	39
3.6. Funcionamento dos sistemas de aquecimento solar da Casa Eficiente.....	41
3.6.1. Diagrama de funcionamento e variáveis medidas nos sistemas de aquecimento solar.....	41
3.6.2. Testes de funcionamento dos sistemas.....	43
3.7. Recomendações para continuidade dos experimentos.....	46
4. SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA.....	49
4.1. Energia solar fotovoltaica.....	49
4.1.1. Células solares fotovoltaicas – tecnologias.....	49
4.1.2. Módulo fotovoltaico.....	50
4.1.3. Sistemas fotovoltaicos (SFV).....	51

4.2.	Sistema Fotovoltaico da Casa Eficiente.....	53
4.2.1.	Desempenho do Sistema Fotovoltaico da Casa Eficiente.....	58
4.3.	Considerações Sobre o Uso de Sistemas Fotovoltaicos .....	61
<b>5.</b>	<b>EXPERIMENTOS DE CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA .....</b>	<b>63</b>
5.1.	Perfis de Consumo de Energia Elétrica .....	63
5.2.	Análise Econômica .....	71
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>75</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>76</b>



# Prefácio

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

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

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

Paralelamente, as negociações entre a ELETROSUL, ELETROBRAS/PROCEL e a UFSC 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](http://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.

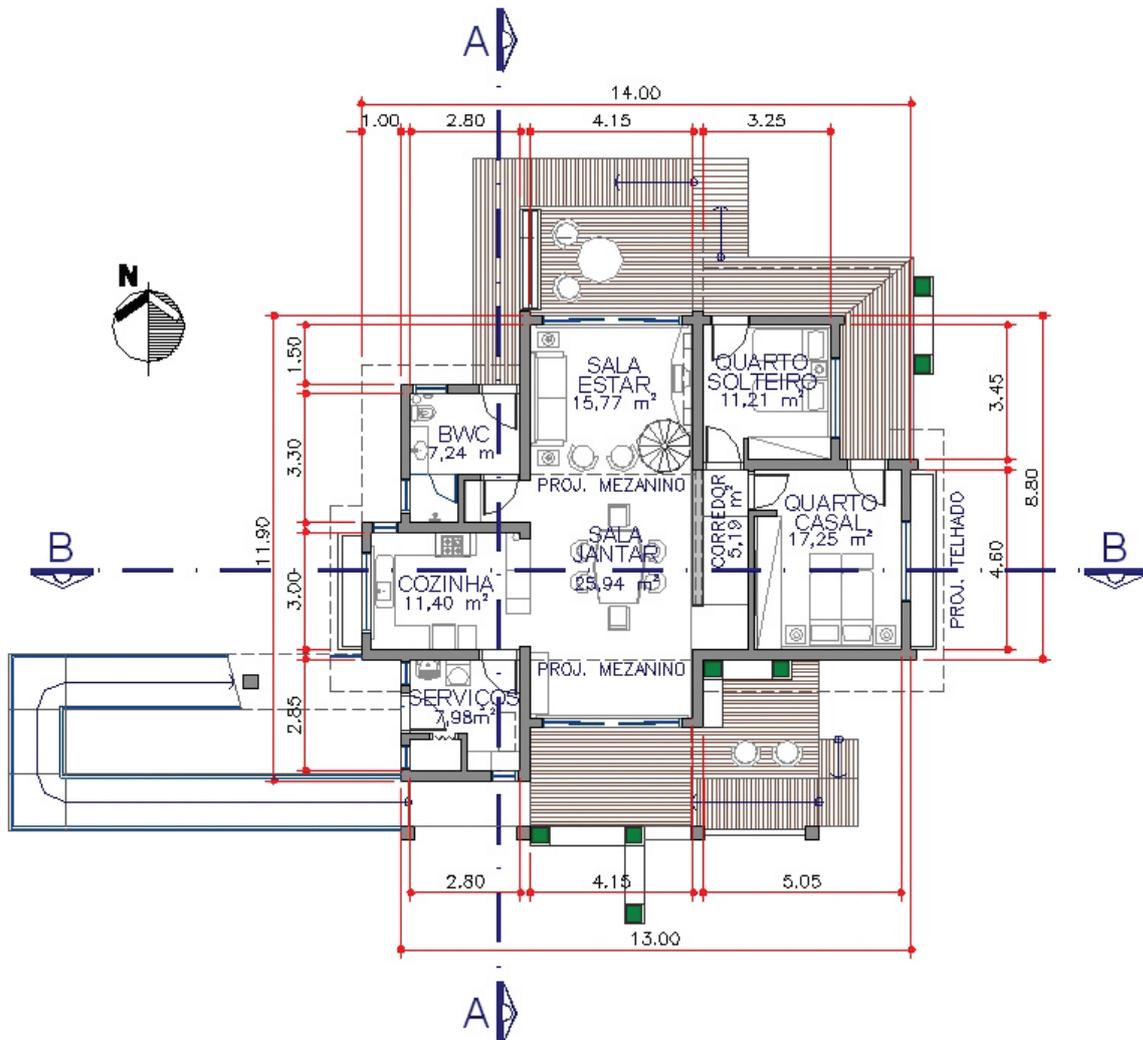


FIGURA 5 – Planta baixa da Casa Eficiente – pavimento térreo.

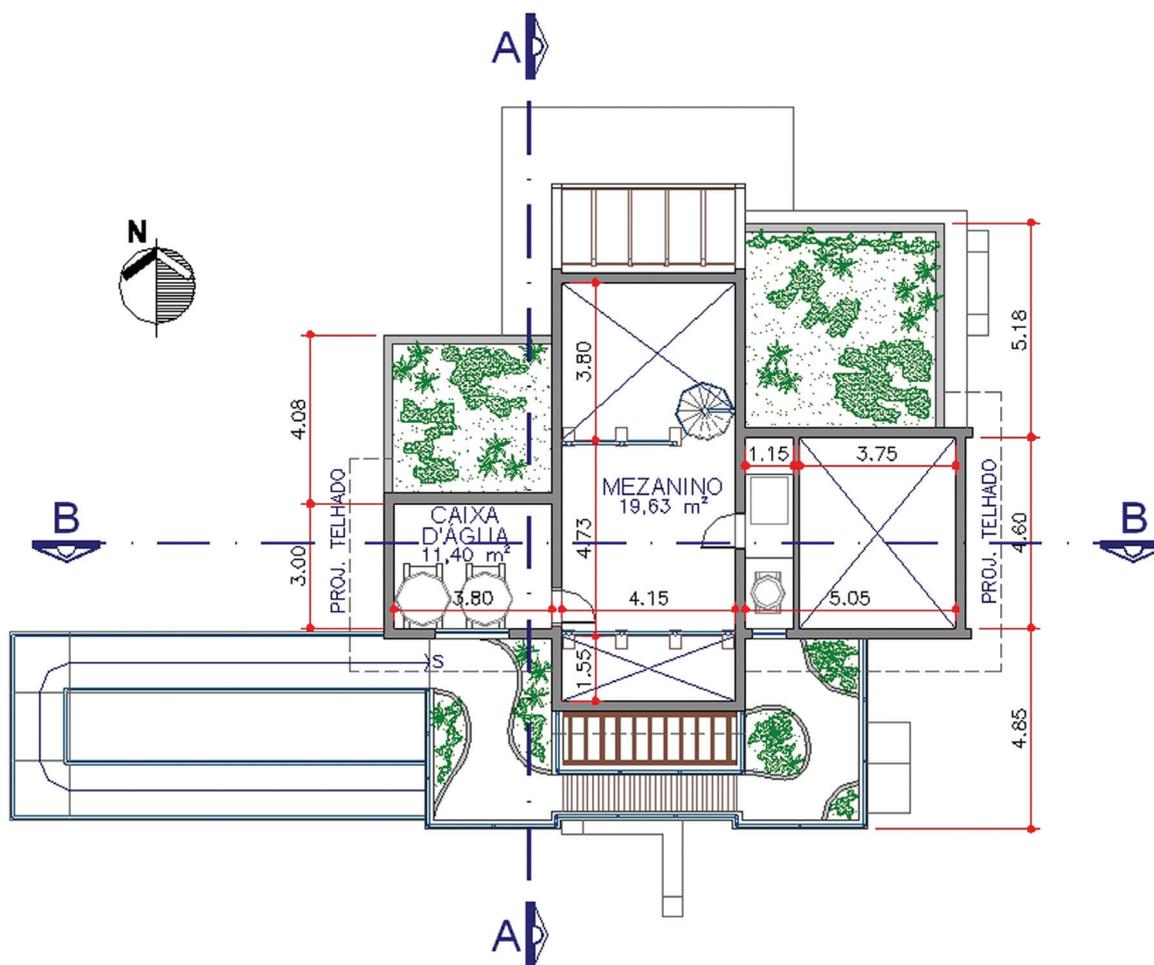


FIGURA 6 – Planta baixa da Casa Eficiente – mezanino.

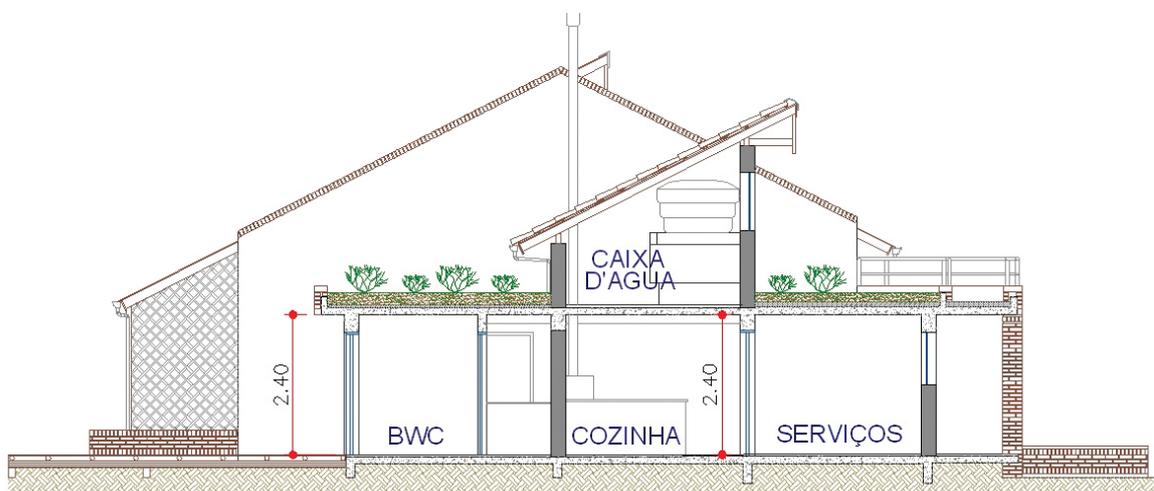


FIGURA 7 – Corte AA.

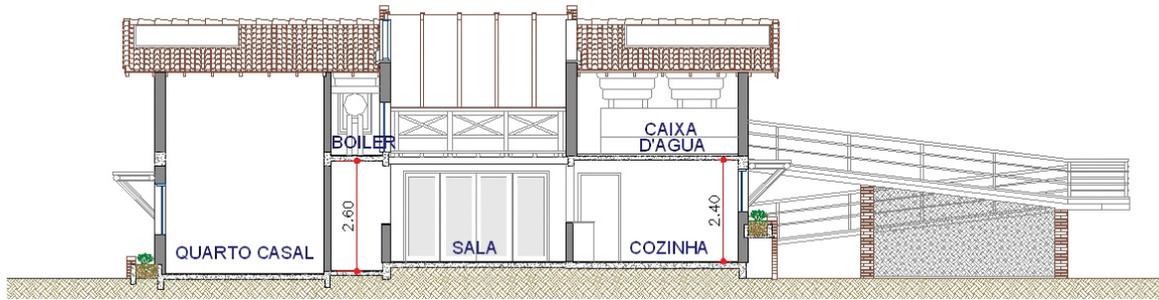


FIGURA 8 – Corte BB.

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 ELETROBRAS/PROCEL Edifica e o LabEEE/UFSC apresentam ao público os resultados das pesquisas desenvolvidas na Casa Eficiente, reunidos em quatro publicações técnicas, abordando as seguintes temáticas:

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

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

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



# Resumo executivo

A Casa Eficiente foi concebida seguindo princípios como o uso racional da energia elétrica e o baixo impacto ambiental. Esses pontos nortearam todas as decisões de projeto, no sentido de alcançar a máxima eficiência energética. Com relação ao projeto elétrico, essa busca pode ser percebida desde a definição da iluminação, com o aproveitamento da iluminação natural, a escolha de equipamentos e eletrodomésticos com eficiência energética atestada pelo selo PROCEL, e a inserção de fontes alternativas de energia, como a energia solar.

Com relação ao aquecimento de água, verifica-se que a energia solar tem sido usada para esse fim no Brasil, principalmente no setor residencial de renda média e alta, porém em apenas uma parcela pequena das residências apesar do grande potencial existente. A Casa Eficiente possui dois sistemas de aquecimento solar, tendo, em cada uma das suas coberturas laterais, dois coletores solares planos responsáveis pelo aquecimento da água utilizada na residência. Um dos sistemas faz o aquecimento da água para consumo (banho e lavatórios), e o outro aquece a água utilizada para aquecimento ambiental dos quartos.

Além de aquecer água, a energia solar pode também ser convertida diretamente em eletricidade. Esta aplicação, muito difundida em vários países, é realizada através do chamado “efeito fotovoltaico”. Para tal uso, a Casa Eficiente possui um painel fotovoltaico, localizado na cobertura central da residência, responsável pela transformação de energia solar em energia elétrica para abastecer a residência. Essa geração de energia, iniciada em julho de 2006, vêm sendo monitorada desde então.

Esta publicação apresenta estudos realizados a partir dos equipamentos e sistemas existentes na Casa Eficiente. Foram utilizados tanto dados reais, medidos na edificação, quanto dados estimados pela pesquisa. Os estudos aqui apresentados indicam que a energia solar apresenta significativo potencial para utilização em residências no Brasil. A geração fotovoltaica da Casa Eficiente se mostrou suficiente para suprir todo o seu consumo durante o período diurno em dias com céu sem nuvens e sol aparente, e ainda fornecer energia para a rede elétrica. No caso de dias nublados, a geração fotovoltaica supre parcialmente o consumo da Casa, sendo necessário utilizar a energia da rede como complemento.

Tendo em vista que a Casa Eficiente não é ocupada por moradores e por isso tem baixo consumo de energia durante todo o dia, para comparar a geração de energia do sistema fotovoltaico com o consumo de uma família, foram realizadas estimativas com diferentes padrões de uso, simulando a ocupação da Casa. Tais estimativas destacaram a importância da escolha de equipamentos eficientes e da adoção de hábitos de consumo conscientes por parte dos usuários. Sendo ocupada por usuários conscientes, e utilizando equipamentos eficientes, a Casa teria sua demanda totalmente atendida pela geração de energia do sistema fotovoltaico.

Através das pesquisas realizadas, verificou-se o grande potencial de economia no consumo de energia elétrica a partir do uso da energia solar, tanto para geração de energia quanto para aquecimento de água, e da adoção de equipamentos e hábitos eficientes. Os resultados da Casa Eficiente apontam que, tendo em vista a adoção de equipamentos eficientes e a adoção de hábitos conscientes por parte dos usuários, ela poderia ser considerada como *Zero Energy Building* (ZEB). Isso significa que a quantidade de energia gerada no local, através de uma fonte renovável de energia, é igual ou superior à quantidade que seria consumida na edificação.



# 1. Introdução

Autora:

Cláudia Donald Pereira

O uso de energia tem sido intensivo e crescente desde a Revolução Industrial. Ela é essencial para o funcionamento dos mais diversos setores e atividades da sociedade. Da energia elétrica, especificamente, depende o funcionamento da maior parte dos equipamentos de edificações residenciais, comerciais e públicas.

Tendo em vista o papel de grande importância da energia no desenvolvimento mundial, ela tem se tornado motivo de preocupação nas últimas décadas. Geller (2003) considera que tanto as fontes quanto as tendências atuais do uso de energia não são sustentáveis. Ele destaca que o uso mundial de energia aumentou dez vezes desde 1900, e a maior parte desta energia é proveniente de fontes não renováveis.

No Brasil, esse grande crescimento no consumo de energia também é fato. Geller (2003) afirma que o uso total de energia no Brasil cresceu cerca de 250% no período de 1975 a 2000, aumento provocado, principalmente, pela rápida industrialização e pelos crescentes serviços energéticos residencial e comercial. A Figura 1.1 mostra o aumento continuado no consumo de energia elétrica no Brasil, em todos os setores, no período de 1998 a 2007.

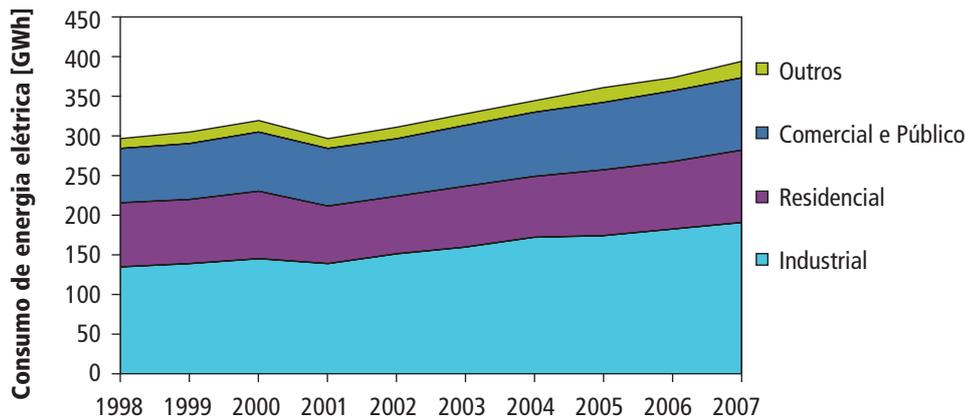


FIGURA 1.1 – Evolução dos consumos setoriais de energia elétrica no Brasil (BRASIL, 2008a).

A partir de dados referentes ao ano de 2005, verifica-se que grande parte do consumo de energia elétrica no país ocorre em edificações (45,2%). Destas, destacam-se as edificações residenciais, responsáveis por 22,2% do consumo de eletricidade, conforme pode ser visto na Figura 1.2. A energia utilizada nas edificações atende equipamentos que incluem sistemas de iluminação, refrigeração e aquecimento, eletrodomésticos e outros dispositivos. Nas edificações residenciais brasileiras, o consumo de energia elétrica por eletrodoméstico é dividida conforme mostrado na Figura 1.3. É possível perceber que os grandes responsáveis pelo consumo são o chuveiro elétrico com 24%, a geladeira com 22%, o ar-condicionado com 20%, e a iluminação artificial com 14%.

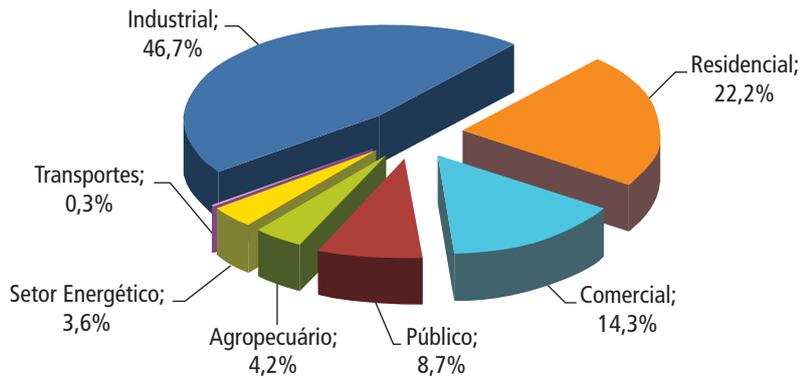


FIGURA 1.2 – Consumos setoriais de energia elétrica referentes a 2005 (ELETROBRAS; PROCEL, 2007).

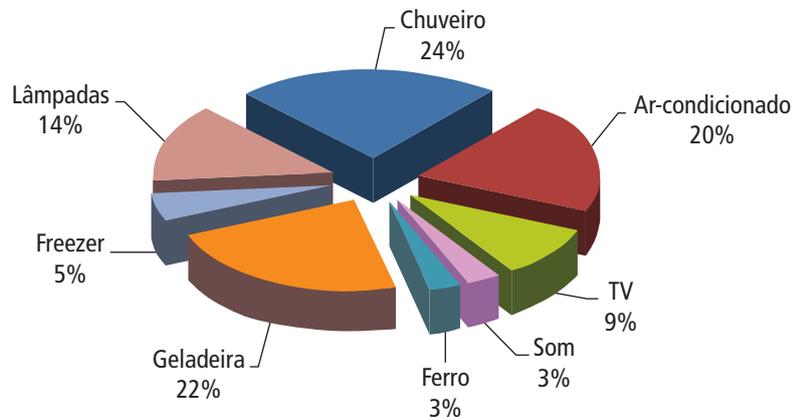


FIGURA 1.3 – Participação dos eletrodomésticos no consumo de eletricidade das residências brasileiras referente a 2005 (ELETROBRAS; PROCEL, 2007).

Tal Distribuição de consumo por usos finais não é constante em todas as regiões do Brasil. Observando os gráficos da Figura 1.4 é possível verificar, por exemplo, que o consumo com ar-condicionado na Região Norte é bem superior ao verificado na Região Sudeste. Já o consumo com chuveiro elétrico é baixo na Região Norte e bem mais elevado nas Regiões Centro-Oeste, Sudeste e Sul.

Em 2001, o Brasil sofreu a consequência do descompasso entre o grande crescimento no consumo e o pequeno crescimento da capacidade instalada. O país passou por um racionamento de energia elétrica, pois, segundo Tolmasquim (2000), a expansão do sistema elétrico (investimentos em geração e transmissão de energia) não acompanhou a elevação do consumo.

A preocupação com essa questão colocou em foco a busca por eficiência energética, tendo em vista não apenas as questões econômicas, mas também a qualidade do ambiente para o usuário e a redução de impactos ambientais. Para Lamberts et al. (2004), um edifício é considerado energeticamente mais eficiente que outro quando proporciona as mesmas condições ambientais de conforto ao seu usuário, com menor consumo

de energia. Para Oliveira e Sá Júnior (1998) esse crescimento rápido e mal planejado da produção e do consumo energético implica sérios impactos ambientais. Sendo assim, algumas medidas deveriam ser incentivadas a fim de conscientizar a população sobre os benefícios da utilização eficiente dos recursos energéticos.

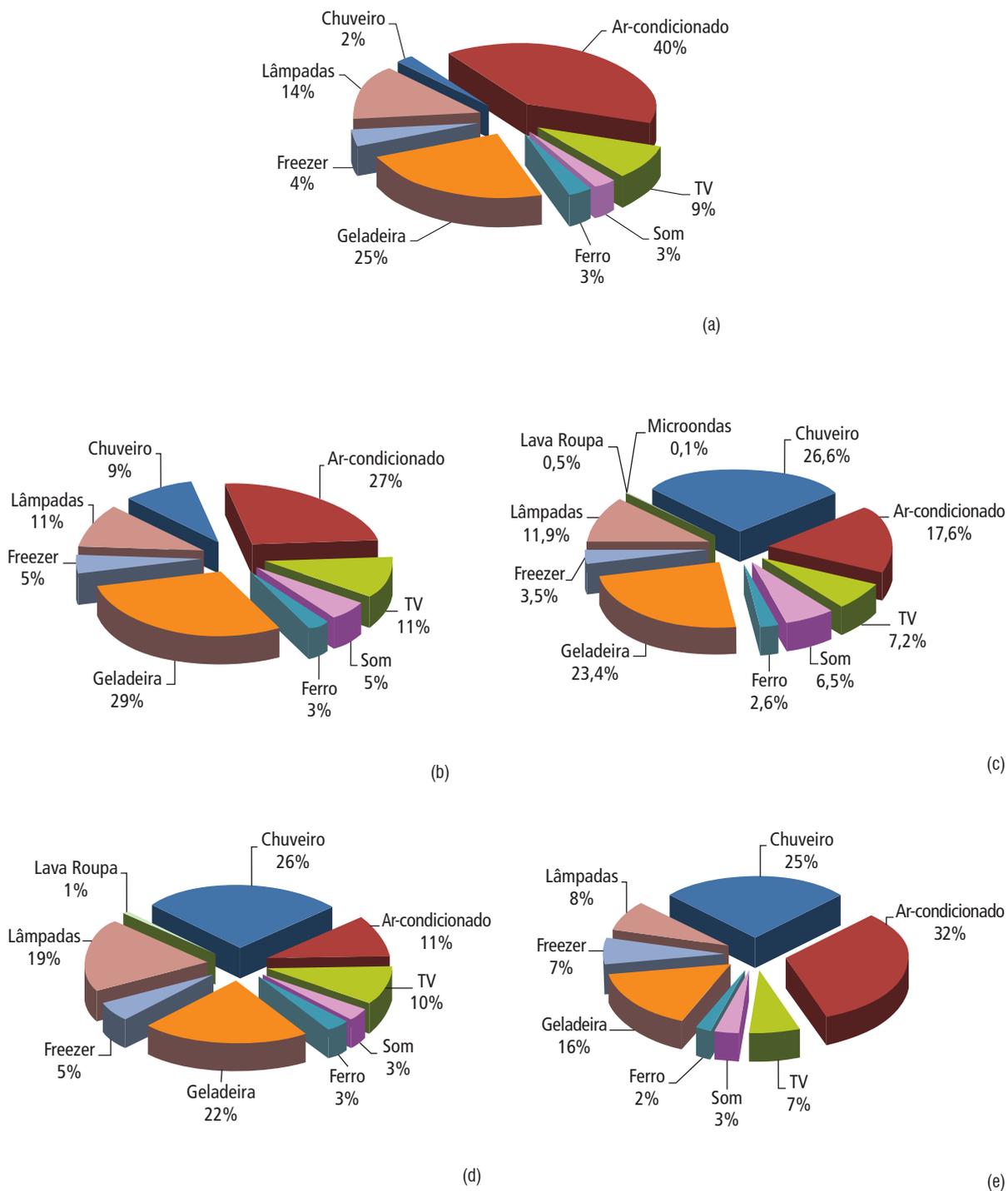


FIGURA 1.4 – Participação dos eletrodomésticos no consumo de eletricidade das residências, de acordo com as Regiões do Brasil, referente a 2005 – (a) Norte, (b) Nordeste, (c) Centro-Oeste, (d) Sudeste e (e) Sul. (ELETROBRAS; PROCEL, 2007).

Na busca por eficiência energética nas edificações, destacam-se duas estratégias importantes: a introdução de novas tecnologias e a mudança de hábitos de consumo, incentivadas por programas e políticas de conservação e uso racional de energia. Uma importante iniciativa criada no Brasil é o Programa Brasileiro de Etiquetagem – PBE, estabelecido pelo Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial – INMETRO. O PBE é um programa de conservação de energia, que atua através de etiquetas informativas, alertando o consumidor quanto à eficiência energética de alguns dos principais eletrodomésticos nacionais. Ele visa “prover os consumidores de informações que lhes permitam avaliar e otimizar o consumo de energia dos equipamentos eletrodomésticos, selecionar produtos de maior eficiência em relação ao consumo, e melhor utilizar eletrodomésticos, possibilitando economia nos custos de energia” (INMETRO, 2008). Assim, os produtos avaliados recebem etiquetas de “A” a “G”, sendo a etiqueta “A” para os mais eficientes.

Ghisi et al. (2007) verificaram que o uso de energia elétrica no setor residencial brasileiro tem aumentado especialmente com relação ao uso de ar-condicionado e de freezers. Eles destacam a importância da etiqueta com o nível de eficiência energética, já presente nestes e em outros equipamentos disponíveis no mercado brasileiro, para a diminuição desse consumo. Para eles, a melhor maneira de evitar o consumo extra de eletricidade com esses aparelhos seria certificar-se de que suas eficiências são constantemente melhoradas, o que poderia ser alcançado através de um esforço comum entre governo, fabricantes e usuários.

Nesse mesmo sentido, foi instituído em 1993, o Selo PROCEL de Economia de Energia, desenvolvido pelo Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica – PROCEL. Ele tem por objetivo “orientar o consumidor no ato da compra, indicando os produtos que apresentam os melhores níveis de eficiência energética dentro de cada categoria, proporcionando, assim, economia na sua conta de energia elétrica” e ainda estimular “a fabricação e a comercialização de produtos mais eficientes, contribuindo para o desenvolvimento tecnológico e a preservação do meio ambiente” (PROCEL, 2008). Os equipamentos considerados mais eficientes, geralmente classificados pelo PBE com etiqueta “A”, recebem o Selo PROCEL.

Infelizmente, grande parte da população brasileira ainda não conhece o Selo PROCEL, ou não sabe o que ele significa. Em pesquisa realizada pelo PROCEL em 2005, entrevistando mais de 10 mil consumidores, mais da metade (53,2%) respondeu não conhecer o Selo PROCEL, conforme mostra a Figura 1.5.

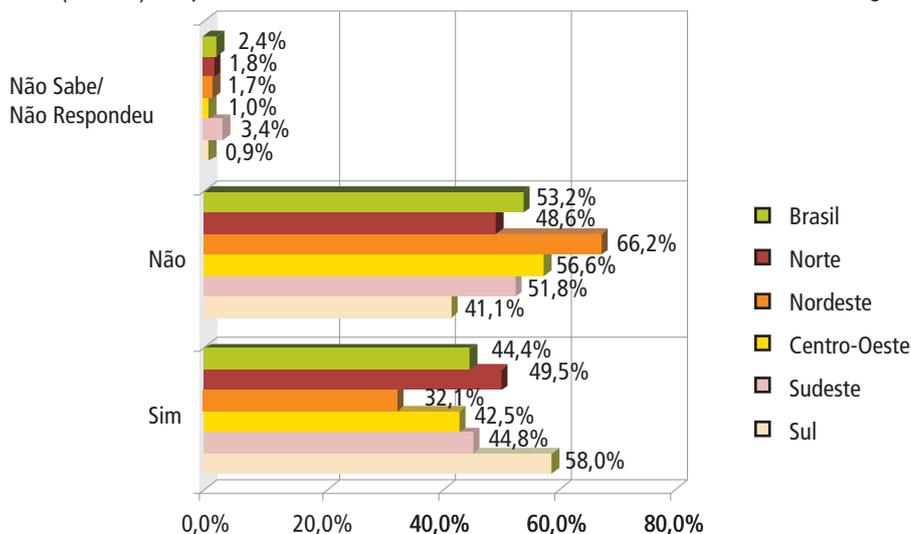


FIGURA 1.5 – Conhecimento do Selo PROCEL no Brasil e regiões (ELETROBRAS; PROCEL, 2007).

A fim de divulgar equipamentos e estratégias projetuais voltadas à eficiência energética de edificações residenciais, a parceria entre Eletrobras, através do PROCEL, Eletrosul e Universidade Federal de Santa Catarina, permitiu a construção da Casa Eficiente. A Casa Eficiente foi concebida seguindo princípios como o uso racional da energia elétrica e o baixo impacto ambiental. Esses pontos nortearam todas as decisões de projeto, no sentido de alcançar a máxima eficiência energética.

Este livro tem o objetivo de apresentar os equipamentos e sistemas relacionados ao consumo e geração de energia na Casa Eficiente. O Capítulo 2 descreve as instalações elétricas da Casa, bem como seu sistema de monitoramento ambiental. O Capítulo 3 apresenta o sistema solar de aquecimento de água. Já o Capítulo 4 trata do sistema de geração de energia solar fotovoltaica interligado à rede, existente na Casa Eficiente. No Capítulo 5 são mostrados experimentos de consumo de energia elétrica, com simulações para diferentes perfis de usuários. Por fim, no Capítulo 6, são relatadas as principais conclusões obtidas a partir dos estudos de consumo e geração de energia na Casa Eficiente.



AEROTEC

## 2. Instalações elétricas da Casa Eficiente

Autora:  
Cláudia Donald Pereira

**Este capítulo descreve as características das instalações elétricas da Casa Eficiente, com a descrição de cada circuito elétrico. Ele também apresenta as medições de consumo de energia realizadas com os equipamentos elétricos da Casa, bem como os resultados obtidos nesse monitoramento.**

O projeto elétrico da Casa Eficiente incluiu todas as necessidades de uma residência de classe média, mas com algumas características diferenciadas para alcançar melhor eficiência energética. No projeto luminotécnico, por exemplo, utilizou-se o conceito de iluminação de tarefa, para racionalizar o uso da iluminação artificial. Os circuitos para iluminação global dos ambientes foram projetados com acionamento independente, de acordo com a proximidade das lâmpadas em relação às aberturas. Em todos os ambientes da Casa, optou-se pelo uso de lâmpadas fluorescentes compactas de 20W (eficiência energética de 57 lm/W), mostradas na Figura 2.1, que apresentam reduzido consumo de energia e elevada vida útil em relação às lâmpadas incandescentes (MACIEL et al., 2006).



FIGURA 2.1 – Lâmpadas fluorescentes compactas utilizadas na Casa Eficiente.

O conceito de iluminação de tarefa diz respeito à definição dos pontos de luz (luminárias) considerando o layout do ambiente e subdividindo-o de acordo com as atividades desempenhadas em cada parte dele. A iluminação de tarefa prioriza a iluminância correta no plano de trabalho, sem a necessidade de iluminação uniforme em todo o ambiente, principalmente em ambientes muito amplos. Com a iluminação apenas na área da tarefa, consegue-se o conforto visual desejado e economia de energia.

Houve, também, uma preocupação com a escolha dos eletrodomésticos da Casa Eficiente. No caso daqueles já classificados pelo Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE), como geladeira e máquina de lavar roupas, foram escolhidos equipamentos avaliados pelo INMETRO com etiqueta “A” de eficiência energética, e com Selo PROCEL.

Quanto à definição dos circuitos elétricos da Casa Eficiente, ela foi realizada de forma a permitir o monitoramento do consumo de energia elétrica da mesma. A Casa está equipada com diversos sensores de medição e um sistema de aquisição de dados responsável pelo monitoramento de variáveis ambientais internas e externas e dos usos finais de energia elétrica. Este sistema de monitoramento é detalhado no item 2.2 deste livro. Tais dados são utilizados por pesquisadores para a avaliação do desempenho termoenergético da edificação (LAMBERTS et al., 2007).

O sistema elétrico da Casa tem fios e cabos distribuídos através de eletrodutos de PVC passando pelo teto, parede e/ou piso. A tubulação é aparente nas paredes e tetos, e é embutida no piso. A instalação de forma aparente proporciona uma racionalização para futuras reformas, além de auxiliar no aspecto educativo, facilitando a visualização e a demonstração do funcionamento. Todos os condutores empregados na instalação foram certificados com a Marca Nacional de Conformidade, conferida pelo INMETRO.

A edificação possui uma potência total instalada de 31 kW, o que permitiu o fornecimento de energia elétrica em baixa tensão (380/220V). A proteção geral da edificação é trifásica de 63A. O quadro de distribuição foi instalado dentro de um armário, no qual foram instalados equipamentos de medição de potências instantâneas de cada circuito elétrico.

A Casa Eficiente possui 24 circuitos elétricos que são controlados por disjuntores localizados no quarto de casal. A Tabela 2.1 apresenta os circuitos da Casa Eficiente, com cada um dos seus componentes. Eles estão identificados conforme a Figura 2.2. Os disjuntores dos circuitos de número 12 e 24 estão separados dos demais, pois correspondem aos inversores do sistema fotovoltaico.

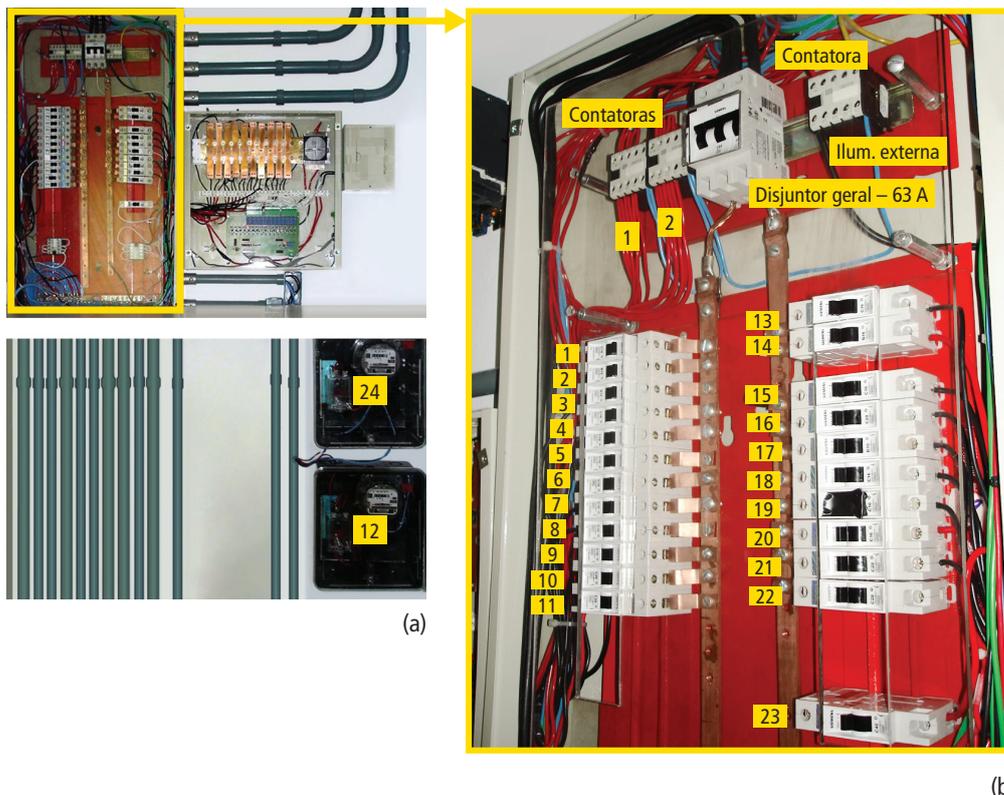


FIGURA 2.2 – Identificação dos circuitos elétricos – (a) visão geral, (b) detalhe.

TABELA 2.1 – Tabela de circuitos elétricos Casa Eficiente.

Circuito	Denominação	Tipo	Qtd.	Localização
1	Iluminação local	Lâmpadas	4	Banheiro: espelho (1)
				Jantar: teto (lâmpada próxima ao computador da sala) (1)
				Cozinha: acima do forno à lenha (1)
				Estar: pendente teto (1)
		Tomadas	6	Jantar: junto à porta Sul (1)
				Mezanino: junto a cada guarda-corpo (2)
2	Tomadas 1	Tomadas	11	Estar: junto à escada (computador da sala) (1); junto à porta Norte (telefones) (1); atrás da TV (4); tomada baixa do abajur (1)
				Quarto casal: tomadas baixas na entrada do quarto (1) e na parede Leste (1)
				Quarto solteiro: junto ao termostato (1)
				Banheiro: ao lado do espelho (1)
3	Tomadas cozinha	Tomadas	4	Cozinha: parede da janela (1); atrás do micro-ondas (1); tomada alta do depurador (1); entre o fogão e o forno a lenha (1);
4	Geladeira	Tomadas	3	Cozinha: acima do balcão da pia (2); tomada alta da geladeira (1)
5	Reserva			
6	Lava-roupas	Tomada	1	Área de serviços: próxima à porta interna (1)
7	Ferro de passar	Tomada	1	Área de serviços: dentro do armário (1)
8	Insuflador 2	Tomada	1	Insuflador quarto casal (1)
9	Motobombas superiores	Tomadas	3	Aquecimento água potável (1)
				Sistema de aquecimento dos quartos (2)
10	Válvulas (solenóides)/ controladores de nível		8	Válvulas solenóides: cisterna água pluvial (1); cisterna água de reuso (1); entre caixas pluvial e potável (1); alimentação água pluvial para sistema aquecimento (1)
				Controladores de nível: cisterna água pluvial (1); cisterna água de reuso (1); caixa água reuso (1); caixa água pluvial (1)
11	Boiler 2		1	Boiler do sistema de aquecimento de água potável para chuveiro/pias (1)
12	Fotovoltaico - A		1	Inversor ligado à Fase A
13	Iluminação geral	Lâmpadas	30	Varanda Sul: arandelas (5)
				Jardim superior Sul: arandelas (2); canteiros (4)
				Varanda Norte: teto (1)
				Externo: arandela parede Norte quarto solteiro (1); arandela parede Norte quarto casal (1)
				Estar: arandelas (2); em frente ao banheiro (1)
				Jantar: teto (3)
				Banheiro: teto (1)
				Cozinha: teto (1)
				Área de serviços: teto (1); depósito (1)
				Corredor para quartos: teto (1)
				Quarto casal: teto (1)
				Quarto solteiro: teto (1)
				Mezanino: teto (1)
Mezanino/Jantar: pendente teto (1)				
Caixa d'água potável: teto (1)				

TABELA 2.1 – Tabela de circuitos elétricos Casa Eficiente (Continuação).

Circuito	Denominação	Tipo	Qty.	Localização
14	Tomadas 2 (uso externo)	Tomadas	8	Jantar: junto ao visor/parede (1)
				Quarto casal: armário (2); tomadas do computador do monitoramento (2)
				Mezanino: junto à porta (1); computador mezanino (1)
				Caixa d'água (1)
15	Forno micro-ondas	Tomada	1	Cozinha: atrás do fogão (1)
16	Secadora de roupas	Tomada	1	Área de serviços: acima do tanque (1)
17	Filtro da água	Tomada	1	Área de serviços: ao lado do filtro (1)
18	Insuflador 1	Tomada	1	Insuflador quarto solteiro (1)
19	Motobombas inferiores	Tomadas	3	Cisterna água pluvial (1); Cisterna zona de raízes (1)
				Bomba dosadora caixa água pluvial (1)
20	Iluminação externa		4	Projetores: fachada Norte (2); fachada Sul (2)
21	Boiler 1		1	Boiler do sistema de aquecimento ambiental
22	Reserva			
23	Chuveiro	Tomada	1	Banheiro (1)
24	Fotovoltaico - B		1	Inversor ligado à Fase B

## 2.1. O consumo dos equipamentos da Casa Eficiente

Todos os eletrodomésticos da Casa (geladeira, forno micro-ondas, computadores, etc.) foram monitorados com um medidor de consumo portátil, marca Yokogawa, modelo MCP 5000, mostrado na Figura 2.3. Este aparelho é capaz de medir consumo (kWh), potência (kW), tensão (V) e corrente elétrica (A). O tempo de medição foi diferenciado para cada equipamento:

- ⚡ Equipamentos que ficam ligados ininterruptamente e/ou que ligam e desligam automaticamente com certo intervalo de tempo, foram monitorados em períodos mais longos (cerca de 24 horas ou mais). Foi o caso da geladeira, do filtro de água e do computador central da Casa Eficiente.
- ⚡ A máquina de lavar roupas, que funciona em ciclos, foi monitorada durante o ciclo completo de lavagem, sendo realizadas medições para ciclos com diferentes durações, e com diferentes níveis de água.
- ⚡ Os demais equipamentos foram monitorados por períodos mais curtos de tempo.

A Tabela 2.2 indica o tempo de medição de cada equipamento. Apenas a geladeira foi monitorada em dois diferentes períodos do ano, pois seu funcionamento sofre interferência das condições de temperatura do ar do ambiente onde está inserida. A partir dos valores obtidos nessas medições, calculou-se a potência média dos equipamentos domésticos. Esses resultados são apresentados na Tabela 2.2. Eles foram também utilizados posteriormente para estudos de consumo elétrico da Casa Eficiente.

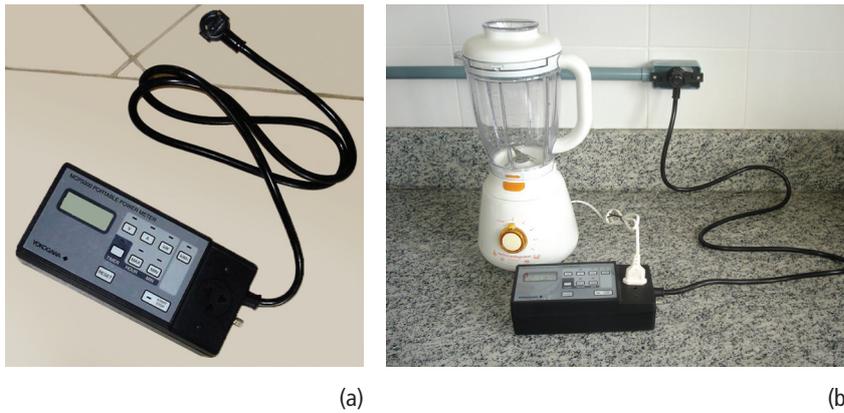


FIGURA 2.3 – Medidor de consumo portátil da marca Yokogawa – (a) equipamento desligado, (b) equipamento em uso.

TABELA 2.2 – Resultados do monitoramento dos eletrodomésticos na Casa Eficiente.

Equipamento - observações	Data - horário	Tempo total da medição [hora]	Consumo [kWh]	Potência [kW]			Tensão [V]		Corrente [A]	
				méd	mín	máx	mín	máx	mín	máx
Geladeira – dia quente: Temperatura externa méd = 26°C	26/3 9:40 a 27/3/07 9:40	24	1,405	0,059	0,000	2,061	207,4	224,0	0,00	11,56
Geladeira – dia frio: Temperatura externa méd = 16°C	23/5 14:30 a 24/5/07 14:30	24	0,940	0,039	0,000	2,235	209,5	224,3	0,02	12,10
Forno Micro-ondas	22/5/07 15:00	0,05	0,044	0,880	1,245	1,614	213,5	214,8	6,14	7,90
Forno Micro-ondas (Stand-By)	29/5/07 13:00	1	0,000	0,000	0,000	0,000	214,8	221,1	0,02	1,38
Fogão 4 bocas (acendendo a lâmpada interna)	22/5/07 16:15	0,033	0,003	0,090	0,000	0,321	216,9	219,3	0,02	1,57
Liquidificador	23/5/07 11:20	0,083	0,015	0,180	0,000	0,279	214,1	216,4	0,03	1,60
Batedeira	23/5/07 11:00	0,1	0,008	0,080	0,000	0,105	215,9	216,9	0,43	0,54
Processador de alimentos	23/5/07 12:00	0,017	0,004	0,240	0,000	0,255	215,4	217,5	0,02	1,17
Filtro da água	29/5 17:40 a 30/5/07 17:10	23,5	0,142	0,006	0,000	1,257	214,1	224,2	0,02	6,15
Máquina de lavar roupa - ciclo E - nível d'água extra baixo	22/05/07 16:45 a 17:30	0,75	0,051	0,068	0,000	0,657	211,8	218,6	0,02	3,20
Máquina de lavar roupa - ciclo D - nível d'água extra baixo	22/06/07 11:30 a 12:48	1,3	0,131	0,101	0,000	0,693	215,2	221,8	0,02	3,34
Máquina de lavar roupa - ciclo D - nível d'água médio	22/06/07 13:00 a 14:38	1,633	0,127	0,078	0,000	0,663	213,6	217,8	0,02	3,13
Ferro de passar	23/5/07 8:30	0,167	0,026	0,156	0,000	1,707	212,8	220,8	8,01	0,02
Aspirador de pó	23/5/07 11:30	0,083	0,073	0,876	0,615	0,942	212,4	215,2	3,60	4,49
Televisão 29"	23/5/07	1	0,102	0,102	0,093	0,105	214,7	219	0,70	0,78
Televisão 29" (Stand-By)	29/5/07	1	0,000	0,000	0,000	0,000	215,0	219,1	0,05	0,10

TABELA 2.2 – Resultados do monitoramento dos eletrodomésticos na Casa Eficiente (Continuação).

Equipamento - observações	Data - horário	Tempo total da medição [hora]	Consumo [kWh]	Potência [kW]			Tensão [V]		Corrente [A]	
				méd	mín	máx	mín	máx	mín	máx
Computador da sala (monitor ligado)	29/5/07	1	0,143	0,143	0,000	0,255	214,8	221,1	0,02	1,38
Computador da sala (monitor desligado)	24/5/07	1	0,094	0,094	0,090	0,105	216,5	218,3	0,61	0,71
Computador mezanino (monitor ligado)	23/5/07	1	0,115	0,115	0,057	0,159	213,7	218,1	0,44	1,10
Computador do monitoramento + HP (monitor desligado)	24/3/07 19:18 a 26/3/07 7:18	36	4,624	0,128	0,126	0,165	195,2	222,8	0,99	18,35

Foi possível constatar que existem diferenças entre alguns valores nominais de consumo de energia dos eletrodomésticos e os valores medidos. Isso acontece pelas diferentes condições verificadas nos ensaios dos fabricantes e nas medições realizadas na Casa Eficiente.

Na geladeira da Casa, o consumo mensal indicado na etiqueta do PBE é de 61 kWh/mês. Já o valor medido em um dia quente, indica um consumo de 1,405 kWh, o que equivaleria a cerca de 42 kWh mensais. Essa diferença pode ocorrer pelas variadas condições de medição: temperatura do ar no ambiente, volume de objetos<sup>1</sup> dentro da geladeira, quantidade de vezes que a geladeira é aberta, etc. O regulamento do INMETRO (2005a) prevê que os ensaios para etiquetagem de refrigeradores devem ser realizados utilizando o máximo possível de carga, ocupando todo o volume interno da geladeira, com o mínimo de espaços livres. Já durante o monitoramento com o medidor portátil na Casa, a geladeira estava vazia.

No caso da máquina de lavar roupas da Casa, o valor nominal indicado na etiqueta do PBE é de 0,23 kWh por ciclo de lavagem. O ciclo de lavagem adotado para os ensaios de PBE é o Normal/Branco/Algodão ou algum equivalente, possibilitando uma comparação mais adequada entre os modelos (INMETRO, 2005b). Além disso, é utilizada a capacidade nominal de carga indicada na máquina. Essas características de ensaio não foram adotadas nas medições realizadas na Casa, as quais utilizaram ciclos de lavagem de curta duração e com variados níveis de água, apontando valores de consumo de 0,051 kWh, 0,131 kWh e 0,127 kWh conforme indicado na Tabela 2.2.

Com esses dados é possível perceber a importância de realizar medições de consumo nas condições normais de uso do eletrodoméstico, pois os valores dos ensaios estabelecidos pelo INMETRO nem sempre correspondem ao que ocorrerá na realidade, na situação de uso.

## 2.2. O sistema de monitoramento da Casa Eficiente

A Casa Eficiente foi construída para, entre outras funções, servir como laboratório de estudo das tecnologias e estratégias ali aplicadas. Por isso, ela possui um sistema de monitoramento termo-energético, com uma série de sensores que medem determinados dados, e estes são armazenados em um microcomputador. Com relação ao monitoramento energético, são registrados dados de potência instantânea, em intervalos de cinco minutos, de cada um dos circuitos elétricos da Casa.

<sup>1</sup> Os ensaios do INMETRO para a etiquetagem de refrigeradores é realizado ocupando o volume interno da geladeira com pilhas de pacotes de 1.000g, 500g e 125g.

Quanto ao monitoramento térmico, existem sensores localizados nas salas de estar e jantar (Figura 2.4), no quarto de solteiro (Figura 2.5), no quarto de casal (Figura 2.6), e no banheiro (Figura 2.7). Existe também um sensor externo (Figura 2.8), localizado em uma parede da varanda frontal (Sul).

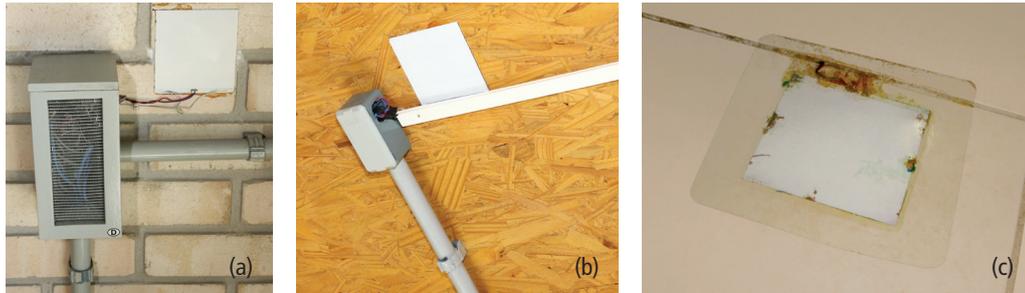


FIGURA 2.4 – Sensores de monitoramento ambiental – (a) parede Oeste da sala de estar, (b) teto da sala de estar e (c) piso da sala de jantar.

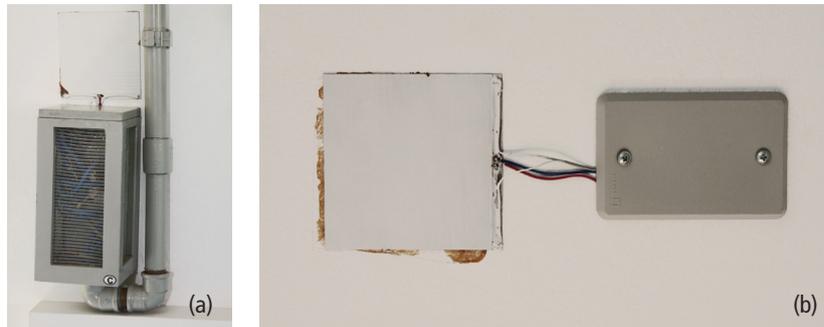


FIGURA 2.5 – Sensores de monitoramento ambiental no quarto de solteiro – (a) parede Norte e (b) teto.

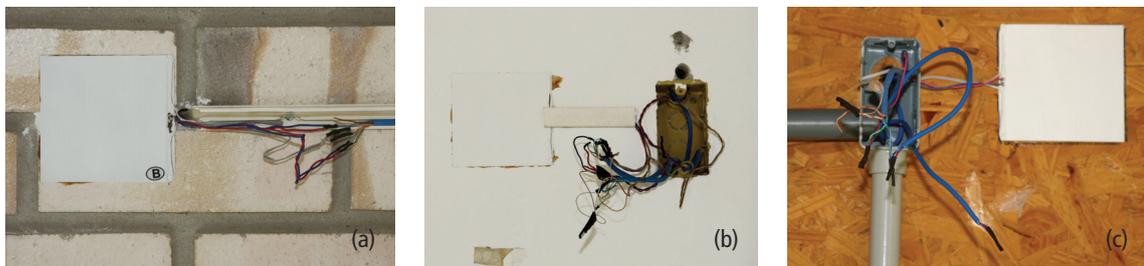


FIGURA 2.6 – Sensores de monitoramento ambiental no quarto de casal – (a) parede Leste, (b) parede Sul e (c) teto.

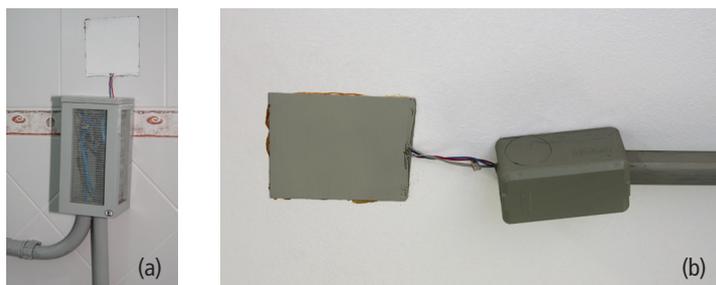


FIGURA 2.7 – Sensores de monitoramento ambiental no banheiro – (a) parede Norte e (b) teto.



FIGURA 2.8 – Sensores de monitoramento ambiental na parede da varanda Sul.

São três os tipos de sensores existentes na Casa para o monitoramento ambiental, capazes de monitorar temperatura do ar, temperatura superficial, umidade relativa do ar e fluxo de calor. Estas variáveis coletadas e os equipamentos do sistema de monitoramento são descritos a seguir:

- ⚡ Temperatura do ar interno próximo à superfície (aproximadamente 5,0cm da superfície) e temperaturas superficiais internas e externas: estas variáveis são obtidas através de sensores do tipo termopar, que possibilitam a leitura da temperatura com base na tensão elétrica gerada pela passagem de corrente em um par de metais. A intensidade da corrente elétrica é posteriormente convertida em temperatura, com o auxílio de um software de controle do sistema de monitoramento.
- ⚡ Umidade do ar: é obtida através de sensores do tipo capacitivo, que possuem faixa de medição compreendida entre 5% e 98% e incerteza de 2%.
- ⚡ Fluxo de calor através das paredes e coberturas: é obtido através de fluxímetros a gradiente tangencial, com espessura igual a 300 micros e medindo 50mm x 50mm.

Para obter as variáveis ambientais externas, foi instalada próxima à Casa Eficiente uma miniestação meteorológica (distante, aproximadamente, 20 metros da Casa), através da qual são adquiridos e registrados dados de temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade e direção dos ventos, radiação solar e precipitação pluviométrica. A miniestação meteorológica da Casa Eficiente é mostrada na Figura 2.9. As variáveis externas são obtidas em intervalos de 1 em 1 minuto.



FIGURA 2.9 – Estação meteorológica instalada ao lado da Casa Eficiente

## 3. Sistema de aquecimento solar de água

Autores:

Samuel Luna de Abreu  
Carlos Eduardo Gonçalves  
Sergio Parizotto Filho

---

**Este capítulo justifica o uso da energia solar para aquecimento de água no Brasil, e apresenta os sistemas de aquecimento solar instalados na Casa Eficiente.**

---

Entre as diversas alternativas para aumentar a eficiência energética e a sustentabilidade das edificações está o aquecimento solar de água e ambientes, em substituição às formas tradicionais de energia. A utilização desse tipo de equipamento na Casa Eficiente tem como objetivo mostrar as vantagens e as questões operacionais adicionais de forma crítica, evidenciando quais são os reais ganhos obtidos com essa tecnologia.

### 3.1. Argumentos para uso da energia solar para aquecimento

O abastecimento energético mundial é, atualmente, uma das questões mais estudadas devido ao quadro de rápidas mudanças ambientais observadas na última década. Neste sentido, a racionalização do uso de energia traduz-se, principalmente, na busca contínua de uma maior eficiência dos equipamentos, assim como no uso mais intenso de fontes renováveis de energia, tal como a solar.

No Brasil, a crise energética de 2001 demonstrou a necessidade urgente de ampliar a participação de outras fontes na matriz energética, diminuindo a dependência pela hidroeletricidade. Esta, apesar de renovável, apresenta problemas como a necessidade de grandes investimentos, impactos ambientais devido às áreas inundadas pela construção de barragens, e recursos hídricos limitados para atender o crescimento significativo da demanda nacional.

Entre as alternativas governamentais propostas para redução do consumo e ampliação da oferta de energia elétrica através do uso dos recursos naturais do país pode-se citar a Lei nº 10.295, de 2001. Essa lei estabelece uma Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia, que tem o objetivo de reduzir a necessidade de investimentos na ampliação da capacidade do sistema elétrico. No setor residencial, a redução do consumo de energia do chuveiro elétrico é uma das alternativas que pode ser utilizada para atender os objetivos propostos na lei, pois o mesmo possui uma taxa de penetração bastante alta no mercado residencial brasileiro. Segundo Eletrobras e Procel (2007), 73% das residências brasileiras possuem chuveiro elétrico, equipamento responsável por, aproximadamente, 24% da energia elétrica consumida. O impacto do uso do chuveiro no sistema elétrico brasileiro é ainda mais evidente durante

o horário de ponta, quando a parcela correspondente ao consumo no setor residencial cresce bastante. Observa-se claramente através da curva de carga diária média por uso final no setor residencial para o Brasil (Figura 3.1(a)) e para a Região Sul (Figura 3.1(b)) a influência do chuveiro sobre o pico de demanda, sendo que para a região Sul a contribuição é ainda maior do que a média brasileira.

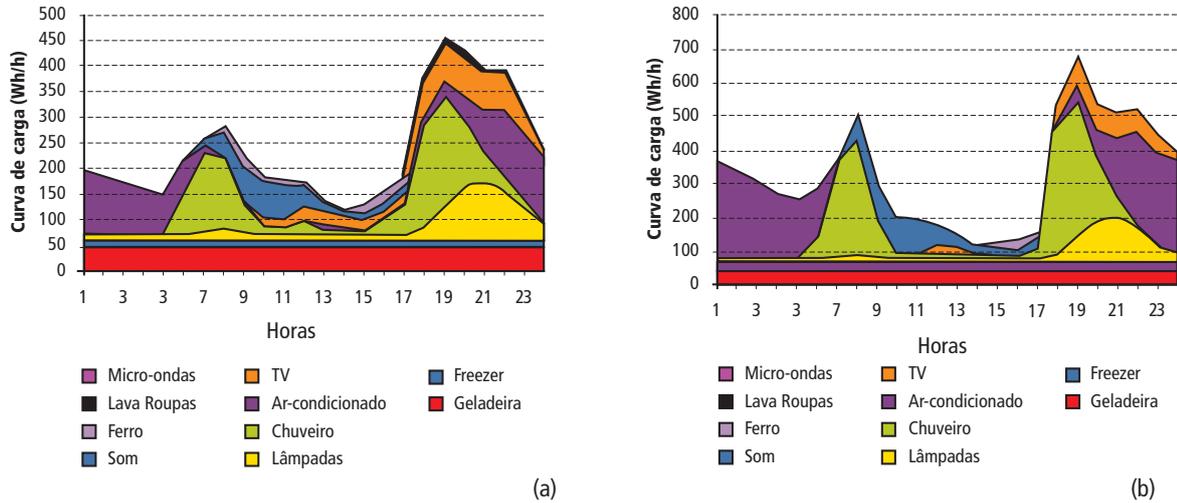


FIGURA 3.1 – Curva de carga diária média do setor residencial por uso final. (a) Brasil, (b) Região Sul. (ELETROBRAS; PROCEL, 2007).

Sistemas de aquecimento solar de água diminuem o consumo no pico de demanda do sistema elétrico nacional, reduzindo investimentos em sistemas de geração, transmissão e distribuição. Sistemas de geração como as hidroelétricas necessitam de enormes volumes de água armazenados para funcionamento das turbinas, promovendo impactos socioambientais como inundações de áreas habitáveis e submersão de áreas verdes. Por sua vez, usinas termoeletricas causam enorme poluição devido à queima de combustíveis fósseis como carvão, óleo diesel e gás natural. Neste contexto, o uso da energia solar para aquecimento de água mostra-se oportuno, pois além de ser uma fonte renovável, limpa e ilimitada, seu potencial de uso é grande em todo território nacional, situado inteiramente em uma região com disponibilidade de níveis de irradiação solar e condições climáticas apropriados para o aquecimento de água.

Segundo estimativas do Atlas Brasileiro de Energia Solar (PEREIRA et al., 2006) a média diária da irradiação solar disponível no Brasil vai de 4,25 kWh/m<sup>2</sup> em alguns locais da região Sul até 6,5 kWh/m<sup>2</sup> no interior da região Nordeste. Comparativamente com outros países, mesmo os menores valores brasileiros são bem melhores. A Alemanha, por exemplo, apesar de possuir uma quantidade *per capita* bem maior de instalações de aquecimento solar (68,18 kWh/1.000 hab contra 11,69 kWh/1.000 hab no Brasil (IEA, 2008)), possui como maiores médias diárias de irradiação solar valores 1,4 vezes inferiores aos menores do Brasil. A Figura 3.2 mostra a distribuição da média diária anual de irradiação solar global no Brasil.

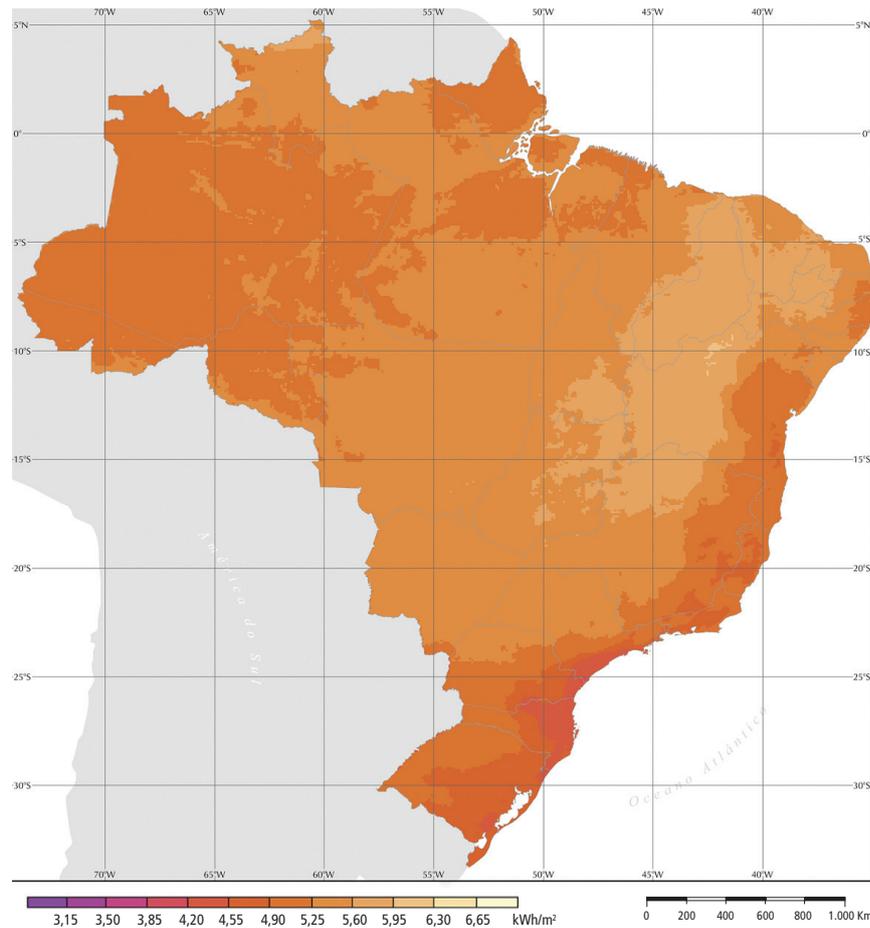


FIGURA 3.2 – Média diária anual da irradiação solar no Brasil (PEREIRA et al., 2006)

Apesar dessa tecnologia já ser utilizada no Brasil, principalmente no setor residencial de média e alta renda, pode-se dizer que ainda é muito pequena a parcela das residências brasileiras que possui sistema de aquecimento solar de água, em contrapartida ao grande potencial existente no país. Tal tecnologia tem sido aplicada também nos setores residencial multifamiliar, hoteleiro e piscinas, porém com pouca penetração no setor industrial.

O uso de sistemas de aquecimento solar em larga escala pode ser conseguido com uma maior divulgação, ou até mesmo com leis e incentivos que favoreçam a sua utilização. Ressalta-se que esse uso pode contribuir também para o desenvolvimento econômico do país, uma vez que esse tipo de tecnologia pode gerar empregos na fabricação, comercialização, projeto, instalação e manutenção de sistemas.

## 3.2. Bases astronômicas e meteorológicas

A energia irradiada pelo sol tem uma característica espectral, ou seja, chega com diferentes intensidades de acordo com o comprimento de onda da radiação emitida. A maior parte da energia irradiada pelo

sol encontra-se na faixa do espectro que vai de 0,3 a 3 $\mu$ m, que efetivamente será transformada em calor pelos coletores solares. A Figura 3.3 mostra as diferentes faixas do espectro de radiação.

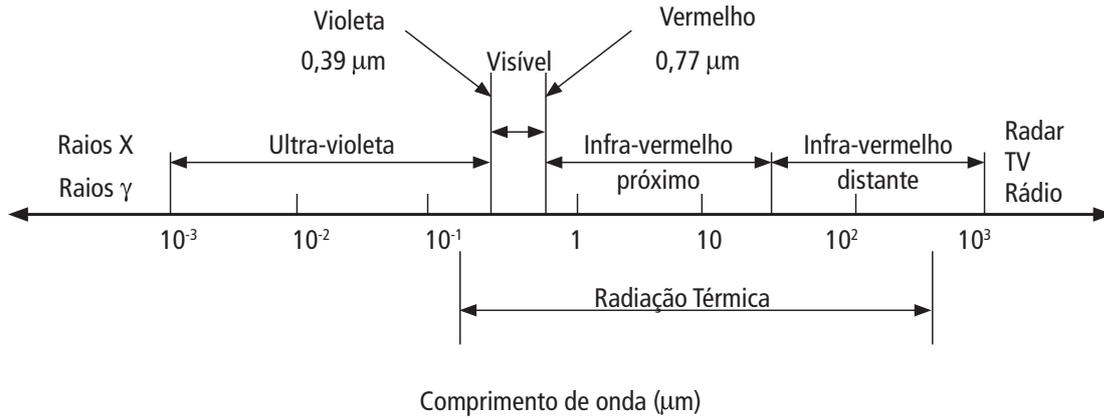


FIGURA 3.3 – Diferentes faixas do espectro de radiação de acordo com o comprimento de onda.

O poder irradiador do sol é virtualmente constante. Sua intensidade medida à distância média entre o Sol e a Terra em uma área unitária perpendicular à direção de sua propagação é descrita como constante solar, possuindo o valor médio de 1.367 W/m<sup>2</sup>. O valor de radiação que efetivamente atinge uma área unitária na superfície terrestre difere da constante solar, variando sua magnitude em função da latitude, da hora do dia, das estações do ano, das condições atmosféricas e da cobertura de nuvens.

A Figura 3.4 ilustra as trajetórias solares na latitude de Florianópolis (27°36'S) no sítio onde está construída a Casa Eficiente. As maiores altitudes solares observadas nos dias de verão justificam a variação da irradiação solar global medida como mostra a Figura 3.5.

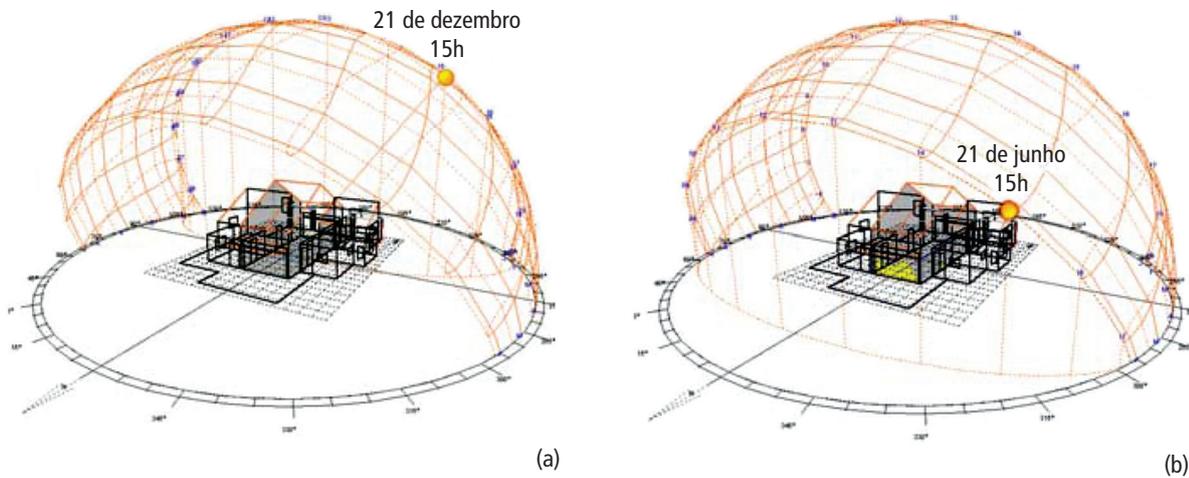


FIGURA 3.4 – Trajetória solar sobre a Casa Eficiente – (a) solstício de verão e (b) solstício de inverno. (Fonte – MACIEL et al., 2006)

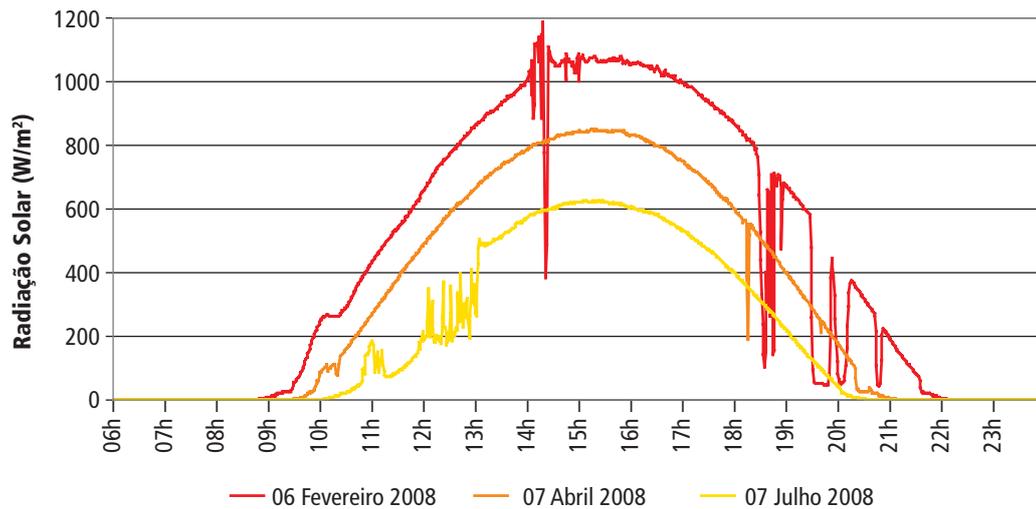


FIGURA 3.5 – Irradiação solar no plano horizontal, em três dias de diferentes meses do ano 2008 em Florianópolis.

A irradiação solar, ao atravessar a atmosfera terrestre, divide-se entre as parcelas direta e difusa. A irradiação direta é a parcela que atinge diretamente a Terra, sendo atenuada pela transmitância da atmosfera. A irradiação difusa é a parcela que sofre um espalhamento pelas nuvens e pelas partículas da atmosfera, sendo refletida na abóbada celeste e nas nuvens e reirradiada para a Terra. A soma das parcelas direta e difusa da irradiação é denominada irradiação solar global. O valor da irradiação solar global disponível é um dos parâmetros fundamentais para o projeto de sistemas de aquecimento solar, pois é usado para estimar o desempenho da instalação.

### 3.3. Aproveitamento térmico da energia solar

O aquecimento de água através da energia solar é feito usando painéis coletores que possibilitam o aquecimento da mesma até temperaturas em torno de 100°C. Geralmente, o coletor é instalado na cobertura das edificações, inclinado de forma a maximizar o ganho energético. Devido à baixa densidade da energia solar que incide sobre a superfície terrestre, o atendimento de uma única residência pode requerer a instalação de uma área razoável de coletores solares. A relação adequada de área de coletores e reservatório térmico deverá ser adequada às condições da instalação, características técnicas dos equipamentos, disponibilidade da irradiação solar no local onde o sistema será instalado e as características de consumo da edificação.

A maior parte do território brasileiro está localizada em uma região tropical, com alta disponibilidade de irradiação solar. Por outro lado, as regiões Sul e Sudeste, cuja demanda energética para aquecimento de água são maiores, são aquelas cujo potencial solar disponível é menor. Por causa disso, é fundamental que se maximize o aproveitamento da energia solar, o que é feito posicionando corretamente os coletores de forma a coincidir o ganho de energia solar à demanda por energia térmica para aquecimento de água. No hemisfério Sul as superfícies que absorvem a maior quantidade de energia solar durante o ano inteiro são as voltadas para o Norte com uma inclinação em relação à horizontal igual à latitude local, porém é usual inclinar a placa um pouco mais para favorecer o ganho de energia solar durante os meses de inverno.

## 3.4. Componentes do sistema de aquecimento solar de água

### 3.4.1. Tipologias

Os sistemas de aquecimento solar de água são basicamente constituídos por coletores solares, reservatório térmico, fonte auxiliar de energia, sistemas de controle e rede de distribuição de água aquecida. Os sistemas de aquecimento solar são classificados de acordo com a NBR15.569 (ABNT, 2008b) conforme o arranjo, circulação, regime, armazenamento, alimentação e alívio de pressão. Dentro dessa classificação destaca-se o tipo de circulação que pode ser passivo (termo-sifão natural), quando a circulação da água ocorre exclusivamente por diferença de densidade, ou ativo, quando ocorre circulação forçada através de uma bomba. A mesma norma não se refere à classificação quanto ao uso de aquecimento e consumo em circuitos diferentes. Nesse caso, o sistema pode ser direto, quando o fluido aquecido é o próprio fluido a ser consumido (água) ou pode ser indireto, quando se usa um circuito fechado para o fluido que circula nas placas e um trocador de calor para transferir a energia térmica absorvida para a água de consumo.

### 3.4.2. Coletor solar

É o dispositivo responsável pela captação da energia solar e conversão desta em energia térmica. Existem diversos modelos de coletores solares que diferem na forma construtiva e aplicação dos mesmos. Para uso em aquecimento residencial os coletores solares estão divididos basicamente em: planos, tubos evacuados e sem cobertura.

Os coletores planos são de concepção bastante simples, sendo compostos basicamente por uma placa absorvedora, gabinete isolado termicamente e cobertura de vidro. Os coletores de tubo evacuado possuem tecnologia mais sofisticada, diferindo dos de placa plana pelo uso do vácuo como isolante térmico e, em alguns casos, tubos de calor para transferir o calor da placa coletora para o fluido, permitindo obter eficiências maiores a temperaturas mais altas. Os coletores sem cobertura, geralmente construídos de material polimérico, não possuem isolamento térmico e cobertura de vidro, fazendo com que sua eficiência seja baixa a temperaturas mais altas, sendo então usados com mais frequência para aquecimento de piscinas.

O coletor plano é, atualmente, o mais empregado no setor residencial brasileiro, destinando-se à produção de água quente a temperaturas inferiores a 100°C. As vantagens do coletor plano são a simplicidade construtiva, boa relação de custo para a temperatura de trabalho desejada, durabilidade e fácil manutenção. Por causa disso foi o escolhido para os sistemas de aquecimento solar de água da Casa Eficiente. Na Figura 3.6 pode-se observar um coletor solar de placa plana típico, com seus principais componentes em destaque.

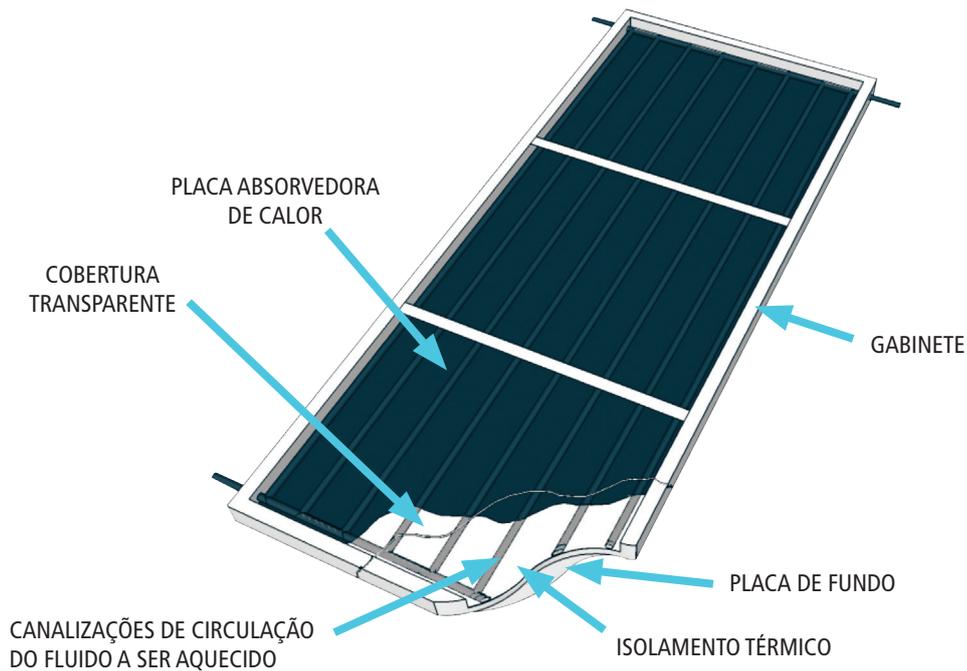


FIGURA 3.6 – Detalhes construtivos de um coletor solar de placa plana.

Nos coletores solares de placa plana, a energia solar atravessa a cobertura de vidro sendo absorvida pela placa coletora, geralmente construída de cobre ou alumínio. Propriedades óticas seletivas são desejáveis para o material usado para recobrir a placa coletora de forma que a absorção da irradiação solar seja máxima, ao mesmo tempo em que as perdas por emissão térmica sejam mínimas. A placa coletora funciona como uma aleta, transportando o calor do fluido para uma serpentina de tubos de cobre conectada termicamente à placa por onde circula o fluido a ser aquecido. O processo de acoplamento entre a placa e a serpentina deve garantir uma pequena resistência térmica, sendo preferíveis soldagem ou brasagem em vez de contatos apenas mecânicos. O isolamento localizado na parte posterior e nas laterais da placa diminui as perdas térmicas para o ambiente, enquanto que a cobertura de vidro diminui as perdas por radiação e minimiza a convecção sobre a placa coletora, mantendo uma camada de ar estacionária sobre a mesma. A cobertura de vidro deve ser limpa regularmente para manter sua eficiência com relação à passagem da irradiação solar.

### 3.4.3. Reservatórios térmicos

Quanto ao armazenamento, a quase totalidade dos sistemas de aquecimento solar de água para fins residenciais é por acumulação, pois a potência de aquecimento das placas coletoras é inferior à demanda instantânea de água aquecida. Além disso, como os períodos de consumo podem ocorrer em momentos distintos ao período de ganho de energia térmica solar, o uso de termo-acumulação é praticamente indispensável.

O reservatório possui grande influência no custo global, desempenho e confiabilidade do sistema, sendo sua correta escolha fundamental para o sucesso dos objetivos pretendidos com a instalação. Alguns

fatores a serem considerados na escolha do reservatório térmico são desempenho térmico, volume de água necessário, sistema de aquecimento auxiliar, necessidade de trocador de calor, material de revestimento, finalidade do uso da água, qualidade da água disponível, localização, espaço e acessibilidade.

Devido à variação do peso específico da água em função de sua temperatura, ocorre dentro do reservatório a estratificação vertical de temperaturas. A água fria que entra no tanque tende a se posicionar abaixo da água aquecida que já se encontra no mesmo. Neste sentido, tanques verticais são os mais recomendados, pois acentuam a estratificação térmica melhorando a eficiência global do sistema. Porém, no mercado brasileiro tanques horizontais são mais comuns devido ao uso da circulação natural, o que faz com que reservatórios verticais tenham seu uso limitado por causa da altura disponível.

### 3.4.4. Sistema de aquecimento auxiliar

Para que o sistema de aquecimento solar fornecesse toda a demanda de água quente seria necessário dimensioná-lo considerando o pior cenário possível em termos de disponibilidade de irradiação solar, resultando em um sistema superdimensionado para a maior parte do tempo de uso e, conseqüentemente, com uma baixa viabilidade econômica. Neste sentido, frações solares na faixa de 60 a 80% são usadas com mais frequência atualmente.

Portanto, é necessário usar uma fonte auxiliar de calor para períodos de insolação insuficiente, que pode ser um aquecedor elétrico, a queima de algum combustível ou uma bomba de calor. No Brasil, a grande maioria dos sistemas funciona com resistências elétricas instaladas no interior do reservatório térmico, devido à simplicidade e ao baixo custo desse tipo de instalação. Em sistemas de grande porte também são bastante usados sistemas de aquecimento auxiliar a gás, internos ou externos ao reservatório térmico.

### 3.4.5. Controles e acionamentos

A função dos sistemas de controle e acionamento é garantir que o sistema de aquecimento solar funcione aproveitando ao máximo a energia solar disponível, ao mesmo tempo em que as demandas de aquecimento necessárias sejam atendidas. Esses sistemas podem incorporar diversas alternativas, permitindo acrescentar métodos de controle mais sofisticados, que permitam alterar configurações de funcionamento para melhorar o desempenho do sistema.

Basicamente, três controles estão disponíveis: acionamento do sistema de aquecimento auxiliar, acionamento da bomba de circulação para os coletores e agenda de eventos. O acionamento do sistema de aquecimento auxiliar mais comum é um termostato ligado diretamente no reservatório térmico. Outra possibilidade é usar um controlador que habilita ou desabilita o fornecimento de energia para o sistema de aquecimento auxiliar de acordo com a temperatura medida no reservatório. Em ambos os casos é necessário manter uma diferença entre as temperaturas de acionamento e desligamento do aquecimento auxiliar para evitar que isso ocorra com uma frequência muito alta.

A bomba de circulação entre as placas e o reservatório térmico é necessária em sistemas de grande porte ou quando as placas estão situadas acima do nível do reservatório, impedindo a circulação natural. O controle de acionamento da bomba é um controle diferencial feito com dois sensores de temperatura, um situado nas placas e outro no reservatório térmico. Dessa forma, a bomba só é acionada quando

uma diferença de temperatura desejada for alcançada, e desligada a partir do momento que a diferença é pequena, sinalizando que não existe mais ganho quando da circulação de água pelas placas. O mesmo controle também pode ser utilizado para evitar o congelamento das placas, ligando a bomba sempre que a temperatura das placas ficar próxima de 0°C.

O outro tipo de controle utilizado é uma agenda de eventos que anula a possibilidade de ligar o sistema de aquecimento auxiliar mesmo que a temperatura no reservatório térmico esteja abaixo da indicada pelo termostato. A utilidade desse controle é evitar o aquecimento desnecessário da água no reservatório em períodos em que não há consumo. Por exemplo, durante a madrugada a água não deverá ser aquecida, pois só haverá consumo no dia seguinte e, caso esse consumo não seja no período matinal, ele pode, inclusive, ser suprido pelo próprio sistema de aquecimento solar. Outra utilidade da agenda de eventos é evitar o ligamento do sistema de aquecimento solar durante o horário de pico, servindo, dessa forma, como uma ferramenta de gerenciamento pelo lado da demanda.

### 3.5. Sistemas de aquecimento solar da Casa Eficiente

Seguindo o objetivo básico do projeto que é o de demonstrar o máximo possível de alternativas para uso eficiente e sustentável dos recursos energéticos, a Casa Eficiente possui dois sistemas de aquecimento solar independentes, um para aquecimento de água para consumo e outro para aquecimento de ambientes.

Os dois sistemas possuem configuração semelhante, sendo compostos cada um por dois coletores solares planos de 1,4m<sup>2</sup> e um reservatório térmico horizontal de 200 litros, com aquecimento auxiliar interno feito por uma resistência elétrica de 1500W. Ambos os sistemas funcionam por circulação forçada, visto que as placas coletoras situam-se acima do nível do reservatório térmico. As Figuras 3.7 e 3.8 mostram as placas coletoras instaladas nos telhados laterais da Casa Eficiente e a Figura 3.9 mostra uma foto do reservatório térmico instalado.



FIGURA 3.7 – Sistemas de aquecimento solar da Casa Eficiente – à esquerda para aquecimento de ambientes e à direita para aquecimento de água para consumo.



FIGURA 3.8 – Detalhe das placas coletoras sobre o telhado da Casa Eficiente.



FIGURA 3.9 – Reservatório térmico usado na Casa Eficiente.

O sistema para aquecimento de ambientes funciona como uma demonstração do uso dessa tecnologia, possuindo dois circuitos independentes de circulação forçada de água quente. O primeiro circuito, acionado por um sistema de controle diferencial de temperatura, localiza-se entre o reservatório térmico e as placas coletoras e tem a função de absorver a energia solar. O segundo circuito leva água aquecida do reservatório térmico até os ambientes, circulando nos mesmos por uma tubulação próxima ao rodapé, que funciona como um aquecedor. A bomba de circulação desse sistema é acionada sempre que a temperatura nos quartos estiver abaixo do valor desejado.

O sistema de aquecimento de água para uso doméstico fornece água aquecida para os banheiros, cozinha e lavanderia da Casa Eficiente. O circuito entre o reservatório térmico e as placas coletoras é idêntico

ao do sistema anterior, porém não existe um segundo circuito fechado para o consumo. Nesse sistema a água quente consumida é reposta com água fria do reservatório de água tratada. Com relação ao dimensionamento, pode-se considerar que esse sistema é adequado para uma família de quatro pessoas, na qual a demanda é principalmente para banho.

### 3.6. Funcionamento dos sistemas de aquecimento solar da Casa Eficiente

Para um controle adequado do funcionamento de um sistema de aquecimento solar é necessário que algumas variáveis sejam monitoradas. No caso de um projeto experimental, como a Casa Eficiente, o ideal é que se conheça o funcionamento do equipamento com o maior número de detalhe possível, pois um dos tópicos que deve ser analisado em um projeto de pesquisa como esse é a influência de parâmetros operacionais sobre o desempenho do sistema. Em um sistema residencial normal também é necessário que existam sensores que permitam ao usuário avaliar o desempenho do sistema, pois a existência do sistema de aquecimento auxiliar pode mascarar um funcionamento inadequado do sistema. Neste item, serão analisados os dados que foram medidos e suas limitações quanto às informações fornecidas.

#### 3.6.1. Diagrama de funcionamento e variáveis medidas nos sistemas de aquecimento solar

O esquema de funcionamento do sistema de aquecimento de água para consumo doméstico é mostrado na Figura 3.10. Para um completo monitoramento do funcionamento desse sistema seria desejável possuir os valores das variáveis medidas nos pontos indicados. Porém, alguns valores não foram medidos, outros foram medidos apenas pelos sistemas de controle (não foram registrados) e apenas alguns foram registrados.

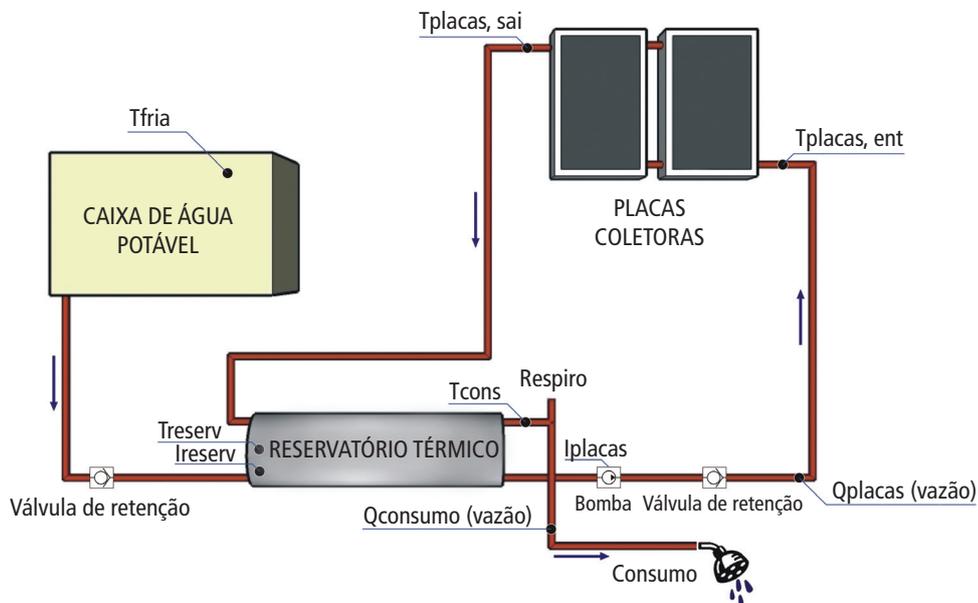


FIGURA 3.10 – Diagrama de funcionamento do sistema de aquecimento solar para fornecimento de água quente para consumo.

A Tabela 3.1 mostra as variáveis medidas e registradas. Pode-se observar que mesmo nessas variáveis existem limitações quanto à confiabilidade dos resultados que podem ser auferidos a partir dos valores medidos. Por exemplo, a temperatura do reservatório térmico é medida na superfície externa do mesmo e, portanto, difere do valor real da temperatura em seu interior. Foi observado também que os valores medidos pelo sensor utilizado para acionamento do controle da temperatura do reservatório térmico diferem dos do sensor colocado, cujos dados são adquiridos e armazenados. Isso pode ter sido causado pela falta de confiabilidade do sensor utilizado ou pela dificuldade de medir essa temperatura pelo lado externo do reservatório. Outra observação é que o ponto de controle para acionamento da bomba de circulação era próximo à bomba em vez de ser junto ao reservatório. A temperatura nesse ponto é inferior à temperatura no interior do reservatório e, portanto, o acionamento da bomba poderá ocorrer antes do desejado, comprometendo o desempenho do sistema.

TABELA 3.1 – Variáveis medidas e armazenadas pelo sistema de aquisição de sinais da Casa Eficiente no sistema de aquecimento solar para fornecimento de água quente para consumo.

Símbolo	Variável	Observações
$T_{reserv}$	Temperatura do reservatório térmico	Sensor fixado no centro da parede externa do boiler.
$I_{placas}$	Corrente da bomba de circulação das placas	Sensor eletromagnético conectado ao fio fase da bomba
$I_{reserv}$	Corrente do aquecedor auxiliar do reservatório	Sensor eletromagnético conectado ao fio fase do resistor

O sistema para aquecimento de ambientes é apresentado esquematicamente na Figura 3.11. Pode-se observar os dois circuitos independentes, entre reservatório térmico e placas coletoras e entre reservatório térmico e ambientes a serem aquecidos. O primeiro circuito funciona da mesma forma que o circuito equivalente do sistema para aquecimento de água de consumo. Já o segundo circuito possui um sensor de controle da temperatura interna de um dos ambientes, semelhante a um termostato, que liga a bomba de circulação sempre que a temperatura estiver abaixo do valor desejado e a desliga quando ele é alcançado.

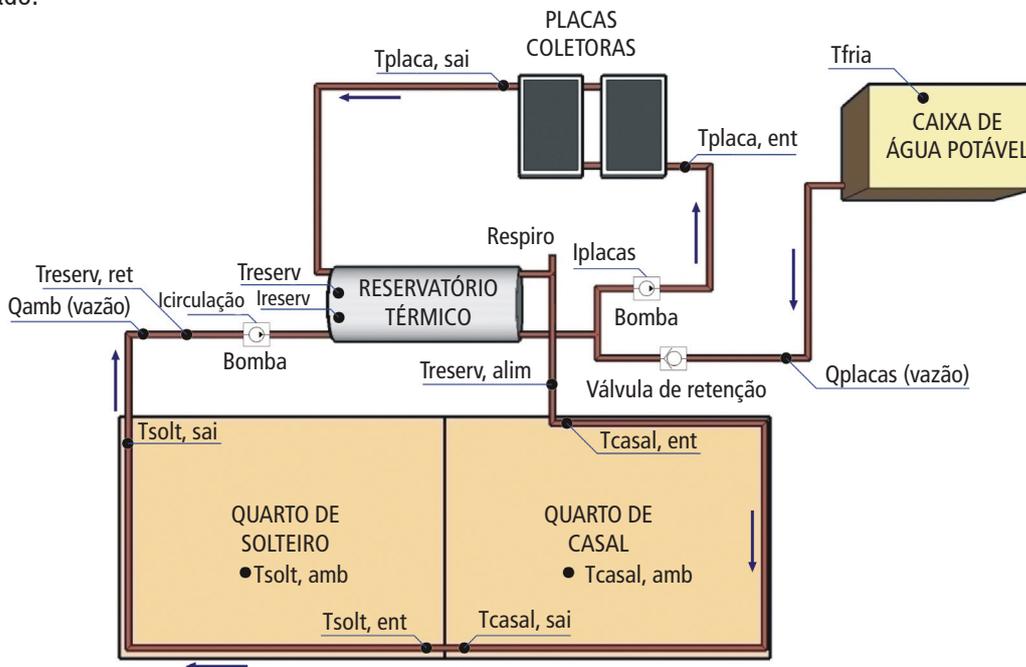


FIGURA 3.11 – Diagrama de funcionamento do sistema de aquecimento solar para ambientes.

Os pontos de controle estão listados na Tabela 3.2 e possuem limitações quanto à confiabilidade semelhantes às do outro sistema. Outro ponto a ser destacado é que o controle da temperatura é feito em apenas um dos ambientes, pois o circuito é comum a ambos. Por causa disso não há garantia que o ambiente não controlado fique na temperatura desejada.

TABELA 3.2 – Variáveis medidas e armazenadas pelo sistema de aquisição de sinais da Casa Eficiente no sistema de aquecimento solar para ambientes.

Símbolo	Variável	Observações
$T_{reserv}$	Temperatura do reservatório térmico	Sensor fixado no centro da parede externa do boiler
$T_{reserv,alim}$	Temperatura da tubulação de alimentação	Sensor fixado na tubulação de saída do reservatório térmico da água ambiente (antes da circulação nos quartos)
$T_{reserv,ret}$	Temperatura da tubulação de retorno	Sensor fixado na tubulação de entrada do reservatório térmico da água ambiente (após circulação nos quartos)
$T_{casal,amb}$	Temperatura ambiente do quarto de casal	Sensor fixado no centro do quarto a aproximadamente 1,60m
$T_{casal,ent}$	Temperatura de entrada da tubulação no quarto de casal	Sensor fixado na tubulação no ponto de entrada da água quente
$T_{casal,sai}$	Temperatura de saída da tubulação no quarto de casal	Sensor fixado na tubulação no ponto de saída da água quente
$T_{solt,amb}$	Temperatura ambiente do quarto de solteiro	Sensor fixado no centro do quarto a aproximadamente 1,60m
$T_{solt,ent}$	Temperatura de entrada da tubulação no quarto de solteiro	Sensor fixado na tubulação no ponto de entrada da água quente
$T_{solt,sai}$	Temperatura de saída da tubulação no quarto de solteiro	Sensor fixado na tubulação no ponto de saída da água quente.
$I_{placas}$	Corrente da bomba de circulação das placas	Sensor eletromagnético conectado ao fio fase da bomba
$I_{circulação}$	Corrente da bomba de circulação dos ambientes	Sensor eletromagnético conectado ao fio fase da bomba
$I_{reserv}$	Corrente do aquecedor auxiliar do reservatório	Sensor eletromagnético conectado ao fio fase do resistor

Ao lado da Casa Eficiente existe uma estação meteorológica onde são medidas: temperatura ambiente, umidade, pressão, irradiação solar global, luminosidade, precipitação pluviométrica e velocidade e direção do vento. A caracterização meteorológica do sítio é fundamental para verificação da eficiência do sistema de aquecimento solar, porém o usuário deve ter condições de estimar sua economia de energia mesmo sem esses dados.

### 3.6.2. Testes de funcionamento dos sistemas

Com o objetivo de avaliar o desempenho do sistema de aquecimento solar, foram delineados alguns experimentos que envolviam o monitoramento de algumas variáveis para diferentes configurações operacionais. Os primeiros testes programados visavam avaliar a influência da temperatura do reservatório sobre o desempenho do sistema e da diferença de temperatura de liga/desliga do sistema de bombeamento entre reservatório e placas coletoras. Os resultados obtidos seriam correlacionados com a eficiência global diária e instantânea do sistema de forma que pudessem ser comparados com valores simulados e com valores recomendados pelos fabricantes de equipamentos.

Algumas dificuldades foram encontradas quando se deu início aos testes previstos. Após o término da construção da Casa Eficiente e antes do início dos testes programados, algumas operações de

manutenção foram feitas no sistema, fazendo com que o mesmo não estivesse funcionando corretamente. Por causa disso optou-se por inicialmente fazer uma série de testes de funcionamento, após os quais os erros foram corrigidos e algumas limitações de monitoramento foram detectadas.

Com relação ao sistema de aquecimento solar para aquecimento de ambientes, uma metodologia semelhante foi utilizada, porém ainda não foi feito um modelo detalhado do sistema que permita uma comparação dos dados obtidos com valores estimados. Por causa disso, inicialmente será dada maior atenção ao aquecimento de água para consumo doméstico.

A Figura 3.12 mostra a variação da temperatura no reservatório térmico e a corrente na bomba de circulação em uma sequência de dias sem consumo de água e com o aquecimento auxiliar desligado. Durante o período em que não há insolação, o comportamento da temperatura segue o esperado, apresentando uma diminuição suave durante todo o período noturno. Já durante o dia, pode-se observar algumas anomalias no funcionamento do sistema. A primeira delas é a brusca queda de temperatura que ocorre no início da manhã, que pode ter ocorrido devido ao fato de o sensor da temperatura do reservatório para acionamento da bomba estar localizado próximo dessa bomba. A temperatura nesse ponto será bem mais baixa que no reservatório e, portanto, qualquer aquecimento nas placas fará com que a bomba seja ligada mesmo sem necessidade. Tal fato não foi comprovado, visto que as temperaturas de controle da bomba não são armazenadas e também porque o intervalo de medição da corrente da bomba é de cinco minutos, impedindo que eventos de curta duração sejam observados. Outra observação é a alta oscilação da temperatura no reservatório associada a uma operação da bomba com grande quantidade de eventos liga/desliga. Isso ocorre caso a vazão das bombas seja muito alta em relação à inércia térmica dos coletores, fazendo com que sua temperatura caia rapidamente e a bomba seja desligada. Porém, tal explicação não seria suficiente para justificar a grande oscilação da temperatura no reservatório térmico durante esses períodos. Observou-se que toda vez que a bomba desligava, parte da água retornava para o reservatório térmico, fazendo com que certa quantidade da água quente fosse despejada na caixa de água pluvial através do respiro do sistema. Dessa forma, toda vez que a bomba era acionada, o reservatório térmico tinha de ser completado com água fria. Esse problema corrobora a observação da baixa inércia do sistema em relação à vazão de água nas placas, pois como elas ficam parcialmente vazias quando a bomba está desligada, sua temperatura sobe rapidamente e os intervalos de funcionamento da bomba serão bastante curtos.

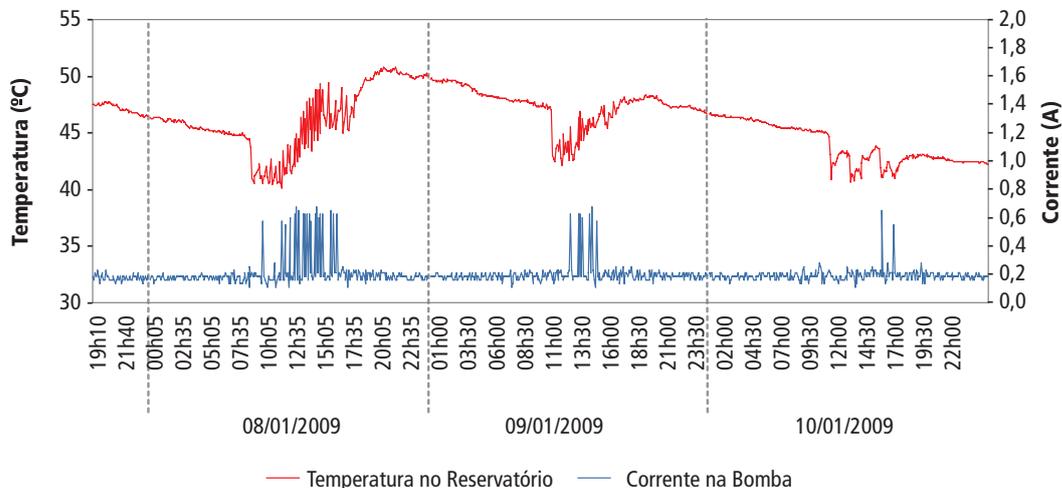


FIGURA 3.12 – Variação ao longo do dia da temperatura no reservatório térmico e corrente na bomba do sistema de aquecimento solar para consumo de água quente (sem consumo de água e com o aquecimento auxiliar desligado).

Com relação à quantidade de água quente fornecida na condição em que o sistema de aquecimento auxiliar estava desligado, a demanda precisaria ser complementada por um aquecedor de passagem situado próximo ao ponto de consumo. Outra observação foi o alto tempo de ajuste para conseguir a temperatura de banho, o que implica em um gasto extra de água até a estabilização da temperatura. As vazões foram medidas recolhendo-se a água no ponto de consumo, porém existem hidrômetros que medem o consumo de água como mostra a Figura 3.13. Os hidrômetros não são os equipamentos mais adequados para monitorar o experimento quando se deseja conhecer os valores transientes do consumo de água aquecida e ganho térmico solar, nesse caso sensores que permitissem medir e armazenar as vazões instantâneas seriam mais adequados.



FIGURA 3.13 – Hidrômetros de medição de volume total de água consumido.

Para testar o funcionamento do sistema de aquecimento ambiental foi escolhida uma temperatura de 30°C para os ambientes a serem climatizados. A razão da escolha dessa temperatura alta foi o fato de os testes terem sido realizados no verão e, portanto, caso fosse escolhida uma temperatura mais próxima do conforto o sistema não seria acionado. A Figura 3.14 mostra as temperaturas ao longo do dia para o sistema de aquecimento dos ambientes. Observa-se que a temperatura no reservatório fica oscilando dentro do intervalo determinado pelo termostato, porém as temperaturas de entrada e retorno dos ambientes a serem climatizados são praticamente iguais, mostrando que a quantidade de calor utilizada para aquecimento do ambiente é muito baixa. Durante todo o período de testes a temperatura de 30°C não foi atingida nos ambientes, ficando a bomba de circulação ligada continuamente. A utilização de trocadores de calor mais eficientes pode corrigir essa situação.

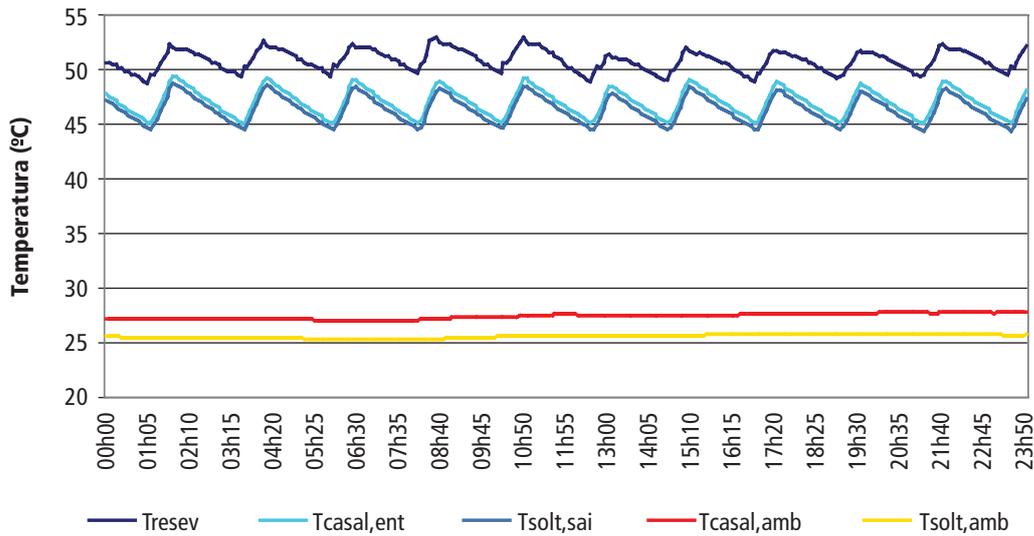


FIGURA 3.14 – Variação ao longo do dia das temperaturas do sistema de aquecimento solar de ambientes.

### 3.7. Recomendações para continuidade dos experimentos

A maior limitação encontrada para a realização dos experimentos foi a falta de um monitoramento mais adequado do funcionamento dos sistemas, de forma que problemas de operação fossem detectados e corrigidos com mais facilidade. A falta de manuais de operação e uma descrição detalhada das instalações conforme executadas também é um ponto a ser melhorado na continuidade do projeto.

O uso das instalações integradas a uma edificação onde diversas alternativas eficientes e sustentáveis são utilizadas fornece inúmeras oportunidades de desenvolvimento científico e tecnológico da utilização de sistemas de aquecimento solar. Decisões técnicas comuns e decorrentes normalmente das práticas corriqueiras de engenharia podem ser facilmente analisadas, discutidas, criticadas e/ou comprovadas através da reprodução de situações realistas utilizando a Casa Eficiente como um laboratório. A comparação de diferentes tecnologias também é facilmente realizada, sendo necessária apenas a troca de equipamentos ou instalação de novos.

A instalação de um sistema de aquisição de dados dedicado exclusivamente aos sistemas de aquecimento solar daria maior flexibilidade para a realização de experimentos, ao mesmo tempo em que permitiria a instalação de todos os sensores necessários para monitorar os sistemas. Dessa forma, qualquer alteração de configuração que fosse feita, não interromperia nenhum dos outros experimentos em andamento na casa.

Além das melhorias no sistema de monitoramento, também poderiam ser instaladas novas alternativas de sistemas de aquecimento solar como coletores de tubo evacuado e coletores plásticos sem cobertura. Dessa forma, seria possível demonstrar o desempenho das três tecnologias mais utilizadas para aquecimento solar em uma mesma residência, mostrando aspectos positivos e negativos de cada uma delas.

O sistema para aquecimento dos ambientes também poderia ser melhorado, fazendo controles independentes para cada ambiente e, também, instalando radiadores para melhorar as trocas térmicas.

Esse sistema poderia ser utilizado complementarmente ao sistema para aquecimento de água, fornecendo energia adicional nos dias em que o aquecimento de ambientes não é necessário.

O problema do consumo de água também poderia ser melhor equacionado através do estudo de alternativas como a instalação de um anel de circulação, aquecimento de passagem com controle eletrônico no ponto de consumo ou mesmo reposicionamento do reservatório térmico próximo ao ponto de consumo.



## 4. Sistema de geração de energia solar fotovoltaica

Autores:

Trajano de Souza Viana

Alexandre Albuquerque Montenegro

Ricardo Rüter

---

Este capítulo apresenta os fundamentos da energia solar fotovoltaica, a classificação e composição dos sistemas destinados à geração de energia elétrica e descreve o sistema fotovoltaico conectado à rede instalado na Casa Eficiente. São apresentados e analisados resultados de geração e de desempenho do referido sistema.

---

### 4.1. Energia solar fotovoltaica

O Sol é uma fonte abundante e renovável de energia. O total de energia vinda do Sol que incide sobre a superfície terrestre, em 24 horas, é superior à demanda energética mundial para um ano inteiro. A energia solar pode ser utilizada para, por exemplo, aquecer água ou ser convertida diretamente em eletricidade. Esta última aplicação está bastante difundida em vários países, como Alemanha, Espanha, Japão e Estados Unidos.

A conversão da energia solar diretamente em eletricidade ocorre devido ao chamado “efeito fotovoltaico” e é realizada pelos dispositivos fotovoltaicos (FV). Essa conversão ocorre de modo silencioso, sem emissão de gases, sendo desnecessária a assistência de operador para o sistema. É importante ressaltar que somente a componente luminosa da energia solar (fótons) é útil para a conversão fotovoltaica. A componente térmica da energia solar (radiação infravermelha) é utilizada em outros tipos de aplicações, tais como o aquecimento de água ou a geração de energia elétrica através de sistemas termo-solares com concentradores.

#### 4.1.1. Células solares fotovoltaicas – tecnologias

O efeito fotovoltaico ocorre nas células solares fotovoltaicas, que são dispositivos construídos com materiais semicondutores. As células fotovoltaicas produzidas comercialmente, destinadas a aplicações terrestres, utilizam principalmente duas tecnologias: uma baseada no silício cristalino na forma de finas fatias de silício (Si), com espessura entre 0,18 e 0,25mm, e outra baseada em filmes finos, que consiste na deposição de películas de diferentes materiais sobre uma base ou substrato (RÜTHER, 2004).

Essas duas tecnologias, do silício cristalino e dos filmes finos, utilizam os seguintes tipos de materiais semicondutores:

- ⚡ silício cristalino:
  - ⚡ silício monocristalino (m-Si)
  - ⚡ silício policristalino (p-Si)

- ⌘ filmes finos:
  - ⌘ silício amorfo (a-Si)
  - ⌘ telureto de cádmio (CdTe)
  - ⌘ disseleneto de cobre e índio (CuInSe<sub>2</sub>) ou CIS
  - ⌘ disseleneto de cobre, índio e gálio (CuInGaSe<sub>2</sub>) ou CIGS
  - ⌘ silício microcristalino ( $\mu$ c-Si)

As células fotovoltaicas possuem dois terminais que apresentam tensão elétrica em torno de 0,6V, quando as mesmas são expostas à luz solar. Salvo poucas aplicações não é comum utilizar-se uma única célula para fornecer energia elétrica, sendo mais usual a utilização de conjuntos de células para alimentar determinado consumidor.

#### 4.1.2. Módulo fotovoltaico

Um conjunto de células solares fotovoltaicas devidamente interligadas e acondicionadas forma o módulo fotovoltaico. A quantidade de células conectadas em série determina a tensão de operação do módulo e a quantidade de células conectadas em paralelo influencia na capacidade de corrente do módulo.

Os módulos fotovoltaicos são projetados e fabricados para: acomodar as células e as respectivas interligações elétricas, proporcionar suporte estrutural e proteção contra danos mecânicos e agentes ambientais externos, tais como sol, chuva, ventos e outros agentes climáticos, com expectativa de operar nessas condições por 30 anos ou mais (RÜTHER, 2004).

Quando um módulo é exposto à radiação solar apresenta em seus terminais uma tensão contínua. Os valores de tensão (V), corrente (A) e potência (W) de um módulo são especificados pelo fabricante e são medidos sob determinadas condições, denominadas “condições-padrão de referência para ensaio”, simbolizadas por STC<sup>2</sup> (ABNT, 2006).

Os módulos constituídos de células de silício cristalino são normalmente rígidos e os de filme fino podem ser construídos sobre vidro rígido, ou sobre substratos flexíveis, constituindo uma opção para instalação sobre superfícies curvas, como coberturas ou fachadas de edificações, além de serem relativamente mais leves. As tecnologias de filmes finos são também bastante promissoras pelo fato de utilizarem pouca energia e pouca matéria prima na sua fabricação e por apresentarem grande potencial de redução de custos, se houver produção em grande escala. As células de filme fino de silício microcristalino são células híbridas, como as desenvolvidas pela SANYO e pela SONTOR, compostas por uma fina fatia de silício monocristalino entre duas películas de silício amorfo (SANYO, 2008; SONTOR, 2008). A tecnologia do silício cristalino (m-Si e p-Si) representa cerca de 80% da produção mundial de módulos e os 20% restantes estão divididos pelos diferentes tipos de filmes finos.

Os módulos atualmente disponíveis no comércio, baseados no silício cristalino, apresentam eficiência de conversão da energia solar em energia elétrica, na faixa de 13 a 18%. A tecnologia de filme fino apresenta eficiência na faixa 6 a 11%, dependendo do material semicondutor empregado (a-Si, CdTe, CIS ou CIGS) (MAYCOCK; BRADFORD, 2007). A eficiência se traduz, em termos práticos, em maior ou menor necessidade de área para obter uma mesma potência instalada de módulos fotovoltaicos (Wp)<sup>3</sup>.

2 As condições-padrão de referência para ensaio, simbolizadas por “STC” (do inglês *Standard Test Conditions*) são: temperatura de junção da célula em 25°C, irradiância total de 1.000 W/m<sup>2</sup> normal à superfície de ensaio e espectro AM 1,5 (ABNT, 2006).

3 Wp (watt-pico) simboliza a potência que é obtida de um módulo ou painel fotovoltaico nas condições-padrão para ensaio (STC).

Em uma instalação fotovoltaica específica pode ser utilizado apenas um módulo, mas normalmente são utilizados vários módulos associados eletricamente, compondo o painel fotovoltaico ou gerador fotovoltaico.

#### 4.1.3. Sistemas fotovoltaicos (SFV)

Sistema fotovoltaico (SFV) é a denominação que recebe o conjunto de elementos necessários para realizar a conversão direta da energia solar em energia elétrica, com características adequadas para alimentar aparelhos elétricos e eletrônicos, tais como lâmpadas, televisores, geladeiras e outros. O SFV tem o painel fotovoltaico como principal componente e pode incluir, dependendo da aplicação, dispositivos para controle, supervisão, armazenamento e condicionamento de energia elétrica. Fazem parte também de um SFV a fixação, a estrutura de suporte e a fundação, quando necessária.

Os sistemas fotovoltaicos são classificados em: sistemas isolados e sistemas conectados à rede (ABNT, 2008a).

a) Sistemas isolados: são aqueles que não possuem conexão com a rede elétrica pública de fornecimento de energia. Os sistemas isolados normalmente necessitam de um banco de baterias para armazenar a energia gerada e fornecê-la nos períodos nos quais não há radiação solar. Os sistemas fotovoltaicos que se enquadram neste caso usualmente têm os seguintes componentes principais: painel fotovoltaico, controlador de carga, banco de baterias e inversor, como mostrado na Figura 4.1. O controlador de carga é um aparelho eletrônico destinado a controlar e monitorar a carga e/ou a descarga do banco de baterias e o inversor é o aparelho que converte a tensão contínua, proveniente do painel fotovoltaico ou do banco de baterias, em tensão alternada, com características adequadas para alimentação de aparelhos elétricos e eletrodomésticos comuns.

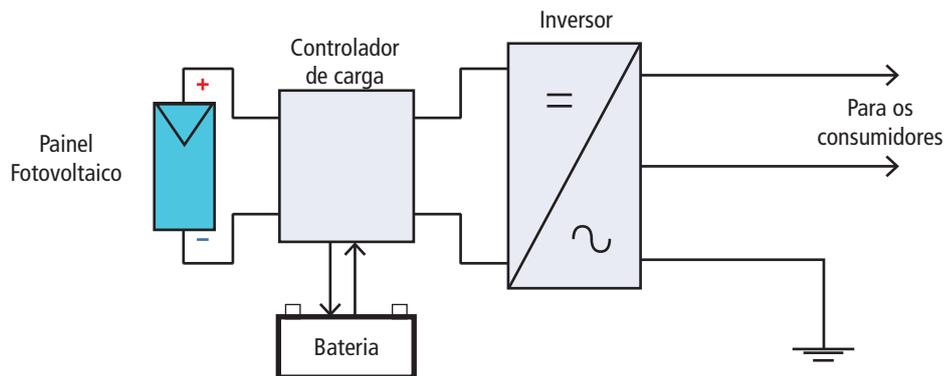


FIGURA 4.1 – Constituição básica do sistema fotovoltaico isolado.

b) Sistemas conectados à rede: são aqueles efetivamente conectados à rede elétrica pública. Neste caso, a energia gerada é injetada diretamente na rede e não há necessidade de banco de baterias. Os sistemas conectados são constituídos basicamente de painel fotovoltaico e inversor, aos quais se somam os componentes de comando e proteção (chaves, fusíveis, disjuntores, etc.). A Figura 4.2 ilustra a constituição básica deste tipo de sistema no qual o inversor, ao detectar a presença da rede, converte a tensão contínua vinda do painel fotovoltaico em tensão alternada, com o mesmo padrão de tensão, frequência e fase da rede elétrica à qual está conectado. A energia é injetada diretamente na rede elétrica e o inversor se desliga automaticamente, cessando o fornecimento, caso seja desconectado da rede ou a rede seja desenergizada.

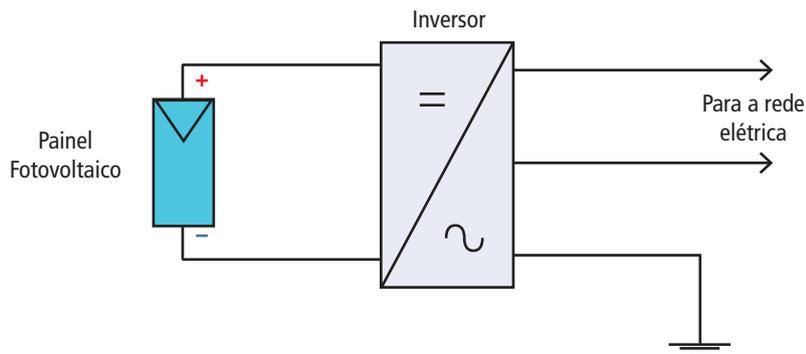


FIGURA 4.2 – Constituição básica do sistema fotovoltaico conectado à rede.

Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede podem ser instalados como uma planta fotovoltaica, gerando energia de forma centralizada, semelhante a uma usina geradora convencional. A planta normalmente é situada distante do ponto de consumo e necessita de linhas de transmissão para levar a energia gerada à rede elétrica dos consumidores.

Outro modo de instalar os sistemas fotovoltaicos conectados à rede é integrá-los às edificações urbanas, como casas e edifícios, na cobertura ou na fachada. Neste caso, a geração é descentralizada e ocorre junto ao ponto de consumo, pois a energia gerada pode ser utilizada pela própria edificação. Caso haja geração que exceda o consumo, o excedente é enviado para a rede pública, sendo utilizado por outros consumidores. Quando a geração for insuficiente para atender ao consumo da edificação, a energia virá da rede elétrica pública. Esse tipo de sistema integrado a edificações, pelo fato de não necessitar de linhas de transmissão, tem a vantagem de evitar as perdas de energia que ocorrem nessas linhas, como acontece no caso das plantas centralizadas, cuja energia gerada deve ser levada até aos consumidores pelas linhas de transmissão.

Do ponto de vista de instalações elétricas e da construção civil as tecnologias necessárias à integração de sistemas fotovoltaicos às edificações já estão bem estabelecidas. Os componentes para os sistemas são comercialmente disponíveis e a conexão à rede pode ser executada sem qualquer problema de ordem elétrica.

A utilização de sistemas fotovoltaicos integrados às edificações tem crescido em diversos países, principalmente na Alemanha, Espanha, Japão e Estados Unidos. O principal objetivo desses sistemas é a geração descentralizada de energia elétrica, a partir do Sol, para contribuir com a matriz elétrica e reduzir a emissão de gases do efeito estufa, provenientes de usinas movidas a combustíveis fósseis e não renováveis.

Além da contribuição energética e ambiental, os aspectos arquitetônicos e de conforto ambiental também têm sido levados em conta em muitos projetos, aumentando a contribuição da tecnologia fotovoltaica para a edificação. Os edifícios solares fotovoltaicos integram a sua fachada e/ou cobertura módulos que geram energia elétrica e, ao mesmo tempo, servem como material de revestimento e/ou elemento de composição arquitetônica.

Em vários países da Europa, bem como no Japão e nos Estados Unidos, a geração de energia elétrica, de forma integrada à edificação, já é uma realidade, havendo a expectativa de que no futuro quase todas as edificações tenham sistemas fotovoltaicos integrados, algumas gerando energia equivalente ao próprio consumo (PEREZAGUA, 2007).

No Brasil um dos exemplos de aplicação deste conceito encontra-se na Casa Eficiente, onde está instalado um sistema solar fotovoltaico conectado à rede com o painel integrado à cobertura. Outros sistemas deste tipo têm sido instalados e avaliados durante vários anos sob diversos aspectos (arquitetônico,

energético, econômico, de eficiência e confiabilidade), com resultados apresentados em artigos nacionais e internacionais (RÜTHER, 1998; VIANA et al., 2007; RÜTHER et al., 2008).

Atualmente, o objetivo de um bom projeto não é mais simplesmente criar uma edificação que seja esteticamente agradável. Os edifícios do futuro devem atender também a aspectos ambientais e a integração entre elementos fotovoltaicos e arquitetura é o desafio para a nova geração de edifícios. Os sistemas fotovoltaicos serão uma unidade nos edifícios modernos, integrados nas coberturas ou nas fachadas (SICK; ERGE, 1996). Quando os módulos são integrados de maneira elegante e esteticamente agradável geram bons exemplos de aplicação, que podem ser utilizados para convencer clientes, arquitetos e o público em geral, do papel positivo dessa tecnologia, seja em termos de desempenho energético ou da disponibilidade de um elemento construtivo completo (PRASAD; SNOW, 2005). Há a expectativa de que os módulos fotovoltaicos estejam disponíveis em uma grande variedade de elementos construtivos, sendo uma opção de material a ser empregado na edificação (PEREZAGUA, 2007).

A Alemanha, um dos principais mercados da tecnologia fotovoltaica, instituiu tarifas diferenciadas para a energia gerada pelos sistemas fotovoltaicos integrados às edificações. As concessionárias de energia alemãs são obrigadas a comprar toda a energia gerada pelos SFVs a uma tarifa quase 3 vezes maior do que a tarifa convencional, com tarifa diferenciada garantida por 20 anos (ALEMANHA, 2004). Este programa tornou atrativo o investimento em SFVs conectados à rede e propiciou o desenvolvimento da tecnologia. O custo desse programa de incentivo é diluído na tarifa de energia de todos os consumidores, proporcionando um impacto desprezível (menor do que 1%) na conta mensal de cada consumidor.

A conexão de sistemas fotovoltaicos à rede elétrica, diferentemente de países como a Alemanha, não é ainda regulamentada no Brasil. Isto significa que não há garantia de compra, pela concessionária local, da energia gerada e injetada na rede nem definição do valor a ser pago por tal energia. No entanto, diversas iniciativas estão em andamento no sentido de legislar e regulamentar o assunto, sendo a mais recente a Portaria Nº 36 de 26/11/2008 da Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético, do Ministério de Minas e Energia, que cria o GT-GDSF, Grupo de Trabalho de Geração Distribuída com Sistemas Fotovoltaicos.

A finalidade do GT-GDSF é elaborar estudos, propor condições e sugerir critérios destinados a subsidiar uma proposta de política de utilização de geração fotovoltaica conectada à rede, em particular integrada em edificações urbanas, como um fator de otimização da gestão da demanda de energia e de promoção ambiental do País, em curto, médio e longo prazo (BRASIL, 2008b).

No âmbito das normas técnicas relativas à energia solar fotovoltaica, a Comissão de Estudos de Sistemas de Conversão Fotovoltaica de Energia Solar, da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), trabalha na revisão e atualização de normas, já tendo como resultados a publicação da NBR 10899:2006 - Energia solar fotovoltaica – Terminologia e da NBR 11704:2008 - Sistemas fotovoltaicos – Classificação. A NBR 11876 - Módulos fotovoltaicos – Especificação, já revisada, encontra-se em fase de consulta nacional, devendo ser publicada brevemente e a NBR 11877 - Sistemas fotovoltaicos – Especificação encontra-se em processo de revisão.

## 4.2. Sistema Fotovoltaico da Casa Eficiente

O sistema fotovoltaico da Casa Eficiente é do tipo conectado à rede elétrica e integrado à edificação. Este sistema possui potência nominal de 2,25 kWp e está operando desde 28 de julho de 2006. Pelo fato

de ser conectado à rede elétrica o sistema dispensa o uso de baterias e, por ser integrado à cobertura da edificação, não ocupa área do terreno exclusiva para instalação.

Os principais componentes do sistema fotovoltaico da Casa Eficiente são:

- ⌘ 30 módulos de silício policristalino (p-Si), 75 Wp cada, totalizando 2,25 kWp;
- ⌘ 2 chaves seccionadoras com fusíveis de 50 A;
- ⌘ 2 inversores de 1200 W;
- ⌘ 2 medidores de energia monofásicos e
- ⌘ 2 disjuntores monopolares de 10 A.

O sistema é dividido em dois subsistemas, cada um com 15 módulos (1,125 kWp) conectados a um inversor. As saídas dos inversores são ligadas na rede elétrica da casa. Deste modo, a energia elétrica gerada é utilizada para atender ao consumo da casa e o excedente é levado para a rede elétrica pública.

A geração do sistema fotovoltaico depende basicamente das características dos módulos (eficiência e coeficientes de temperatura), do posicionamento do painel fotovoltaico (orientação e inclinação), das características dos inversores (eficiência) e do nível anual da irradiação no local (kWh/m<sup>2</sup>). Nesse caso, o painel fotovoltaico está orientado para o Norte geográfico e possui inclinação igual à latitude local (Florianópolis, 27°). Essa orientação e inclinação proporcionam o melhor aproveitamento energético da radiação solar ao longo do ano quando se trata de sistemas conectados à rede.

Além da orientação e da inclinação, outro fator deve ser levado em conta ao posicionar o painel fotovoltaico de um sistema: a ocorrência de sombreamento. O sombreamento de parte do painel pode comprometer significativamente a geração, reduzindo o desempenho do sistema. Portanto, na fase de projeto do sistema, deve ser observada a existência de elementos que possam sombrear o painel e verificar esta possibilidade para todos os dias do ano, por meio de programas específicos como, por exemplo, o Ecotect (ECOTECT, 2008). No caso da Casa Eficiente não existem elementos no entorno que possam sombrear o painel fotovoltaico.

A Figura 4.3 mostra a fachada Norte da Casa Eficiente. Sobre a cobertura vêem-se, à esquerda e à direita, coletores solares destinados ao aquecimento de água e, na parte central, vê-se o painel fotovoltaico.



FIGURA 4.3 – Vista da fachada Norte da Casa Eficiente com o painel fotovoltaico integrado na parte central da cobertura.

A Figura 4.4 mostra em destaque o painel fotovoltaico do sistema, composto de 30 módulos de silício policristalino (p-Si).



FIGURA 4.4 – Painel fotovoltaico do sistema, composto de 30 módulos de silício policristalino (p-Si).

As partes esbranquiçadas observadas nos módulos da Figura 4.4, características das células de silício policristalino, são devidas aos diversos cristais de silício que compõem a estrutura do material. Algumas partes podem ser vistas com mais nitidez na Figura 4.5.



FIGURA 4.5 – Aspecto característico de células de silício policristalino, com partes claras devidas aos diversos cristais que compõem a estrutura do material.

O diagrama esquemático do sistema, mostrando a configuração em dois subsistemas, é apresentado na Figura 4.6, no qual podem ser observadas as interligações elétricas dos módulos e dos demais componentes.

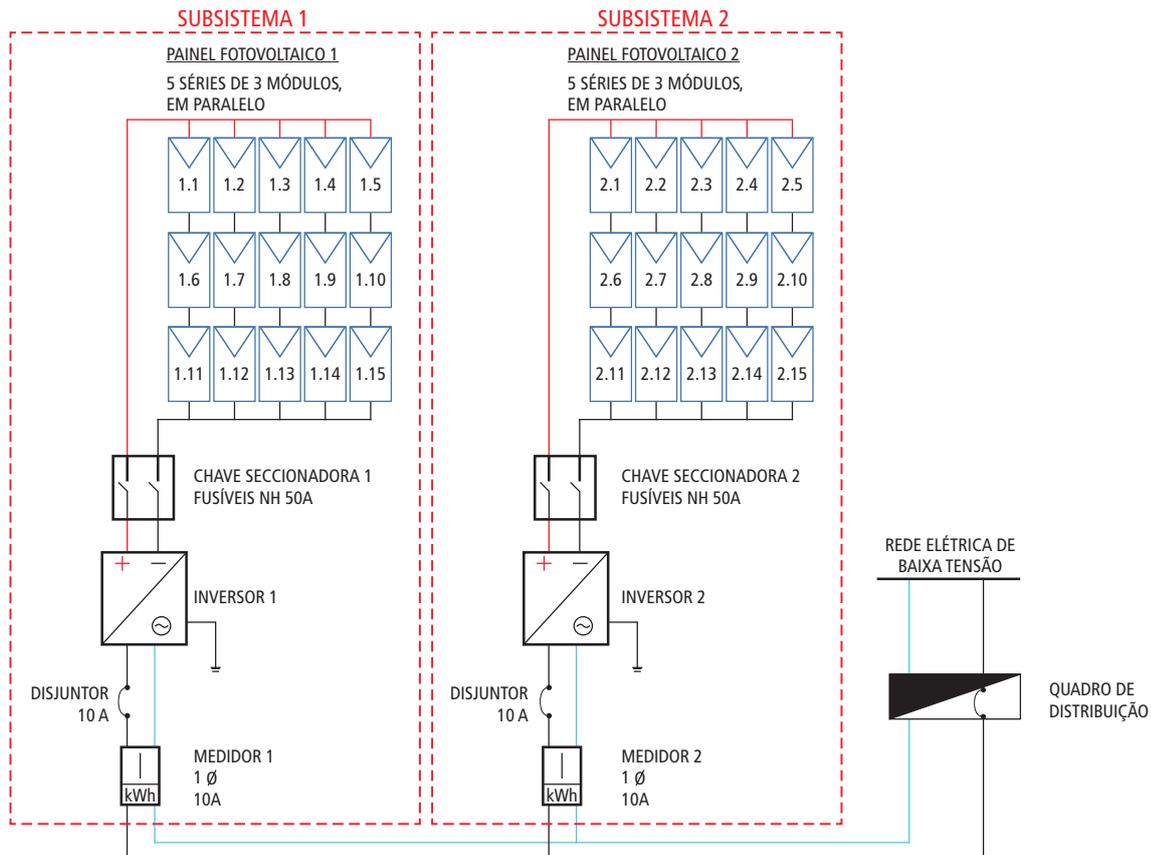


FIGURA 4.6 – Diagrama esquemático do sistema fotovoltaico de 2,25 kWp da Casa Eficiente, mostrando os componentes dos dois subsistemas.

A Figura 4.7 mostra o local da instalação dos inversores, chaves seccionadoras (com fusíveis internamente) e as respectivas ligações. Os medidores e disjuntores estão instalados próximo ao quadro de distribuição no qual o sistema é conectado à rede.



FIGURA 4.7 – Inversores e chaves seccionadoras do sistema fotovoltaico.

As Tabelas 4.1 e 4.2 apresentam as principais características elétricas e mecânicas dos módulos fotovoltaicos e dos inversores, obtidas nas folhas de dados técnicos fornecidas pelos respectivos fabricantes.

TABELA 4.1 – Principais características dos módulos fotovoltaicos utilizados na Casa Eficiente.

Característica	Especificação/Valor
Material das células	Silício policristalino (p-Si)
Potência nominal (Wp)	75,0 W
Tensão no ponto de potência máxima ( $V_{MPP}$ )	16,7 V
Corrente no ponto de potência máxima ( $I_{MPP}$ )	4,49 A
Tensão de circuito aberto ( $V_{OC}$ )	20,6 V
Corrente de curto-circuito ( $I_{SC}$ )	4,90 A
Comprimento	1.105 mm
Largura	660,4 mm
Espessura	51 mm
Peso	9,5 kg
Obs.: As características elétricas podem variar dentro de um limite de 10% dos valores indicados para $I_{SC}$ , $V_{OC}$ e Potência, sob condições-padrão de referência para ensaio (STC): irradiância de 1.000 W/m <sup>2</sup> , temperatura da junção da célula 25°C e espectro AM 1,5.	

TABELA 4.2 – Principais características dos inversores utilizados na Casa Eficiente.

Característica	Especificação/Valor
Potência de saída continuamente (3h a 30°C)	1.000 W CA
Potência máxima de entrada	1.200 W CC
Eficiência máxima	94%
Potência consumida da rede	9 W
Consumo durante a noite	0 W
Faixa de tensão de entrada	35 - 60 V
Faixa de tensão no ponto de potência máxima (MPP)	26,5 - 40 V
Tensão de saída	230 V AC, senoidal, 60 Hz
Faixa de temperatura ambiente	-10 a +50 °C
Grau de umidade permitido	< 90%, sem condensação
Emissão de ruído	< 30 dB
Classe de proteção	IP 20, opcionalmente IP 54
Transformador de isolamento	Núcleo toroidal
Material da caixa	Alumínio anodizado
Dimensões A x L x P	450 x 275 x 180 mm
Peso	18 kg

#### 4.2.1. Desempenho do Sistema Fotovoltaico da Casa Eficiente

Conforme mostrado no diagrama da Figura 4.6, foram instalados dois medidores de energia (Medidor 1 e Medidor 2), um para cada subsistema, os quais acumulam o valor de energia gerada desde o início da operação.

No início da operação foi observado que a geração dos dois subsistemas apresentava diferença da ordem de até 30%. Após examinar e testar o painel fotovoltaico, que não apresentou qualquer problema, constatou-se que um dos inversores apresentava temperatura de operação maior que a do outro, fazendo com que parte da energia gerada fosse transformada em calor e dissipada no ambiente, antes de passar pelo medidor. A solução foi contatar o fornecedor para providenciar o reparo do inversor defeituoso. O outro inversor opera sem problema desde o início da operação.

A Figura 4.8 mostra a geração acumulada do sistema fotovoltaico ao longo dos anos de 2007 e 2008. Observa-se que o crescimento é aproximadamente linear, com pequenas flutuações devidas a variações sazonais e climáticas.

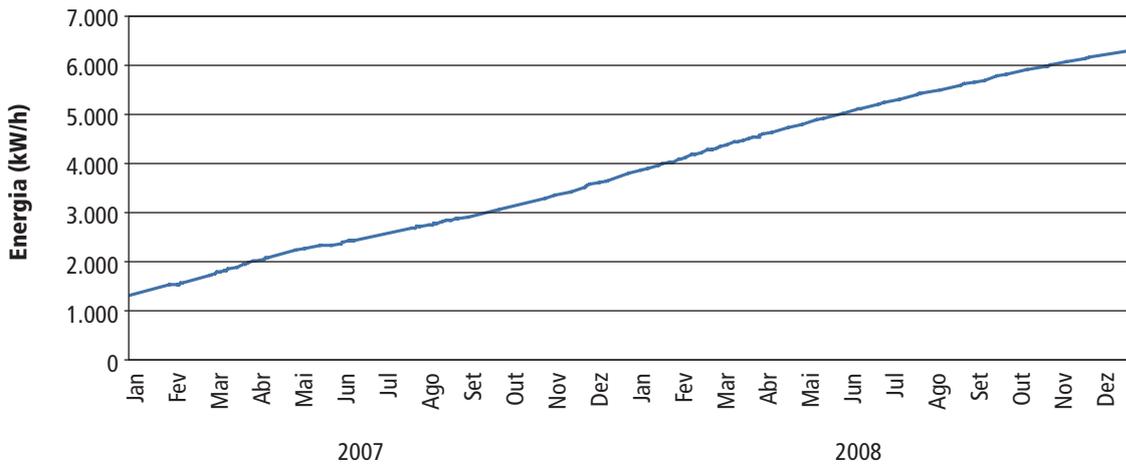


FIGURA 4.8 – Geração acumulada do sistema fotovoltaico durante os anos de 2007 e 2008.

A Tabela 4.3 apresenta os valores referentes à geração do sistema para os anos de 2007 e 2008. São apresentados também os valores da geração média mensal para cada ano e da produtividade anual do sistema (*Yield*), dada em kWh/kWp.

TABELA 4.3 – Geração anual do SFV, geração média mensal e produtividade.

Ano	Geração (kWh)	Geração média mensal (kWh)	Produtividade (kWh/kWp)
2007	2.494	208	1.109
2008	2.506	209	1.114

O desempenho desse sistema fotovoltaico – com produtividade média de 1.112 kWh/kWp, obtida durante os anos de 2007 e 2008 – é comparável à produtividade do sistema de 2 kWp instalado no Laboratório de Energia Solar (LABSOLAR) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), cuja produtividade, em 10 anos de operação, variou entre 1.140 e 1.240 kWh/kWp (RÜTHER et al., 2008). Os dois sistemas estão instalados sob as mesmas condições de orientação (Norte) e de inclinação (27°), sem sombreamento dos respectivos painéis fotovoltaicos e situados a aproximadamente 500 metros um do outro. Essas características proporcionam condições solarimétricas e climatológicas semelhantes, o que possibilita comparar o desempenho dos dois sistemas.

A título de comparação, a Figura 4.9 mostra a produtividade mensal durante o ano de 2007 dos dois sistemas. Pode se observar que a produtividade de ambos segue aproximadamente o mesmo perfil ao longo do ano, com as flutuações naturais devidas à variação sazonal da radiação solar.

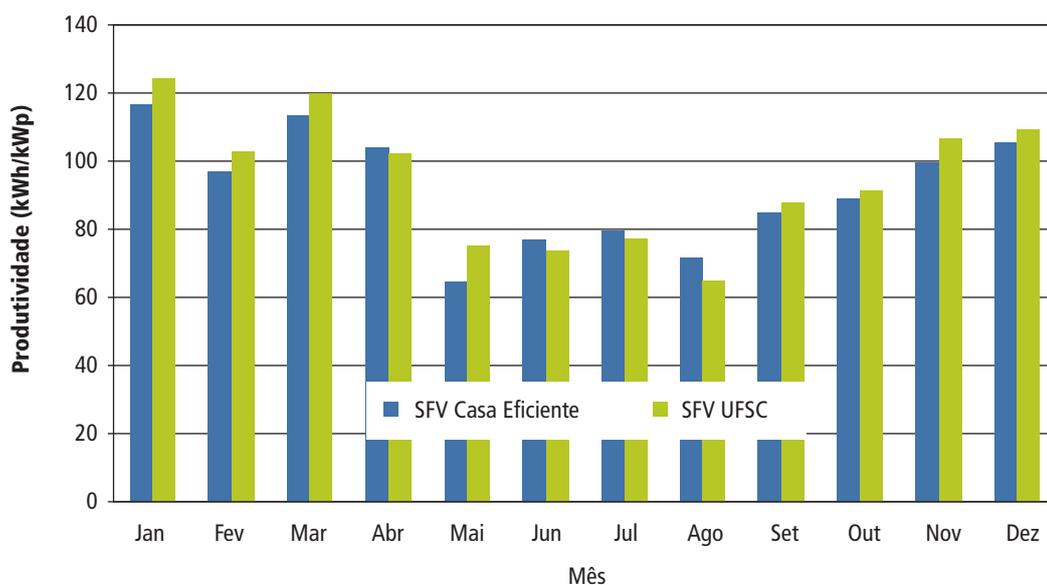


FIGURA 4.9 – Produtividade mensal dos sistemas da Casa Eficiente e da UFSC, para o ano de 2007.

Em novembro de 2008 foi instalado na Casa Eficiente um novo medidor, eletrônico e bidirecional, que mede energia (Wh) a cada 5 minutos. O medidor registra os valores de energia consumida da rede elétrica e de energia enviada para rede, fornecida pelo sistema fotovoltaico, durante períodos de 5 minutos. A parcela de energia que é enviada para a rede corresponde à geração do sistema fotovoltaico menos a parte consumida pelos aparelhos elétricos da Casa.

A Figura 4.10 mostra o fluxo de energia obtido com o medidor bidirecional, durante o dia 05/11/2008, que teve as características de um dia claro, com pouca ocorrência de nuvens. A linha vermelha indica que a energia consumida pela Casa é proveniente da rede elétrica e a linha azul indica que a Casa envia energia para a rede.

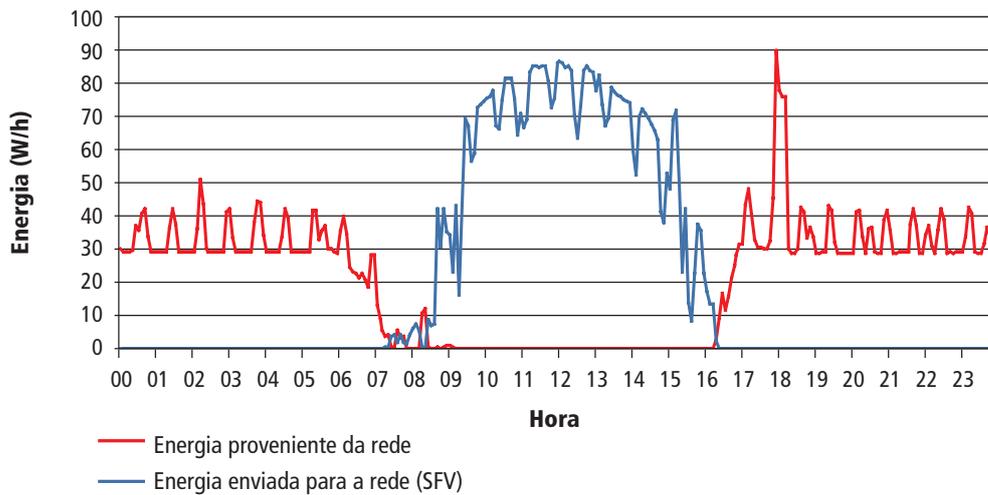


FIGURA 4.10 – Fluxo de energia na Casa Eficiente, durante o dia 05/11/2008, dia claro, com pouca ocorrência de nuvens.

Observa-se na Figura 4.10 que nos períodos de crepúsculos e durante a noite, a energia é proveniente da rede (linha vermelha). Nesses períodos, o consumo da Casa tem um valor base, devido à iluminação externa, e apresenta alguns picos de consumo devidos ao funcionamento da geladeira. No período diurno, aproximadamente das 8h30 às 16h, a geração fotovoltaica supre todo o consumo da Casa Eficiente e ainda fornece o excedente de energia gerada para a rede elétrica (linha azul). Nesse mesmo período, o consumo da geladeira aparece como vales (decréscimos) na curva de energia enviada para rede, indicando que parte da energia gerada pelo sistema fotovoltaico foi utilizada na própria Casa.

Em alguns períodos do dia podem ocorrer vales que não são devidos ao consumo de aparelhos elétricos da Casa, mas devidos à passagem de nuvens, que ocasionam sombreamento do painel fotovoltaico e consequente queda na geração. Essa situação está ilustrada na Figura 4.11, que mostra o fluxo de energia da Casa durante o dia 12/11/2008, um dia chuvoso e nublado. Observa-se que na maior parte do dia o consumo foi suprido pela rede (linha vermelha) havendo, em poucos períodos, geração fotovoltaica suficiente para alimentar a Casa e enviar o excedente para rede (linha azul).

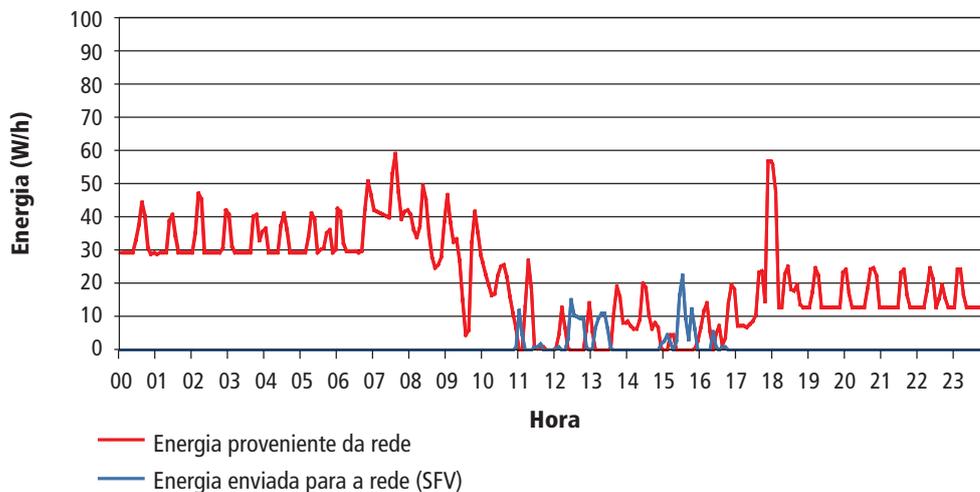


FIGURA 4.11 – Fluxo de energia durante o dia 12/11/2008, dia chuvoso e nublado.

Cabe destacar que a Casa Eficiente não é ocupada por moradores e por isso apresenta baixo consumo de energia durante todo o dia. Para comparar a geração do sistema fotovoltaico com o consumo de uma família foram realizadas estimativas, simulando a existência de moradores na Casa Eficiente, as quais são apresentadas no Capítulo 5 desta publicação.

### 4.3. Considerações Sobre o Uso de Sistemas Fotovoltaicos

A integração de sistemas solares fotovoltaicos às edificações urbanas tem aumentado significativamente nos últimos anos, principalmente nos países desenvolvidos, que buscam fontes de energia renováveis e não poluentes para contribuir com a matriz elétrica. Esse tipo de instalação evita os custos relativos à área ocupada, existentes nos sistemas instalados no solo, bem como os custos de preparação de terreno, fundações, suporte estrutural e conexão com a rede. A própria edificação proporciona a área e a estrutura de suporte, e a instalação elétrica da edificação atua como ponto de conexão entre o sistema e a rede elétrica pública.

Os resultados de desempenho do SFV de 2,25 kWp instalado na Casa Eficiente indicam que a geração solar fotovoltaica apresenta significativo potencial para utilização em residências no Brasil, constituindo uma alternativa para geração de energia elétrica diretamente a partir do Sol.

Espera-se que, em um futuro próximo, a energia solar fotovoltaica possa compor a matriz energética brasileira a custos competitivos. Esse cenário só irá se concretizar com a introdução de programas de incentivo como os praticados, dentre outros países, pela Alemanha, Espanha, Estados Unidos e Japão, que tiveram a visão de estimular essa tecnologia em busca da viabilidade econômica. A promoção de um programa brasileiro de incentivo à geração distribuída com sistemas fotovoltaicos, aproveitando a experiência e as melhores práticas adotadas pelos países que já promovem esta forma de geração, pode resultar na economia de escala necessária para que o potencial de redução do custo dessa tecnologia seja atingido também no Brasil.



## 5. Experimentos de consumo de energia elétrica

Autoras:  
Cláudia Donald Pereira  
Ana Kelly Marinowski

---

Neste capítulo são apresentados experimentos sobre estimativas de consumo de energia elétrica na Casa Eficiente, tendo em vista diferentes perfis de usuários e equipamentos eficientes e ineficientes.

---

### 5.1. Perfis de Consumo de Energia Elétrica

A Casa Eficiente não é uma residência ocupada de forma tradicional. Sendo assim, para permitir a realização de análises de consumo de energia elétrica, foram simulados diferentes perfis de usuários. Foram criados quatro perfis de uso dos equipamentos (eletrodomésticos e iluminação); cada perfil foi composto pela combinação do hábito de consumo de dois tipos de famílias usuárias, denominadas Sbanja e Consciente, com equipamentos eficientes ou ineficientes, conforme apresentado a seguir:

- ⚡ Perfil 1 – “Família Sbanja” com equipamentos ineficientes;
- ⚡ Perfil 2 – “Família Sbanja” com equipamentos eficientes;
- ⚡ Perfil 3 – “Família Consciente” com equipamentos ineficientes;
- ⚡ Perfil 4 – “Família Consciente” com equipamentos eficientes.

Em todos os casos, as estimativas de consumo são propostas para uma família de classe média com quatro pessoas: um casal e dois filhos. Nesse estudo, simula-se o uso de aparelhos de ar condicionado nos dois quartos, apesar de a Casa Eficiente não possuir esse tipo de equipamento. Para simular esse consumo do ar condicionado, foi utilizado o programa EnergyPlus versão 2.2.0, com o arquivo climático do ano climático de referência (TRY – *Test Reference Year*) da cidade de Florianópolis. O modelo representativo da Casa Eficiente, utilizado em tais simulações, está descrito no Volume 4: “Casa Eficiente: Simulação Computacional do Desempenho Termo-Energético”.

Os perfis com a “**família Sbanja**” simulam o consumo de uma família que tem hábitos que demandam bastante energia elétrica durante suas atividades domésticas. Eles utilizam os equipamentos elétricos e a iluminação da Casa por mais tempo que o necessário e acima da média nacional. A “família Sbanja” não costuma apagar as lâmpadas dos cômodos vazios e utiliza muito a iluminação artificial, deixando as lâmpadas acesas durante horários do dia em que a iluminação natural seria suficiente. Além disso, tomam banhos demorados, totalizando 30 minutos diários com o chuveiro ligado, por membro da família. Os aparelhos de ar condicionado dos quartos são ligados todas as noites, sendo utilizados para

resfriamento quando a temperatura do ar fica acima de 24°C e para aquecimento do ambiente quando a temperatura está abaixo de 24°C.

Já os perfis com a “**família Consciente**” simulam o consumo de uma família que tem preocupações com economia de energia. Esses usuários possuem um comportamento consciente e antidesperdício, utilizando os eletrodomésticos e a iluminação da Casa durante menos horas do dia. Durante o banho, desligam o chuveiro enquanto se ensaboam, totalizando apenas 10 minutos diários com o chuveiro ligado, por membro da família. Os aparelhos de ar condicionado dos quartos são ligados apenas quando realmente é necessário, durante as noites, quando a temperatura interna do ar fica acima de 26°C (para resfriamento do ambiente) ou abaixo de 18°C (para aquecimento do ambiente).

Quando se trata dos **equipamentos eficientes**, são utilizados exatamente os existentes na Casa Eficiente, mais um aparelho de ar condicionado em cada quarto. A geladeira e a máquina de lavar roupas possuem o Selo PROCEL e são classificadas pelo PBE com etiqueta “A” de eficiência energética. Todas as lâmpadas da Casa são fluorescentes compactas de 20 W. Para o aquecimento da água de banho é utilizado o sistema com coletores solares e boiler, existindo apenas consumo de energia auxiliar, nos momentos em que a água não está aquecida pelo sol (geralmente à noite ou em dias nublados). Tais valores de consumo de energia auxiliar foram simulados utilizando o programa computacional F-Chart. Além dos equipamentos existentes na Casa, nos dois quartos simula-se a utilização de aparelhos de ar condicionado de janela, tanto para aquecimento como para resfriamento desses ambientes, calculados para etiqueta “A” de eficiência energética. Para isso, o modelo computacional foi simulado no programa EnergyPlus com um ar condicionado do tipo *Packaged Terminal Heat Pump* (COMPACT HVAC:ZONE:PTHP) com coeficiente de performance (COP) igual a 3,0. O ar condicionado simulado é utilizado apenas no período noturno e é ligado no caso da “família Sbanja” todos os dias e no caso da “família Consciente” apenas em dias com temperatura interna muito alta (acima de 26°C) ou muito baixa (abaixo de 18°C).

No caso dos **equipamentos ineficientes**, a geladeira e máquina de lavar roupas da Casa são supostas ineficientes, ou seja, possuem etiqueta “E” de eficiência energética. Tanto para a geladeira como para a máquina de lavar roupas foi considerado o mesmo modelo de equipamento existente na Casa, com o mesmo volume, fazendo-se o cálculo de qual seria seu consumo para ser classificado com etiqueta “E”, conforme as indicações das correspondentes regulamentações do INMETRO (2005a; 2005b). Além disso, simula-se a utilização de lâmpadas incandescentes de 100W para todo o sistema de iluminação artificial da Casa. Para o banho é utilizado chuveiro elétrico. Foi ainda simulado (no programa EnergyPlus) o uso de dois aparelhos de ar condicionado (um em cada quarto), com eficiência energética calculada para etiqueta “E”. Eles foram inseridos no modelo também do tipo *Packaged Terminal Heat Pump* (COMPACT HVAC:ZONE:PTHP), porém, com coeficiente de performance (COP) igual a 2,3.

É importante ressaltar que os valores definidos aqui são diferentes dos adotados nos estudos ocorridos para as simulações prévias de projeto da Casa Eficiente. Isso se deve ao fato de que, quando esses primeiros estudos foram realizados, os equipamentos que hoje existem na Casa ainda não haviam sido adquiridos. Sendo assim, há diferenças nos tipos de equipamentos e nas suas potências médias. Além disso, houve alterações nos padrões de uso.

Os resultados de consumo médio de energia elétrica para as simulações dos quatro diferentes perfis de usuários, bem como os equipamentos, as potências e os percentuais utilizados na simulação de cada perfil, estão apresentados nas Tabelas 5.1 a 5.4.

Para os resultados de consumo de energia elétrica dos aparelhos de ar condicionado e do sistema de aquecimento solar de água (consumo auxiliar) são mostrados valores de médias mensais para um ano e também, separadamente, para os meses de verão (novembro a abril) e para os meses de inverno (maio a outubro). Isso porque o consumo de tais equipamentos depende das condições climáticas. Para os demais equipamentos, cujo consumo não depende diretamente do clima, são mostrados apenas os valores de média mensal do consumo para um ano inteiro. O percentual do consumo médio mensal de cada equipamento foi calculado com base no valor de consumo médio mensal (em kWh) para o ano inteiro.

TABELA 5.1 – Resultados de consumo médio de energia elétrica para as simulações do **Perfil 1** (“família Sbanja” com equipamentos ineficientes).

Equipamento elétrico	Potência média (W)	Uso estimado (dias/mês)	Média de utilização (h/dia)	Consumo médio mensal		
				(kWh)	(%)	
Geladeira Etiqueta E	110	30	24	79,00	8,6	
Máquina de lavar roupas Etiqueta E	350	12	1 (1 ciclo)	4,20	0,5	
Forno microondas	880	30	0,25 (15 min)	6,60	0,7	
Filtro de água	6	30	24	4,32	0,5	
Aspirador de pó	876	15	2	26,28	2,8	
Ferro elétrico automático	156	12	1	1,87	0,2	
Computador + impressora + estabilizador	120	30	5	18,00	1,9	
Televisão comum 29"	100	30	5	15,00	1,6	
Iluminação quarto solteiro	100	30	4	12,00	27,9	
Iluminação quarto casal	100	30	4	12,00		
Iluminação sala estar	400 (4x100)	30	4	48,00		
Iluminação sala jantar	400 (4x100)	30	4	48,00		
Iluminação banheiro	200 (2x100)	30	3	18,00		
Iluminação cozinha	200 (2x100)	30	3	18,00		
Iluminação área serviços	200 (2x100)	30	3	18,00		
Iluminação externa	1400 (14x100)	30	2	84,00		
Aquecimento de água: Chuveiro elétrico	5500	30	2	330,00	35,7	
Aparelhos de ar condicionado Etiqueta E (nos quartos)	(valores obtidos por simulação computacional)			verão	inverno	19,5
				133,20	226,50	
				179,85		
<b>TOTAL</b>				verão	inverno	100,0
				876,48	969,77	
				<b>923,12</b>		

TABELA 5.2 – Resultados de consumo médio de energia elétrica para as simulações do **Perfil 2** (“família Sbanja” com equipamentos eficientes).

Equipamento elétrico	Potência média (W)	Uso estimado (dias/mês)	Média de utilização (h/dia)	Consumo médio mensal		
				(kWh)	(%)	
Geladeira Etiqueta A	85	30	24	61,00	11,1	
Máquina de lavar roupas Etiqueta A	230	12	1 (1 ciclo)	2,76	0,5	
Forno microondas	880	30	0,25 (15 min)	6,60	1,2	
Filtro de água	6	30	24	4,32	0,8	
Aspirador de pó	876	15	2	26,28	4,8	
Ferro elétrico automático	156	12	1	1,87	0,3	
Computador + impressora + estabilizador	120	30	5	18,00	3,3	
Televisão comum 29"	100	30	5	15,00	2,7	
Iluminação quarto solteiro	20	30	4	2,40	9,4	
Iluminação quarto casal	20	30	4	2,40		
Iluminação sala estar	80 (4X20)	30	4	9,60		
Iluminação sala jantar	80 (4X20)	30	4	9,60		
Iluminação banheiro	40 (2X20)	30	3	3,60		
Iluminação cozinha	40 (2X20)	30	3	3,60		
Iluminação área serviços	40 (2X20)	30	3	3,60		
Iluminação externa	280 (14X20)	30	2	16,80		
Aquecimento de água: Coletor solar + boiler	(valores obtidos por simulação computacional)			verão 200,28	inverno 244,95	40,5
				222,62		
Aparelhos de ar condicionado Etiqueta A (nos quartos)	(valores obtidos por simulação computacional)			verão 103,99	inverno 175,10	25,4
				139,54		
<b>TOTAL</b>				verão 491,70	inverno 607,48	100,0
				<b>549,59</b>		

TABELA 5.3 – Resultados de consumo médio de energia elétrica para as simulações do Perfil 3 (“família Consciente” com equipamentos ineficientes)

Equipamento elétrico	Potência média (W)	Uso estimado (dias/mês)	Média de utilização (h/dia)	Consumo médio mensal		
				(kWh)	(%)	
Geladeira Etiqueta E	110	30	24	79,00	25,7	
Máquina de lavar roupas Etiqueta E	350	4	1 (1 ciclo)	1,40	0,5	
Forno microondas	880	30	0,1 (6 min)	2,64	0,9	
Filtro de água	6	30	24	4,32	1,4	
Aspirador de pó	876	4	2	7,01	2,3	
Ferro elétrico automático	156	8	1	1,25	0,4	
Computador + impressora + estabilizador	120	25	2	6,00	2,0	
Televisão comum 29”	100	25	2	5,00	1,6	
Iluminação quarto solteiro	100	30	1	3,00	23,9	
Iluminação quarto casal	100	30	1	3,00		
Iluminação sala estar	400 (4x100)	30	2	24,00		
Iluminação sala jantar	400 (4x100)	30	1	12,00		
Iluminação banheiro	200 (2x100)	30	1	6,00		
Iluminação cozinha	200 (2x100)	30	1	6,00		
Iluminação área serviços	200 (2x100)	26	1	5,20		
Iluminação externa	1400 (14x100)	20	0,5 (30 min)	14,00		
Aquecimento de água: Chuveiro elétrico	5500	30	0,67 (40 min)	110,00	35,8	
Aparelhos de ar condicionado Etiqueta E (nos quartos)	(valores obtidos por simulação computacional)			verão	inverno	5,5
				28,88	5,16	
				17,02		
<b>TOTAL</b>				verão	inverno	100,0
				318,69	294,98	
				<b>306,84</b>		

TABELA 5.4 – Resultados de consumo médio de energia elétrica para as simulações do Perfil 4 (“família Consciente” com equipamentos eficientes).

Equipamento elétrico	Potência média (W)	Uso estimado (dias/mês)	Média de utilização (h/dia)	Consumo médio mensal		
				(kWh)	(%)	
Geladeira Etiqueta A	85	30	24	61,00	39,8	
Máquina de lavar roupas Etiqueta A	230	4	1 (1 ciclo)	0,92	0,6	
Forno microondas	880	30	0,1 (6 min)	2,64	1,7	
Filtro de água	6	30	24	4,32	2,8	
Aspirador de pó	876	4	2	7,01	4,6	
Ferro elétrico automático	156	8	1	1,25	0,8	
Computador + impressora + estabilizador	120	25	2	6,00	3,9	
Televisão comum 29"	100	25	2	5,00	3,3	
Iluminação quarto solteiro	20	30	1	0,60	9,5	
Iluminação quarto casal	20	30	1	0,60		
Iluminação sala estar	80 (4X20)	30	2	4,80		
Iluminação sala jantar	80 (4X20)	30	1	2,40		
Iluminação banheiro	40 (2X20)	30	1	1,20		
Iluminação cozinha	40 (2X20)	30	1	1,20		
Iluminação área serviços	40 (2X20)	26	1	1,04		
Iluminação externa	280 (14X20)	20	0,5 (30 min)	2,80		
Aquecimento de água: Coletor solar + boiler	(valores obtidos por simulação computacional)			verão 23,29		inverno 49,63
				36,46		
Aparelhos de ar condicionado Etiqueta A (nos quartos)	(valores obtidos por simulação computacional)			verão 23,18	inverno 5,01	9,2
				14,09		
<b>TOTAL</b>				verão 149,24	inverno 157,42	100,0
					<b>153,33</b>	

Analisando os resultados obtidos nas simulações dos 4 perfis de consumo, percebe-se que pela mudança de equipamentos e adoção de hábitos conscientes de consumo, o perfil 4 (153 kWh/mês) pôde economizar 83% do consumo médio mensal de energia elétrica em relação ao perfil 1 (923 kWh/mês).

Comparando especificamente o consumo com aquecimento de água, percebe-se que para a “família Sbanja” a troca do chuveiro elétrico pelo coletor solar significou uma economia média de 32,5% do consumo mensal de energia para aquecimento de água. No caso da “família Consciente”, essa troca resultou em uma economia média de 66,8% do consumo mensal para aquecimento de água. Ressalta-se que essa comparação está sujeita a imprecisões, pois o consumo com o chuveiro elétrico é calculado com base no tempo de duração do banho; já o consumo auxiliar do sistema de aquecimento solar é calculado com base no volume de água consumida no banho. Para esta comparação foi considerado um chuveiro com vazão de 4 litros por minuto.

Outra verificação interessante é que nos dois perfis com equipamentos ineficientes (Perfil 1 e Perfil 3), o consumo com iluminação, utilizando lâmpadas incandescentes, representa mais de 20% do consumo total das famílias. Em contrapartida, nos perfis com equipamentos eficientes (Perfil 2 e Perfil 4), o consumo do sistema de iluminação, utilizando apenas lâmpadas fluorescentes compactas, representa menos de 10% do consumo total das famílias.

Após isto, foi ainda considerado o perfil de uso da família com hábitos conscientes no consumo de energia, utilizando apenas os equipamentos eficientes existentes na Casa Eficiente, ou seja, sem o uso dos aparelhos de ar condicionado. Apenas a ventilação natural é utilizada para manutenção do conforto térmico, de forma que este último perfil é semelhante ao perfil 4, porém sem o uso de aparelhos de ar condicionado. Os resultados de consumo médio de energia elétrica para a simulação desse quinto perfil de uso da Casa é apresentado na Tabela 5.5.

TABELA 5.5 – Resultados de consumo médio de energia elétrica para as simulações do **Perfil 5** (“família Consciente” com equipamentos da Casa Eficiente).

Equipamento elétrico	Potência média (W)	Uso estimado (dias/mês)	Média de utilização (h/dia)	Consumo médio mensal			
				(kWh)	(%)		
Geladeira Etiqueta A	85	30	24	61,00	43,8		
Máquina de lavar roupas Etiqueta A	230	4	1 (1 ciclo)	0,92	0,7		
Forno microondas	880	30	0,1 (6 min)	2,64	1,9		
Filtro de água	6	30	24	4,32	3,1		
Aspirador de pó	876	4	2	7,01	5,0		
Ferro elétrico automático	156	8	1	1,25	0,9		
Computador + impressora + estabilizador	120	25	2	6,00	4,3		
Televisão comum 29"	100	25	2	5,00	3,6		
Iluminação quarto solteiro	20	30	1	0,60	10,5		
Iluminação quarto casal	20	30	1	0,60			
Iluminação sala estar	80 (4X20)	30	2	4,80			
Iluminação sala jantar	80 (4X20)	30	1	2,40			
Iluminação banheiro	40 (2X20)	30	1	1,20			
Iluminação cozinha	40 (2X20)	30	1	1,20			
Iluminação área serviços	40 (2X20)	26	1	1,04			
Iluminação externa	280 (14X20)	20	0,5 (30 min)	2,80			
Aquecimento de água: Coletor solar + boiler	(valores obtidos por simulação computacional)			verão 23,29		inverno 49,63	26,2
				36,46			
<b>TOTAL</b>				verão 126,07	inverno 152,41	100,0	
					<b>139,24</b>		

A Figura 5.1 apresenta uma comparação dos consumos médios mensais de energia para os cinco perfis de usuários.

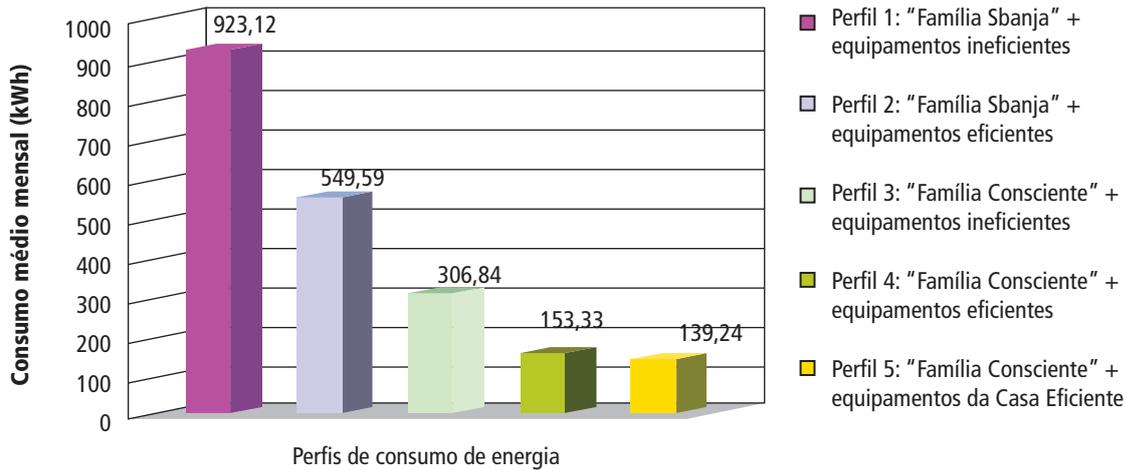


FIGURA 5.1 – Consumo médio mensal de energia para os diferentes perfis de usuários.

O consumo médio de energia elétrica em uma residência no Brasil varia de região para região e em função das classes socioeconômicas. Verifica-se na classificação socioeconômica por faixa de consumo de energia apresentada na Figura 5.2 que, na região Sul do país, para a classe média (C), 62% do consumo encontra-se nas faixas de 101 a 300 kWh/mês (SOUZA, 2008).

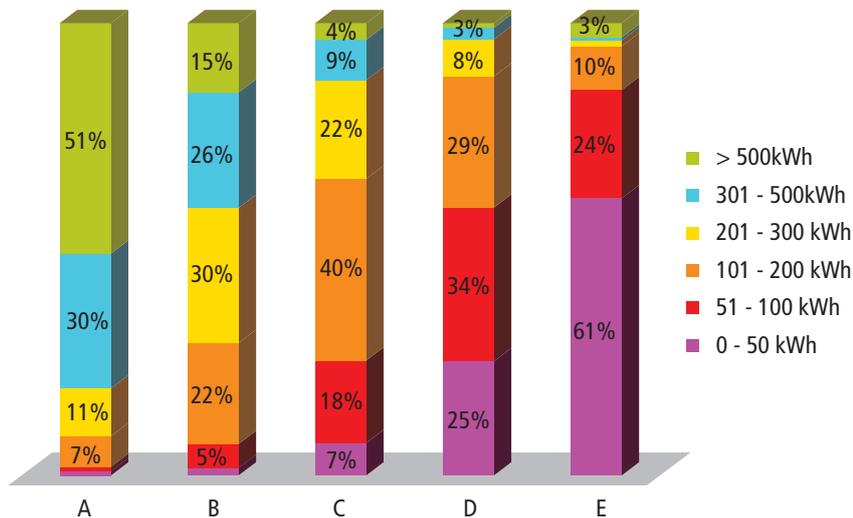


FIGURA 5.2 – Classificação socioeconômica versus faixa de consumo de energia para a região Sul do Brasil (SOUZA, 2008).

Deste modo, considerando a Casa Eficiente como uma residência habitada por uma família de classe média, constata-se que o perfil 1 ("família Sbanja" e equipamentos ineficientes) e o perfil 2 ("família Sbanja" e equipamentos eficientes) encontram-se bem acima da faixa média de consumo da região Sul

do Brasil. Ou seja, a “família Sbanja” consome acima da média da região, mesmo com equipamentos eficientes.

Conforme apresentado no Capítulo 4 deste livro, a Casa Eficiente possui um sistema fotovoltaico que gerou, em dois anos analisados, uma média mensal de 208 kWh de energia (Tabela 4.3). Sendo assim, os resultados de consumo de energia obtidos nas simulações de perfis de consumo foram comparados com a geração de energia solar fotovoltaica da Casa Eficiente. O consumo de energia médio mensal de cada perfil simulado, comparado à geração de energia solar fotovoltaica média, máxima e mínima da Casa Eficiente, está apresentado na Figura 5.3. Através desta Figura nota-se que a geração de energia solar fotovoltaica média poderia suprir completamente a demanda de energia elétrica dos perfis mais econômicos: o perfil 4 e o perfil 5. Já o perfil 1 teria menos da metade de seu consumo atendido pela geração fotovoltaica da Casa.

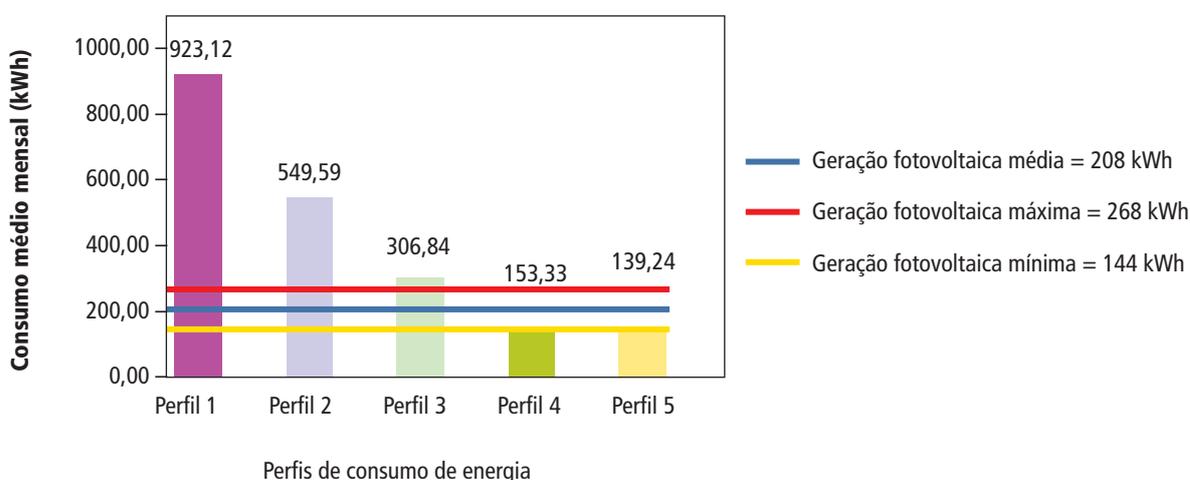


FIGURA 5.3 – Geração de energia solar fotovoltaica média, máxima e mínima da Casa Eficiente comparada aos consumos dos diferentes perfis de usuários.

## 5.2. Análise Econômica

Para analisar a economia financeira obtida, com e sem o sistema fotovoltaico de geração de energia, estimou-se o custo da conta de energia elétrica para os cinco perfis de uso apresentados anteriormente. Foram realizados cálculos dos gastos com a conta de energia elétrica, utilizando o valor da tarifa local, no ano de 2008, obtido através de informações disponibilizadas pela concessionária de energia (CELESC), onde o valor dos primeiros 150kWh é de R\$ 0,383 por kWh e acima de 150kWh é de R\$ 0,4544 por kWh.

A Tabela 5.6 apresenta o consumo de energia elétrica e custos estimados com a conta para os perfis de consumo sem considerar a geração de energia do sistema fotovoltaico. Verifica-se que, pela adoção de equipamentos eficientes e hábitos de uso conscientes, o Perfil 5 teve um custo final na conta de energia 86,9% menor que o do Perfil 1.

TABELA 5.6 – Consumo de energia elétrica e custos para as simulações de perfis sem sistema fotovoltaico.

Perfil	Consumo acima de 150 kWh	Custo para os primeiros 150 kWh (R\$)	Custo acima de 150 kWh (R\$)	Custo total (R\$)
Perfil 1	773,12	57,45	351,31	408,76
Perfil 2	399,59		181,57	239,02
Perfil 3	156,84		71,27	128,72
Perfil 4	3,33		1,51	58,96
Perfil 5	0,00	53,33	0,00	53,33

A Tabela 5.7 mostra as estimativas de custos com a conta de energia elétrica para os perfis de consumo, considerando a geração média mensal de energia do sistema fotovoltaico. Verifica-se que a energia média gerada pelo sistema fotovoltaico supre totalmente o consumo dos perfis 4 e 5, onde não seria necessário pagar a concessionária pelo fornecimento de energia. Nestes casos também haveria um excedente de energia injetado na rede de distribuição, o que significaria um lucro para o proprietário. No Brasil ainda não existem normas que regulamentem esse tipo de sistema interligado à rede, não sendo possível quantificar o valor desse lucro.

Destaca-se que essas comparações são simplificadas, pois, como já apresentado no Capítulo 4 através da Figura 4.10, grande parte do consumo de uma residência ocorre no horário noturno, quando não há geração de energia fotovoltaica, e nos momentos do dia de maior geração de energia o consumo nem sempre é tão elevado. Tais comparações consideram que no período noturno a energia necessária seria comprada da concessionária e o excedente gerado durante o dia seria vendido e injetado na rede da concessionária pelo mesmo preço da tarifa.

TABELA 5.7 – Consumo de energia elétrica e custos para as simulações de perfis com sistema fotovoltaico.

Perfil	Consumo além da geração média (kWh)	Consumo acima de 150 kWh	Custo para os primeiros 150 kWh (R\$)	Custo acima de 150 kWh (R\$)	Custo total (R\$)
Perfil 1	715,12	565,12	57,45	256,79	314,24
Perfil 2	341,59	191,59	57,45	87,06	144,51
Perfil 3	98,84	0,00	37,85	0,00	37,85
Perfil 4	-54,67	0,00	0,00	0,00	LUCRO
Perfil 5	-68,76	0,00	0,00	0,00	LUCRO

Supondo que o custo de venda da energia fotovoltaica fosse o mesmo da energia comprada da concessionária, de R\$ 0,383 por kWh, o lucro final obtido pelo Perfil 4 seria de R\$ 20,94 por mês e o lucro do Perfil 5 seria de R\$ 26,34 mensais.

Nota-se que a energia solar é uma fonte de energia alternativa que pode ser amplamente explorada na região, proporcionando um grande potencial de economia no consumo de energia elétrica. Os resultados da Casa Eficiente apontam que ela poderia ser considerada como *Zero Energy Building* (ZEB), tendo em vista seus equipamentos eficientes e a ocupação por usuários conscientes. Isso porque a quantidade de energia

gerada no local através da energia solar, uma fonte renovável de energia, é superior à quantidade que seria consumida na edificação.

*Zero Energy Building (ZEB)*, também chamado de Edifício de Energia Zero, é aquele que gera energia por meio de fontes renováveis, capaz de suprir toda a sua demanda anual de energia.

Vários países possuem políticas de incentivo à geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis. Um dos mecanismos mais importantes para isso é a criação de tarifas especiais para o pagamento dessas energias renováveis. Dessa forma, os investidores em energias renováveis recebem um determinado valor por kWh de energia gerado em seu sistema. Utilizando tal política a Alemanha e a Espanha se tornaram líderes no uso de energia solar, eólica e de biomassa. Outros países, como Portugal, França, Suíça e Grécia, possuem programas semelhantes.

Tanto na Espanha quanto na Alemanha os investidores em geração fotovoltaica interligada à rede recebem um subsídio do governo federal, proporcional à produção de energia do seu sistema, sendo que o valor pago por kWh de energia gerada depende do tamanho do sistema (potência instalada) e do local onde ele está instalado: no solo ou sobre o edifício. Assim, toda energia gerada é vendida por essa tarifa especial. Pela energia elétrica que o investidor consumir, ele paga a tarifa convencional, que tem valor mais baixo que a tarifa da energia fotovoltaica.



## 6. Conclusões

O grande crescimento do consumo de energia elétrica, no Brasil e no mundo, se tornou motivo de preocupação, e tem colocado em foco a necessidade de um uso mais racional e eficiente da energia. Com o objetivo de divulgar equipamentos e estratégias projetuais voltadas à eficiência energética de edificações residenciais a Casa Eficiente foi construída por meio de uma parceria entre Eletrobras, através do PROCEL, Eletrosul e Universidade Federal de Santa Catarina.

A preocupação do projeto da Casa Eficiente com a eficiência energética é demonstrada pelas características construtivas, valorizando o aproveitamento da iluminação natural e da ventilação natural, pelas escolhas de equipamentos com Selo PROCEL e etiqueta “A” de eficiência energética e, por fim, pela utilização de uma fonte renovável para geração de energia e aquecimento de água: o Sol.

Os resultados de desempenho do sistema fotovoltaico instalado na Casa Eficiente indicam que a geração solar fotovoltaica apresenta significativo potencial para utilização em residências no Brasil, constituindo-se em uma importante alternativa para geração de energia elétrica diretamente a partir do Sol. Além disso, a energia solar mostrou-se uma importante alternativa para aquecimento da água.

Uma grande dificuldade para implantação de sistemas fotovoltaicos nas residências brasileiras diz respeito ao alto custo dos equipamentos e sua implantação. Torna-se fundamental a criação, por parte do governo, de um mecanismo de incentivo para os sistemas fotovoltaicos, tendo em vista o excelente potencial para a aplicação dessa fonte renovável em um país tropical e com altos níveis de radiação solar como o Brasil.

As pesquisas realizadas na Casa Eficiente apontam que, tendo em vista seus equipamentos eficientes e a ocupação por usuários conscientes, ela teria uma geração de energia elétrica, por meio do sistema fotovoltaico, maior que seu consumo. Dessa forma ela poderia ser considerada como um *Zero Energy Building* (ZEB). Foi possível comprovar a importância em relação ao projeto da edificação, contemplando sistemas e soluções para que haja a máxima eficiência energética, utilizando estratégias que promovem conforto térmico de modo integrado ao projeto arquitetônico.

# Referências

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR10899**: Energia solar fotovoltaica – Terminologia. Rio de Janeiro, 2006.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11704**: Sistemas fotovoltaicos – Classificação. Rio de Janeiro, 2008a.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15569**: Sistema de aquecimento solar de água em circuito direto – Projeto e instalação, Rio de Janeiro, 2008b.
- ALEMANHA, EEG. Renewable Energy Sources Act. In: **Federal Law Gazette** nº 40, Bonn, Germany. Disponível em: <[www.bmu.de/english/renewable\\_energy/doc/6465.php](http://www.bmu.de/english/renewable_energy/doc/6465.php)>. Acesso em: 2004.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional 2007: Ano Base 2006**. Relatório Final. Rio de Janeiro: EPE, 2007.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional 2008: Ano Base 2007**. Relatório Final. Rio de Janeiro: EPE, 2008a.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético. Portaria nº 36 de 26/11/2008, In: **Diário Oficial da União**, nº 232, Seção 2, pp. 56, 28 de novembro de 2008, ISSN 1677-7050. 2008b.
- ECOTECT. **Autodesk Ecotect**. Disponível em: <<http://ecotect.com/products/ecotect>>. Acesso em: outubro de 2008.
- ELETOBRAS – Centrais Elétricas Brasileiras S.A.; PROCEL – Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica. **Pesquisa de Posse de Equipamentos e Hábitos de Uso – Ano Base 2005 – Classe Residencial – Relatório Brasil**. Rio de Janeiro: ELETOBRAS/PROCEL, 2007.
- GELLER, H. S. **Revolução Energética**: políticas para um futuro sustentável. Rio de Janeiro: Relume Dumará: USAid, 2003.
- GHISI, E.; GOSCH, S.; LAMBERTS, R. Electricity End-Uses in the Residential Sector of Brazil. **Energy Policy**, v.35, nº1, p. 4107-4120, 2007.
- INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial. **Regulamento Específico para Uso da Etiqueta Nacional de Conservação de Energia – ENCE – Linha de Refrigeradores e Assemelhados (Congeladores, Combinados e Conservadores)**. Edição nº 01, Revisão 00, 2005a.
- INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial. **Regulamento Específico para Uso da Etiqueta Nacional de Conservação de Energia – ENCE – Máquinas de Lavar Roupa**. Edição nº 01, Revisão 00, 2005b.
- INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial. **Programa Brasileiro de Etiquetagem**. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/consumidor/pbe.asp>>. Acesso em: 10 nov. 2008.

- IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Solar Heating & Cooling Programme. **Solar Heat Worldwide Markets and Contribution to the Energy Supply 2006**, AEE INTEC – Institute for Sustainable Technologies, Gleisdorf, Áustria, 2008
- LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência Energética na Arquitetura**. 2ª edição. São Paulo: ProLivros, 2004.
- LAMBERTS, R.; ALVES, J. L.; PELKA, A. C. K.; NETO, R. C. S.; BATISTA, J. O.; ANDRADE, M. A. N. Casa Eficiente: Uma Habitação Sustentável no Contexto das Mudanças Climáticas Globais. In: 3º ENCONTRO TÉCNICO-CIENTÍFICO DA 7ª ECOLATINA, 2007, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: ECOLATINA, 2007.
- MACIEL, A. A.; ANDRADE, S. F.; GUGEL, E. C.; BATISTA, J. O.; MARINOSKI, D. L.; LAMBERTS, R. Projeto Casa Eficiente: Demonstração de Eficiência Energética em Habitação Unifamiliar. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 11., 2006, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: ANTAC, 2006.
- MAYCOCK, P.; BRADFORD, T. **PV Technology, Performance, and Cost – 2007 Update**. Massachusetts Prometheus Institute for Sustainable Development and PV Energy Systems. Massachusetts, USA, 2007
- OLIVEIRA, A. C. C.; SÁ JÚNIOR, J. C. **Uso Eficiente de Energia Elétrica**. Recife: Ed. Universitária da UFPE, 1998.
- PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; ABREU, S. L.; RÜTHER, R. **Atlas brasileiro de energia solar**, ISBN 978-85-17-00030-0. São José dos Campos – Brasil: INPE, 2006.
- PEREZAGUA, E. New Rising Era for Photovoltaic Integration in Buildings. In: **European Union Sustainable Energy Week**. Brussels, 2007.
- PRASAD, D.; SNOW, M. **Designing with Solar Power – A Source Book for Building Integrated Photovoltaics (BIPV)**. Earthscan. London, 2005.
- PROCEL. **Selo PROCEL**. Disponível em:  
<<http://www.eletronbras.com/elb/procel/main.asp?TeamID={95F19022-F8BB-4991-862A-1C116F13AB71}>>. Acesso em: 01 dez. 2008.
- RÜTHER, R. Experiences and operational results of the first grid-connected, building integrated, thin film photovoltaic installation in Brazil. In: **Proceedings** of the 2nd World Conference on Photovoltaic Solar Energy Conversion. pp. 2655-2658. Vienna, Áustria. 1998.
- RÜTHER, R. **Edifícios solares fotovoltaicos: o potencial da geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligada à rede elétrica pública do Brasil**. Editora UFSC / LABSOLAR, Florianópolis, 2004.
- RÜTHER, R.; VIANA, T. S.; SALAMONI, I.T. Reliability and Long-term Performance of the First Grid-connected, Building-integrated, Amorphous Silicon PV Installation in Brazil. In: **Proceedings** of the 33rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference. San Diego, CA, USA, 2008.
- SANYO. **HIT Photovoltaic Module, HIP-180BA19 – Data Sheet**. Disponível em:  
<<http://us.sanyo.com/HIT-Power>>. Acesso em: out. 2008.
- SICK, F.; ERGE, T. **Photovoltaics in Buildings – A Design Handbook for Architects and Engineers**. James & James. London, 1996.

- SONTOR. **Micromorph Thin Film Solar Module, SN2** – Data Sheet – November 2008. Disponível em: <[http://www.sontor.com/en/products/sontor\\_sn2/index.html](http://www.sontor.com/en/products/sontor_sn2/index.html)>. Acesso: nov. 2008.
- SOUZA, R. C. **Avaliação do Mercado de Eficiência Energética no Brasil**: Pesquisa na Classe Residencial. Disponível em: <<http://www.eletronbras.com/pci/main.asp?TeamID={5A821C3B-5204-4335-A5FC2313F8F692E2}>>. Acesso em: 10 set. 2008.
- TOLMASQUIM, M. As Origens da Crise Energética Brasileira. **Ambiente & Sociedade** – Ano III – nº 6/7 – 1º Semestre de 2000 / 2º Semestre de 2000.
- VIANA, T. S.; ZOMER, C. D.; NASCIMENTO, L.; RÜTHER, R. Centro de Eventos da UFSC: Integração de Sistemas Fotovoltaicos à Arquitetura. In: IX ENCONTRO NACIONAL E V LATINO AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2007. Ouro Preto. **Anais...** Ouro Preto: ANTAC, 2007.



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 978-85-7426-101-0



LabEEE



Ministério de  
Minas e Energia

