

LEANDRA ALTOÉ

**ANÁLISE TÉCNICO-ECONÔMICA E AMBIENTAL DA CERTIFICAÇÃO
BRASILEIRA DO USO DE AQUECEDORES SOLARES DE ÁGUA EM
EDIFICAÇÕES RESIDENCIAIS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2012

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

A469a
2012

Altoé, Leandra, 1986-

Análise técnico-econômica e ambiental da certificação brasileira do uso de aquecedores solares de água em edificações residenciais / Leandra Altoé. – Viçosa, MG, 2012. xviii, 133f. : il. (algumas col.) ; 29cm.

Orientador: Delly Oliveira Filho.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.
Inclui bibliografia.

1. Aquecedores solares de água. 2. Energia solar.
3. Habitações. 4. Sustentabilidade. I. Universidade Federal de Viçosa. II. Título.

CDD 22. ed. 631.37

LEANDRA ALTOÉ

**ANÁLISE TÉCNICO-ECONÔMICA E AMBIENTAL DA CERTIFICAÇÃO
BRASILEIRA DO USO DE AQUECEDORES SOLARES DE ÁGUA EM
EDIFICAÇÕES RESIDENCIAIS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

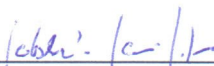
APROVADA: 25 de julho de 2012.



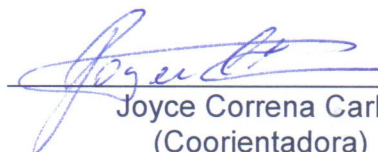
Wathney Hermsdorff



José Helvecio Martins



Roberto Precci Lopes



Joyce Correna Carlo
(Coorientadora)



Delly Oliveira Filho
(Orientador)

Aos meus pais, Alice e Plínio, entusiastas dos meus passos acadêmicos.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer ao Professor orientador Delly Oliveira Filho, pela dedicação e confiança concedida desde os tempos de Iniciação Científica.

Aos Professores coorientadores Joyce Correna Carlo e Paulo Marcos de Barros Monteiro, sempre disponíveis e primordiais para o desenvolvimento da pesquisa.

À Eletrobras pela bolsa de pesquisa vinculada à Rede de Eficiência Energética em Edificações (R3E).

Às alunas de graduação Alice e Bruna, pela ajuda na realização dos trabalhos.

Aos colegas do Departamento de Engenharia Agrícola e do Departamento de Arquitetura e Urbanismo, pela cooperação nas disciplinas e contribuição na pesquisa.

Ao pessoal da República - Tamara, Adriana e Ítala - pela amizade, companhia e paciência. Em especial à primeira, Arquiteta e Urbanista da casa, pelas consultorias prestadas.

Aos familiares e demais amigos pelo apoio e incentivo no período de mestrado.

BIOGRAFIA

Leandra Altoé, filha de Alice Zuqui e Plínio José Altoé, nasceu no dia 30 de julho de 1986, no município de Jaguaré, Espírito Santo.

Concluiu ensino fundamental nos colégios de sua cidade natal.

Nos anos de 2002 a 2004 cursou ensino médio no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo (IFES), antigo CEFET, na Unidade de Colatina.

Ingressou na Universidade Federal de Viçosa (UFV) no curso de graduação em Engenharia Agrícola e Ambiental em 2006, concluindo-o em 2010.

Nos anos de graduação, participou de programas de Iniciação Científica e foi membro da Empresa Júnior de Engenharia Agrícola e Ambiental.

Em 2011, iniciou o mestrado em Engenharia Agrícola na UFV, na área de Energia, concentrando sua pesquisa em tecnologias solares para aquecimento de água em edifícios.

SUMÁRIO

LISTA DE QUADROS	xi
LISTA DE FIGURAS	xii
RESUMO	xv
ABSTRACT	xvii
1. INTRODUÇÃO GERAL.....	1
1.1 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	1
1.2 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	2
1.3 LIMITAÇÕES DA PESQUISA.....	6
1.4 CONTRIBUIÇÃO DA PESQUISA.....	7
1.5 OBJETIVOS.....	8
1.5.1 Objetivo geral	8
1.5.2 Objetivos específicos.....	8
1.6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	9
2. CERTIFICAÇÃO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE EDIFICAÇÕES.....	11
Resumo	11
2.1 INTRODUÇÃO.....	12
2.2 CERTIFICAÇÃO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE EDIFÍCIOS NO BRASIL.....	13
2.3 CERTIFICAÇÃO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE EDIFÍCIOS EM OUTROS PAÍSES.....	16
2.3.1 Estados Unidos	16
2.3.2 Portugal.....	17
2.4 COMPARAÇÃO ENTRE OS PROGRAMAS DE ETIQUETAGEM BRASILEIRO, ESTADUNIDENSE E PORTUGUÊS.....	19
2.5 DISCUSSÃO.....	27
2.6 CONCLUSÃO	30
2.7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	31
3. FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS APLICADAS À ANÁLISE DE AQUECEDORES SOLARES DE ÁGUA	36
Resumo	36
3.1 INTRODUÇÃO.....	37
3.2 PROGRAMAS COMPUTACIONAIS.....	38

3.2.1	<i>RETScreen International</i>	38
3.2.2	<i>EnergyPlus</i>	39
3.2.3	Outros programas	41
3.3	ANÁLISE COMPARATIVA DOS PROGRAMAS COMPUTACIONAIS	42
3.4	CONCLUSÃO	45
3.5	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	46
4.	ANÁLISE TÉCNICA DE SISTEMAS DE AQUECIMENTO SOLAR DE ÁGUA EM RESIDÊNCIAS	49
	Resumo	49
4.1	INTRODUÇÃO	50
4.2	MATERIAL E MÉTODOS	51
4.2.1	Modelo residencial e demanda de água quente	52
4.2.2	Dimensionamento e simulação do aquecedor solar	53
4.2.3	Método da Carta-F	57
4.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	62
4.3.1	Dimensionamento do aquecedor solar	62
4.3.2	Simulação termo-energética do sistema solar	66
4.3.3	Consumo de energia pelos sistemas solar e elétrico	69
4.3.4	Proposição de nova classificação do sistema de aquecimento solar de água para o RTQ-R	74
4.4.	CONCLUSÃO	76
4.5.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77
5.	VIABILIDADE ECONÔMICA DE AQUECEDORES SOLARES DE ÁGUA RESIDENCIAIS	80
	Resumo	80
5.1	INTRODUÇÃO	81
5.2	MATERIAL E MÉTODOS	82
5.2.1	Modelos analisados	82
5.2.2	Indicadores econômicos	83
5.2.3	Parâmetros técnico-financeiros	86
5.2.4	Proposição de cenários futuros	86
5.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	87
5.3.1	Custo inicial do sistema solar térmico	87

5.3.2	Análise de viabilidade econômica	88
5.3.3	Análise de sensibilidade	94
5.4	CONCLUSÃO	104
5.5	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	105
6.	IMPACTOS AMBIENTAIS DO USO DE AQUECEDORES SOLARES DE ÁGUA EM HABITAÇÕES	107
	Resumo	107
6.1	INTRODUÇÃO	108
6.2	MATERIAL E MÉTODOS	109
6.2.1	Modelos analisados	110
6.2.2	Metodologia de cálculo de emissões de gases de efeito estufa..	110
6.2.3	Premissas de cálculo de emissões de gases de efeito estufa para residência típica brasileira e setor residencial nacional	114
6.2.4	Premissas de cálculo de emissões de gases de efeito estufa para residências em outros países	116
6.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	117
6.3.1	Emissões de gases de efeito estufa pela residência típica brasileira	117
6.3.2	Emissões de gases de efeito estufa pelo setor residencial brasileiro	120
6.3.3	Emissões de gases de efeito estufa para outros países	124
6.4	CONCLUSÃO	125
6.5	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	126
7.	CONCLUSÃO GERAL E RECOMENDAÇÃO DE TRABALHOS FUTUROS	129
7.1	CONCLUSÃO GERAL	129
7.2	CONCLUSÕES ESPECÍFICAS	129
7.2.1	Panorama da etiquetagem de edificações no Brasil e em países selecionados	130
7.2.2	Ferramentas computacionais aplicadas à análise de aquecedores solares de água	130
7.2.3	Análise técnica de aquecedores solares para fins residenciais ..	131
7.2.4	Análise de viabilidade econômica da substituição de chuveiros elétricos por aquecedores solares	131

7.2.5 Avaliação dos impactos ambientais do uso de aquecedores solares de águas nas emissões de gases de efeito estufa	132
7.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	132

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1:	Escala de eficiência energética do PBE	22
Quadro 2.2:	Escala de eficiência energética do bEQ	22
Quadro 2.3:	Escala de eficiência energética do SCE para edifícios residenciais	23
Quadro 2.4:	Comparação entre os programas de etiquetagem de edifícios no Brasil, Estados Unidos e Portugal.....	28
Quadro 3.1:	Análise de diferentes ferramentas computacionais para simulação de aquecedores solares de água.....	43
Quadro 3.2:	Projetos facilitados pelo uso do <i>RETScreen International</i> de 1998 a 2003	44
Quadro 4.1:	Equivalente numérico para sistemas de aquecimento solar de água	54
Quadro 4.2:	Equivalente numérico para sistemas de aquecimento elétrico de água	54
Quadro 4.3:	Correspondência entre equivalente numérico e classificação de nível de eficiência energética.....	55
Quadro 4.4:	Dimensionamento do sistema solar para diferentes condições de conforto de banho e níveis de eficiência energética, considerando a ponderação entre fração solar e elétrica	63
Quadro 4.5:	Dimensionamento do sistema solar para diferentes condições de conforto de banho e níveis de eficiência energética, considerando apenas a fração solar	63
Quadro 4.6:	Dimensionamento do aquecedor solar pela NBR 15569 para as três condições de conforto de banho	64
Quadro 4.7:	Parâmetros técnicos do sistema de aquecimento solar de água para diferentes condições de conforto de banho	66
Quadro 4.8:	Consumo de energia elétrica da residência, do chuveiro elétrico e a participação desta opção de aquecimento de água no consumo total da residência	70
Quadro 4.9:	Consumo de energia elétrica da residência, do sistema	

	solar com apoio elétrico e a participação desta opção de aquecimento de água no consumo total da residência70
Quadro 4.10:	Limites de classificação do sistema de aquecimento solar com <i>backup</i> elétrico pela atual metodologia RTQ-R.....75
Quadro 4.11:	Equivalente numérico para sistemas de aquecimento solar para a metodologia proposta75
Quadro 4.12:	Limites de classificação do sistema de aquecimento solar com <i>backup</i> elétrico para a metodologia proposta.....76
Quadro 5.1:	Custo inicial do aquecedor solar para diferentes condições de conforto de banho e níveis de eficiência energética, em reais87
Quadro 5.2:	Indicadores econômicos para o sistema solar dimensionado no limite do nível A e pela NBR 1556994
Quadro 5.3:	Análise de sensibilidade para o custo inicial do aquecedor solar95
Quadro 5.4:	Análise de sensibilidade para a taxa de desconto97
Quadro 5.5:	Análise de sensibilidade para a tarifa de energia elétrica98
Quadro 5.6:	Análise de sensibilidade para o reajuste da tarifa de energia elétrica100
Quadro 5.7:	Análise de sensibilidade para o horizonte de planejamento do aquecedor solar101
Quadro 5.8:	Sensibilidade dos indicadores econômicos aos parâmetros técnico-financeiros103
Quadro 6.1:	Fator de emissão de gases de efeito estufa do sistema elétrico brasileiro.....113
Quadro 6.2:	Potencial de aquecimento global de gases de efeito estufa114
Quadro 6.3:	Emissões de GEE evitadas pelo uso de aquecedor solar de água em uma residência típica brasileira, em kgCO ₂ equivalente/ano117
Quadro 6.4:	Participação de emissões de GEE por chuveiros elétricos e aquecedores a gás em residências brasileiras122

Quadro 6.5:	Participação de emissões de GEE por chuveiros elétricos em residências.....	122
Quadro 6.6:	Medidas de mitigação de emissões de GEE equivalentes ao uso de aquecedores solares em residências brasileiras.....	123

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1:	Produção de energia primária no Brasil no período de 1970-2009	3
Figura 1.2:	Consumo de energia elétrica por uso final em residências brasileiras.....	4
Figura 1.3:	Faixa média anual de radiação solar recebida no Brasil e em outros países com tecnologia solar avançada	5
Figura 2.1:	Modelos de etiquetas PROCEL/INMETRO para edifícios comerciais, públicos e de serviços (a) e residenciais (b) ...	15
Figura 2.2:	Modelo de etiqueta bEQ - <i>In Operation</i>	17
Figura 2.3:	Parte do certificado SCE para edifícios do tipo Habitação Unifamiliar/Fração Autônoma de Edifício Multifamiliar	19
Figura 2.4:	Processo para aquisição da etiqueta PROCEL/INMETRO	24
Figura 2.5:	Processo para aquisição da etiqueta bEQ	25
Figura 2.6:	Processos para aquisição do certificado SCE	25
Figura 2.7:	Progresso na implantação de normas e de programas de eficiência energética em edificações no Brasil, nos Estados Unidos e em Portugal.....	27
Figura 3.1:	Fluxograma de entradas e saídas do módulo energético de aquecedores solares de água do <i>RETScreen International</i>	39
Figura 3.2:	Fluxograma de entradas e saídas do módulo energético de aquecedores solares de água do programa <i>EnergyPlus</i> ...	40
Figura 4.1:	Curva de carga diária típica do setor residencial brasileiro	50
Figura 4.2:	Representação geométrica do modelo residencial analisado.....	52
Figura 4.3:	Esquema de um aquecedor solar de água por termossifão	53
Figura 4.4:	Ábaco para determinação da fração solar pelo método da Carta-F.....	62

Figura 4.5:	Energia transferida entre os componentes principais do aquecedor solar para a condição de conforto de banho regular e nível de eficiência energética A	69
Figura 4.6:	Consumo de energia mensal do sistema solar com apoio elétrico e chuveiro elétrico para a condição de conforto de banho reduzido	72
Figura 4.7:	Consumo de energia mensal do sistema solar com apoio elétrico e chuveiro elétrico para a condição de conforto de banho regular.....	72
Figura 4.8:	Consumo de energia mensal do sistema solar com apoio elétrico e chuveiro elétrico para a condição de conforto de banho bom	73
Figura 5.1:	Taxa interna de retorno do aquecedor solar para diferentes condições de conforto de banho e níveis de eficiência energética	88
Figura 5.2:	Valor presente líquido do aquecedor solar para diferentes condições de conforto de banho e níveis de eficiência energética	89
Figura 5.3:	Tempo de retorno do capital do aquecedor solar para diferentes condições de conforto de banho e níveis de eficiência energética	90
Figura 5.4:	Custo da energia conservada do aquecedor solar para diferentes condições de conforto de banho e níveis de eficiência energética	90
Figura 5.5:	Variação dos indicadores T_{IR} e T_{RC} com a fração solar anual	92
Figura 5.6:	Variação dos indicadores V_{PL} e C_{EC} com a fração solar anual	92
Figura 5.7:	Relação entre área de coletor solar e a fração solar anual do sistema.....	93
Figura 5.8:	Relação entre os indicadores econômicos e o custo inicial do aquecedor solar	96
Figura 5.9:	Relação entre os indicadores econômicos e a taxa de	

	desconto	97
Figura 5.10:	Relação entre os indicadores econômicos e a tarifa de energia elétrica.....	99
Figura 5.11:	Relação entre os indicadores econômicos e o reajuste da energia elétrica.....	100
Figura 5.12:	Relação entre os indicadores econômicos e o horizonte de planejamento do sistema solar.....	102
Figura 6.1:	Participação de diferentes setores nas emissões globais de gases de efeito estufa	108
Figura 6.2:	Fontes energéticas utilizadas para aquecimento de água no setor residencial brasileiro	115
Figura 6.3:	Matriz energética de diversos países para o ano de 2009	117
Figura 6.4:	Emissões de GEE evitadas para diferentes condições de conforto de banho e nível de eficiência energética	118
Figura 6.5:	Emissões de GEE evitadas pelo uso de aquecedor solar para diferentes frações solares para as condições climáticas de Viçosa-MG, com suas respectivas áreas de captação solar	119
Figura 6.6:	Emissões de GEE evitadas por aquecedores solares de água instalados atualmente em residências brasileiras e por substituição de aquecimento elétrico e a gás por solar....	121
Figura 6.7:	Emissões de GEE evitadas pela substituição de aquecimento elétrico por solar em uma residência unifamiliar em países selecionados.....	124

RESUMO

ALTOÉ, Leandra, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2012.
Análise técnico-econômica e ambiental da certificação brasileira do uso de aquecedores solares de água em edificações residenciais.
Orientador: Delly Oliveira Filho. Coorientadores: Joyce Correna Carlo e Paulo Marcos de Barros Monteiro.

As edificações são responsáveis por parte significativa do consumo de energia e das emissões de gases de efeito estufa em todo mundo. Em países desenvolvidos, os edifícios residenciais e comerciais demandam de 20 a 40% da energia total utilizada. No Brasil, os edifícios residenciais são responsáveis por cerca de 24% do consumo de energia elétrica. Além disso, este eletrodoméstico possui grande participação na demanda de energia elétrica do setor residencial, com implicações diretas na gestão de cargas do sistema elétrico nacional. A redução da dependência energética em edificações pode ser obtida por meio da promulgação de leis, normas e programas de certificação que incentivem o uso de medidas de eficiência energética e de energias renováveis. Medidas de eficiência energéticas usuais são o planejamento do uso de cores na construção de edificações e o aproveitamento da iluminação natural. Dentre as fontes de energia limpa que podem ser utilizadas em edifícios, destacam-se a solar térmica para aquecimento de água ou ambiente e a fotovoltaica para geração de energia elétrica. É importante avaliar tecnologias utilizadas para fontes renováveis de energia, não somente em relação à viabilidade técnico-econômica isoladamente, mas também de forma integrada às políticas públicas. O Brasil lançou, em 2009, a certificação de eficiência energética de edifícios, como parte do Programa Brasileiro de Etiquetagem. Sob a luz destes fatos, o objetivo principal nesta pesquisa foi analisar, do ponto de vista técnico, econômico e ambiental, a classificação do sistema de aquecimento solar de água pela certificação de eficiência energética de edifícios. Para isto foram dimensionados e simulados sistemas solares para atender diferentes condições de conforto de banho e níveis de eficiência energética de edifícios para uma residência típica brasileira. Foi verificado que a substituição do

chuveiro elétrico pelo aquecedor solar com *backup* elétrico provocou uma redução média de 71% no consumo de energia elétrica destinado a aquecimento de água da residência e 36% no consumo total da residência. Os aquecedores solares analisados apresentaram taxa interna de retorno, tempo de retorno de capital, valor presente líquido e custo da energia conservada com valores médios de 26% a.a.; 4,5 anos; R\$ 5.047,00 e R\$ 0,28/kWh, respectivamente, comparativamente ao uso de chuveiro elétrico. Foi estimado que para a residência típica brasileira a substituição do sistema de aquecimento de água elétrico e a gás por solar evita a emissão de, aproximadamente, 95 e 256 kgCO₂ equivalente por ano, respectivamente. Projeções sobre os potenciais de economia de energia e de redução de emissões de gases de efeito estufa pela aplicação de programas de etiquetagem de edificações são otimistas. Todavia é de extrema importância o esforço conjunto do governo, de profissionais da área de construção civil e da sociedade para que os objetivos sejam alcançados. Assim, os benefícios se refletirão no meio ambiente, com menores impactos negativos; nos usuários das edificações, que terão menor consumo de energia; e no governo, com redução de custos em investimentos no setor energético devido à diminuição da demanda de energia.

ABSTRACT

ALTOÉ, Leandra, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2012.
Technical, economical and environmental analysis of the Brazilian certification by the use of solar water heaters in residential buildings.
Advisor: Delly Oliveira Filho. Co-advisors: Joyce Correna Carlo and Paulo Marcos de Barros Monteiro.

The buildings are responsible for a significant part of the energy consumption and emissions of greenhouse gases in the world. In developed countries, residential and commercial buildings require between 20 and 40% of the total energy used. In Brazil, dwellings accounts for around 24% of the country electrical energy consumption. The electric shower is the appliance with the greater consumption share in Brazilian residential buildings, followed by the refrigerator and the air conditioning system. Moreover, this appliance has a large participation in electric power demand in the residential sector, with direct implications for management of loads the national electric system. The reduction of energy dependence in buildings can be achieved by laws, standards and labeling programs that promote the application of energy efficiency measures and renewable energy sources. Usual energy efficiency measures are the building colors planning and the natural lighting use. Among the sources of clean energy that can be used in buildings, it can be highlighted the solar thermal for water or environment heating, and photovoltaic for generating electricity. It is important to evaluate technologies in renewable energy, not only in relation to technical and economic feasibility alone, but also in an integrated public policy. Brazil launched in 2009 the energy efficiency labeling program for buildings, included on the Brazilian Labeling Program. In this way, this research aimed to analyze from the technical, economic, and environmental perspective the water heating system classification by the Brazilian energy efficiency building labeling program. For that, solar systems were sized and simulated for different bath comfort conditions and energy efficiency levels for a typical Brazilian dwelling. It was found that the replacement of electric shower by solar heater with electric backup caused an average reduction of 71% in electricity consumption for the heating water of the dwelling and 36% in the total

electricity consumption of the dwelling. The solar heating systems studied showed an internal return rate, payback period, net present value and cost of conserved energy values about 26% per year; 4.5 years; R\$ 5,047.00 and R\$ 0.28/kWh, respectively, as compared to a decentralized electrical shower in use. It was estimated for a typical Brazilian residence, that the replacement of the electrical and gas water heating system by a solar one avoids the emission of, approximately, 95 and 256 kgCO₂ equivalent per year, respectively. Forecasts about the potentials of both the energy savings and the emission of greenhouse gases reduction by the application of building labeling programs are optimistic. However, it is very important a joint effort from government, the professionals in the civil construction field, and the society, in order to achieve the objectives. Therefore, the benefits will be reflected on the environment, with less negative impacts; on the building users, who will lower energy consumption; and on the government, who may have lower investments with the power sector due to a decrease in the energy demand.

1. INTRODUÇÃO GERAL

1.1 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O conteúdo desta dissertação está estruturado em sete capítulos.

No Capítulo 1 é apresentada uma introdução geral, descrevendo algumas considerações importantes sobre o tema da pesquisa.

O Capítulo 2 é composto por uma revisão bibliográfica sobre processos de certificação de eficiência energética de edificações no Brasil e em outros países, tais como Portugal e Estados Unidos.

Uma análise comparativa de diferentes programas computacionais empregados internacionalmente para análise de aquecedores solares de água é apresentada no Capítulo 3, com enfoque nas capacidades funcionais e no público alvo dessas ferramentas.

No Capítulo 4 é apresentado o dimensionamento do sistema de aquecimento solar de água de uma residência unifamiliar para atender diferentes condições de conforto de banho e níveis de eficiência energética pelo PBE de edifícios. Neste capítulo, também é realizada uma análise técnica do aquecedor solar, com investigação de diversas variáveis do sistema, como fração solar, taxa de transferência de energia e temperatura da água.

O capítulo 5 apresenta uma análise de viabilidade econômica para os aquecedores solares dimensionados no Capítulo 4, comparativamente ao uso de chuveiro elétrico. Indicadores de rentabilidade e risco, como taxa interna de retorno, valor presente líquido e tempo de retorno de capital são calculados. No Capítulo 5 também é apresentada uma análise de sensibilidade para vários parâmetros técnicos e financeiros do sistema de aquecimento de água, como vida útil do aquecedor solar e valor da tarifa de energia elétrica.

O Capítulo 6 aborda os impactos ambientais da substituição do uso de chuveiro elétrico por aquecedores solares, com foco na redução de emissões de gases de efeito estufa. A partir do cálculo das emissões

evitadas para a residência brasileira típica estudada, foi estimado o potencial de redução de emissões para o setor residencial brasileiro.

Por fim, o Capítulo 7 apresenta as principais conclusões de cada capítulo e futuros trabalhos que podem ser desenvolvidos a partir desta pesquisa de mestrado.

1.2 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Dentre todas as fontes energéticas disponíveis, a energia solar é a mais abundante e pode ser explorada de forma direta e indireta. Se 0,1% da radiação solar que atinge a superfície terrestre fosse convertida em energia elétrica, com 10% de eficiência, seria gerada uma quantidade equivalente a quatro vezes a capacidade mundial instalada. No entanto, mais de 80% da energia utilizada atualmente no mundo possui origem em fontes não renováveis (THIRUGNANASAMBANDAM *et al.* 2010).

A demanda mundial por combustíveis fósseis deverá ultrapassar a produção anual, possivelmente, dentro das próximas duas décadas, o que implicará em aumento de preços de petróleo, carvão mineral e gás natural (THIRUGNANASAMBANDAM *et al.*, 2010). Além disto, a necessidade de reduzir as emissões de gases de efeito estufa, com o objetivo de alcançar metas definidas em tratados internacionais, têm impulsionado muitos países à utilização de fontes renováveis, incluindo a energia solar (KALOGIROU, 2009).

A participação de fontes renováveis na matriz energética brasileira é de, aproximadamente, 47% (BRASIL, 2010a). Porém, a participação de fontes não renováveis na produção de energia primária tem aumentado nos últimos anos, conforme apresentado na Figura 1.1. O incentivo ao uso da energia solar térmica e fotovoltaica no país pode contribuir para reverter esta situação.

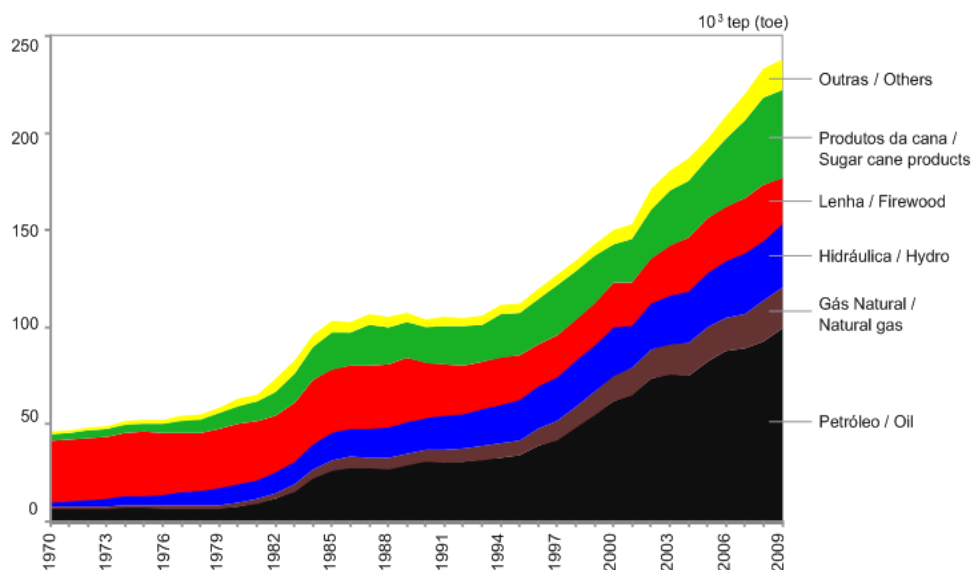


Figura 1.1: Produção de energia primária no Brasil no período de 1970-2009. Fonte: (BRASIL, 2010a).

O consumo de energia em edifícios comerciais e residenciais representa de 20% a 40% da demanda total de energia em países desenvolvidos e possui maior participação que os setores da indústria e de transportes na União Europeia. As edificações apresentam uma grande diversidade de usos finais de energia, dentre eles, sistemas de iluminação, de climatização de ambientes, de aquecimento de água e acionamento de eletrodomésticos (PÉREZ-LOMBARD *et al.*, 2008).

Os edifícios residenciais, comerciais e públicos são responsáveis por 47,6% da energia elétrica consumida no Brasil, com destaque para o setor residencial, cuja parcela corresponde a 23,9% (BRASIL, 2010a). O chuveiro elétrico possui participação de 24% no consumo de energia elétrica em residências brasileiras, e está presente em 73,5% das residências brasileiras (ELETROBRAS, 2007). Com base nestes valores, pode-se afirmar que este equipamento é responsável por, aproximadamente, 4% do consumo nacional de energia elétrica. O consumo de energia por uso final em residências brasileiras é apresentado na Figura 1.2.

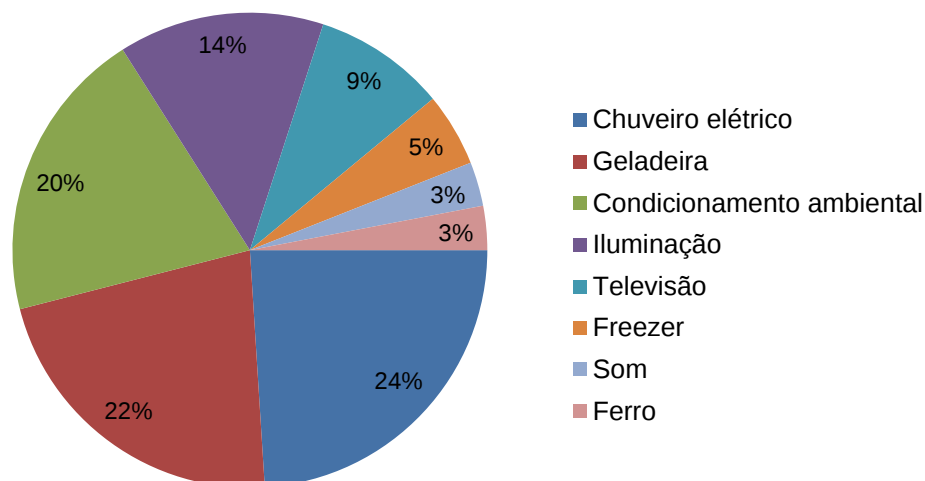


Figura 1.2: Consumo de energia elétrica por uso final em residências brasileiras.

Fonte: (ELETROBRAS, 2007).

Vários países têm incentivado o uso de fontes renováveis de energia em edificações por meio de promulgações de leis, normas e programas de certificação energética (CASALS, 2006). No Brasil, diversas leis sobre uso de energia solar para aquecimento de água em edifícios estão aprovadas ou em tramitação em vários estados brasileiros, dentre eles, São Paulo, Rio de Janeiro, Minas Gerais, Goiás, Mato Grosso, Pernambuco, Paraná e Santa Catarina (DASOL, 2012).

O uso de sistemas solares térmicos e fotovoltaicos no país também tem sido incentivado pela certificação brasileira de eficiência energética de edificações, a qual faz parte do Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE). Atualmente, a etiquetagem de edificações é voluntária no país e destinada a edifícios residenciais, comerciais, públicos e de serviços, mas a tendência é que se torne obrigatória em alguns anos (FOSSATI; LAMBERTS, 2010).

O Brasil recebe níveis médios de radiação solar superiores aos observados na maioria dos países europeus e com baixa variabilidade sazonal, devido à maior parte do país encontrar-se na zona intertropical (MARTINS; PEREIRA, 2011). Apesar disso, o número de projetos destinado ao uso de energia solar no Brasil é muito pequeno quando comparado com os existentes em alguns países europeus com menores índices de radiação como Alemanha, Espanha e Portugal (MARTINS *et al.*, 2007). Na Figura 1.3, é apresentado um diagrama comparativo da radiação solar recebida no

Brasil com a recebida em outros países onde o mercado de energia solar está em um estágio mais avançado.

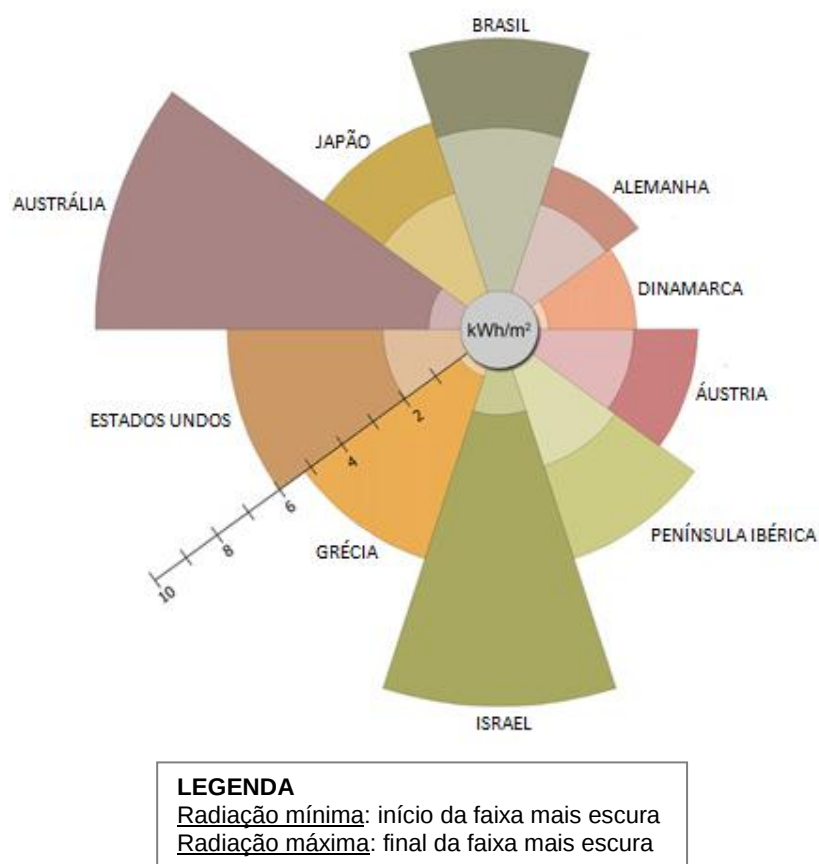


Figura 1.3: Faixa média anual de radiação solar recebida no Brasil e em outros países com tecnologia solar avançada.
 Fonte: (MARTINS; PEREIRA, 2011).

A exploração do potencial solar brasileiro pode reduzir o valor final da conta de energia elétrica do consumidor residencial, seja por uso de aquecedores solares de água ou de sistemas fotovoltaicos. Além disso, o aproveitamento da energia solar pode, se implementada em grande escala, retardar a necessidade de investimentos em usinas geradoras de energia elétrica, evitando impactos ambientais decorrentes da instalação e operação destes empreendimentos (OLIVEIRA *et al.*, 2008).

Tendo em vista que se deve buscar o desenvolvimento sustentável, é importante avaliar opções energéticas renováveis, não somente do ponto de vista da viabilidade técnico-econômica, mas da integração deste aspecto às

políticas públicas, as quais, se bem formuladas, têm o potencial de impulsionar o uso de fontes de energia limpas.

1.3 LIMITAÇÕES DA PRESENTE PESQUISA

Na presente pesquisa foi considerada apenas uma tipologia residencial, a qual possui características que representa 58% das residências construídas no Brasil (TAVARES, 2006). Apesar da alta representatividade do modelo, o uso de outras tipologias permitiria maior número de análises, como, por exemplo, a avaliação do aquecedor solar por tamanho de família.

O sistema de aquecimento solar de água da residência foi simulado para as condições meteorológicas de apenas uma cidade (Viçosa, Minas Gerais). Como o Brasil possui grande extensão territorial, a utilização de arquivos de dados meteorológicos de diferentes cidades possibilitaria analisar a influência da radiação solar sobre parâmetros técnicos e econômicos do aquecedor solar.

Foram analisados aquecedores solares que atendiam a três condições de conforto de banho, definidas pela vazão de água. Apesar do consumo de água ser um fator muito importante do ponto de vista da sustentabilidade social, econômica e ambiental, seu valor não foi contabilizado nas análises de viabilidade econômica e de emissão de gases de efeito estufa.

Também foram analisados aquecedores solares com diferentes níveis de eficiência energética pelo Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE) de edifícios, em que o nível de eficiência é definido pela fração solar anual do sistema. Sabe-se que o valor da fração solar do sistema pode ser modificado pela variação da área do coletor e do volume do reservatório térmico ou por estes dois fatores de forma simultânea. Empregou-se a primeira alternativa por uma questão de facilidade de modulação dos sistemas. Porém, a variação simultânea da área de coletor solar e do volume do reservatório permitiria encontrar o melhor dimensionamento do ponto de vista técnico e econômico para cada valor de fração solar pretendido.

Como fonte de energia auxiliar ao aquecedor solar de água optou-se por uso de eletricidade, a qual é a opção normalmente utilizada no Brasil. O emprego de outras fontes energéticas para suprir o sistema solar, tais como gás natural e gás liquefeito de petróleo, permitiria a realização de análises de viabilidade econômica e de emissões de gases de efeito estufa adicionais, já que estes combustíveis possuem custos financeiros e fatores de emissões diferentes.

As análises de desempenho energético do aquecedor solar foram realizadas exclusivamente por simulação; não houve montagem de experimento. Os coletores solares e os reservatórios térmicos virtualmente empregados nesta pesquisa são avaliados pelo PBE, o que permitiu a validação da modelagem do aquecedor solar por meio da comparação entre os parâmetros técnicos obtidos na simulação e os encontrados em testes realizados pelo INMETRO. Todavia, a montagem do aquecedor solar possibilitaria a obtenção de parâmetros medidos *in loco*, com consequente aumento da precisão dos resultados.

1.4 CONTRIBUIÇÃO DA PESQUISA

O reconhecimento da interdependência do desenvolvimento tecnológico, social, econômico e ambiental requer um equacionamento destas diferentes esferas para tomadas de decisão e formulações de políticas públicas. Muitas vezes, as demandas socioeconômicas entram em conflito com os princípios de conservação ambiental, dificultando a aplicação de instrumentos de planejamento e gestão de recursos como energia e água (CHAMY; MALDONADO, 2003).

Esta pesquisa buscou analisar a substituição do uso de chuveiros elétricos por aquecedores solares de água em residências brasileiras de forma a integrar fatores técnicos, econômicos e ambientais. Várias pesquisas internacionais sobre energias renováveis têm abordado a relação entre estes fatores (KALOGIROU, 2009; TSILINGIRIDIS; MARTINOPOULOS, 2010; CASSARD *et al.*, 2011).

A falta de conhecimento da sociedade sobre energias renováveis e seu valor financeiro são normalmente os principais entraves à difusão deste tipo de tecnologia (BANFI *et al.*, 2008). Segundo uma pesquisa realizada pelo Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL), apenas 55,4% dos brasileiros conhecia o sistema de aquecimento solar de água em 2005; e destes, apenas cerca de 20% trocariam o aquecimento elétrico por aquecedor solar. O PROCEL verificou ainda que um fator de decisão para substituição do chuveiro elétrico por outras fontes energéticas é o custo inicial de cada opção (ELETROBRAS, 2007).

Portanto, pretende-se com os resultados desta pesquisa: i) Difundir informações sobre aquecimento solar de água em residências; ii) Contribuir para revisões futuras do Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (BRASIL, 2010b), o qual rege o processo de etiquetagem de edifícios residenciais no país; e iii) Subsidiar a adoção de políticas públicas que incentivem o uso desta fonte renovável e descentralizada de suprimento de água quente.

1.5 OBJETIVOS

1.5.1 Objetivo geral

Analisar o desempenho técnico, a viabilidade econômica e os impactos ambientais da substituição do chuveiro elétrico por sistema solar térmico em uma residência típica brasileira conforme critérios apresentados no Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais.

1.5.2 Objetivos específicos

- i. Avaliar o desempenho técnico de um sistema de aquecimento solar de água residencial dimensionado para atender diferentes condições de conforto de banho e níveis de eficiência energética;

- ii. Analisar a viabilidade econômica da substituição de chuveiro elétrico por aquecedor solar para diferentes condições de conforto de banho e níveis de eficiência energética; e
- iii. Investigar os impactos ambientais da substituição de chuveiro elétrico por aquecedor solar nas emissões de gases de efeito estufa.

1.6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BANFI, S.; FARSI, M.; FILIPPINI, M.; JAKOB, M. Willingness to pay for energy-saving measures in residential buildings. **Energy Economics**, Singapore, v. 30, n. 2, p. 503-516, 2008.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional 2010: Ano base 2009 - Relatório final**. Rio de Janeiro: EPE, 2010a.

BRASIL. Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial. **Portaria 449, de 25 de novembro de 2010**. Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Residenciais. Rio de Janeiro: INMETRO, 2010b.

CASALS, X. G. Analysis of building energy regulation and certification in Europe: Their role, limitations and differences. **Energy and Buildings**, Oxford, v. 38, n. 5, p. 381-392, 2006.

CASSARD, H.; DENHOLM, P; ONG, S. Technical and economic performance of residential solar water heating in the United States. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Golden, v. 15, n. 8, p. 3789-3800, 2011.

CHAMY, P; MALDONADO, W. T. P. V. Sustentabilidade social, econômica e ambiental de pequenos negócios: o caso da Cooperostra - Cananéia/SP. In: ENCONTRO BIENAL DA ECOECO, 5., 2003, Caxias do Sul. **Anais...** São Paulo: UNICAMP, 2003, 24 p.

DASOL - Departamento Nacional de Aquecimento Solar. **Cidades Solares**. Disponível em: <<http://www.dasolabrava.org.br/informacoes/cidades-solares/>>. Acesso em: 19 abr. 2012.

ELETROBRAS - Centrais Elétricas Brasileiras S.A. **Pesquisa de posse de equipamentos e hábitos de uso: Ano base 2005 - Classe residencial**. Relatório Brasil. Rio de Janeiro: ELETROBRAS/PROCEL, 2007.

FOSSATI, M.; LAMBERTS, R. Eficiência energética da envoltória de edifícios de escritórios de Florianópolis: discussões sobre a aplicação do

método prescritivo do RTQ-C. **Ambiente Construído**, v. 10, n. 2, p. 59-69, 2010.

KALOGIROU, S. Thermal performance, economic and environmental life cycle analysis of thermosiphon solar water heaters. **Solar Energy**, Tampa, v. 83, n.1, p. 39-48, 2009.

MARTINS, F. R.; PEREIRA, E. B. Enhancing information for solar and wind energy technology deployment in Brazil. **Energy Policy**, Hastings, v. 39, n. 7, p. 4378-4390, 2011.

MARTINS, F. R.; PEREIRA, E. B.; ABREU, S. L. Satellite-derived solar resource maps for Brazil under SWERA Project. **Solar Energy**, Tampa, v. 81, n. 4, p. 517-528, 2007.

OLIVEIRA, L. F. C.; FERREIRA, R. C.; ALMEIDA, R. A.; LOBATO, E. J. V.; MEDEIROS, A. M. DE M. Potencial de redução do consumo de energia elétrica pela utilização de aquecedores solares no estado de Goiás. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 28, n. 3, p. 406-416, 2008.

PÉREZ-LOMBARD, L. P.; ORTIZ, J.; POUT, C. A review on buildings energy consumption information. **Energy and Buildings**, Oxford, v. 40, n. 3, p. 394-398, 2008.

TAVARES, S. F. **Metodologia para análise do ciclo de vida energético de edificações residenciais brasileiras**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). 2006. 225 p. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2006.

THIRUGNANASAMBANDAM, M.; INIYAN, S.; GOIC, R. A review of solar thermal technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Golden, v. 14, n. 1, p. 312-322, 2010.

TSILINGIRIDIS, G.; MARTINOPOULOS, G. Thirty years of domestic solar hot water systems use in Greece - energy and environmental benefits - future perspectives. **Renewable Energy**, Brighton, v. 35, n. 2, p. 490-497, 2010.

2. CERTIFICAÇÃO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE EDIFICAÇÕES

Resumo

As edificações possuem grande participação no consumo de energia em países desenvolvidos, superando a demanda energética dos setores de transportes e da indústria na União Europeia. Vários países têm promulgado leis, normas e programas de certificação a fim de atingir o máximo de eficiência energética em edifícios. O benefício de tal prática é refletido em economia de energia, bem como em redução nas emissões de gases de efeito estufa. Atualmente, Estados Unidos, Portugal, Brasil, Canadá, México, Espanha, Austrália, Nova Zelândia, Singapura, Hong Kong, Filipinas, entre outros países, possuem algum tipo de norma em eficiência energética de edificações. Objetivou-se com este capítulo descrever e comparar programas de certificação de eficiência energética de edifícios adotados no Brasil e em determinados países, tais como Estados Unidos e Portugal. Projeções sobre o potencial de economia de energia com a aplicação de programas de etiquetagem são otimistas. Todavia é de extrema importância o esforço mútuo do governo, de profissionais da área de construção civil e da sociedade para a obtenção de bons resultados. O programa português (SCE) se apresenta bastante consolidado e é mandatório, enquanto que os programas brasileiro (PBE) e estadunidense (bEQ) são voluntários. O PBE é destinado a edifícios residenciais, comerciais, de serviços e públicos, o SCE a edifícios residenciais e de serviços e o BEQ a edifícios comerciais.

Palavras-chave: edifícios, etiquetagem, desempenho energético

2.1 INTRODUÇÃO

O uso de energia é essencial para o progresso econômico e para a qualidade de vida do ser humano. Atrelado à mobilidade social, o consumo energético cresce a cada ano no Brasil e no mundo. Parte considerável da energia gerada é demandada pelas edificações para atender sistemas de iluminação e de condicionamento de ar, eletrodomésticos, sistemas de aquecimento de água, dentre outros dispositivos.

De acordo com Pérez-Lombard *et al.* (2008), as edificações comerciais e residenciais são responsáveis por 20% a 40% da energia consumida em países desenvolvidos, superando a demanda dos setores da indústria e dos transportes na União Europeia. No Brasil, as edificações comerciais, públicas e residenciais respondem por 47,6% da demanda nacional de eletricidade (BRASIL, 2010a). O aumento do consumo energético em edifícios pode ser explicado pela melhoria do nível de conforto nas edificações, pelo aumento do tempo de permanência nestas edificações, pela melhoria do poder aquisitivo da sociedade, dentre outros fatores. Neste contexto, a conservação de energia em edifícios é de grande relevância no cenário energético e ambiental.

A redução do consumo de energia em edificações pode ser obtida por meio de leis, normas e programas de certificação de eficiência energética (CASALS, 2006). Diversas técnicas estão sendo desenvolvidas, testadas e aplicadas com o objetivo de contribuir para a sustentabilidade de edifícios. Atualmente, Estados Unidos, Portugal, Brasil, Canadá, México, Espanha, Austrália, Nova Zelândia, Singapura, Hong Kong, Filipinas, dentre outros países, possuem algum tipo de norma em eficiência energética de edificações (CARLO, 2008; BATISTA *et al.*, 2011).

Neste capítulo, o objetivo foi realizar uma revisão de literatura sobre programas de certificação de eficiência energética de edifícios no Brasil e em países que têm se destacado pelo desenvolvimento de tais políticas, especificamente Estados Unidos e Portugal. Pérez-Lombard *et al.* (2009) propõem sete questões que devem ser averiguadas para o desenvolvimento de um programa de certificação energética em edifícios, as quais serão

analisadas para os países citados anteriormente, com foco nos parâmetros referentes a edifícios com sistemas de condicionamento de ar artificial:

- i. O que deve ser calculado para se avaliar a eficiência energética das edificações?;
- ii. Como esse cálculo deve ser feito?;
- iii. Como devem ser estabelecidos os limites de eficiência energética?;
- iv. Com o quê os edifícios energeticamente eficientes devem ser comparados?;
- v. Como é o processo de etiquetagem de edificações?;
- vi. Quais melhorias de eficiência energética devem ser recomendadas?; e
- vii. Quais informações o certificado energético deve incluir?

2.2 CERTIFICAÇÃO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE EDIFÍCIOS NO BRASIL

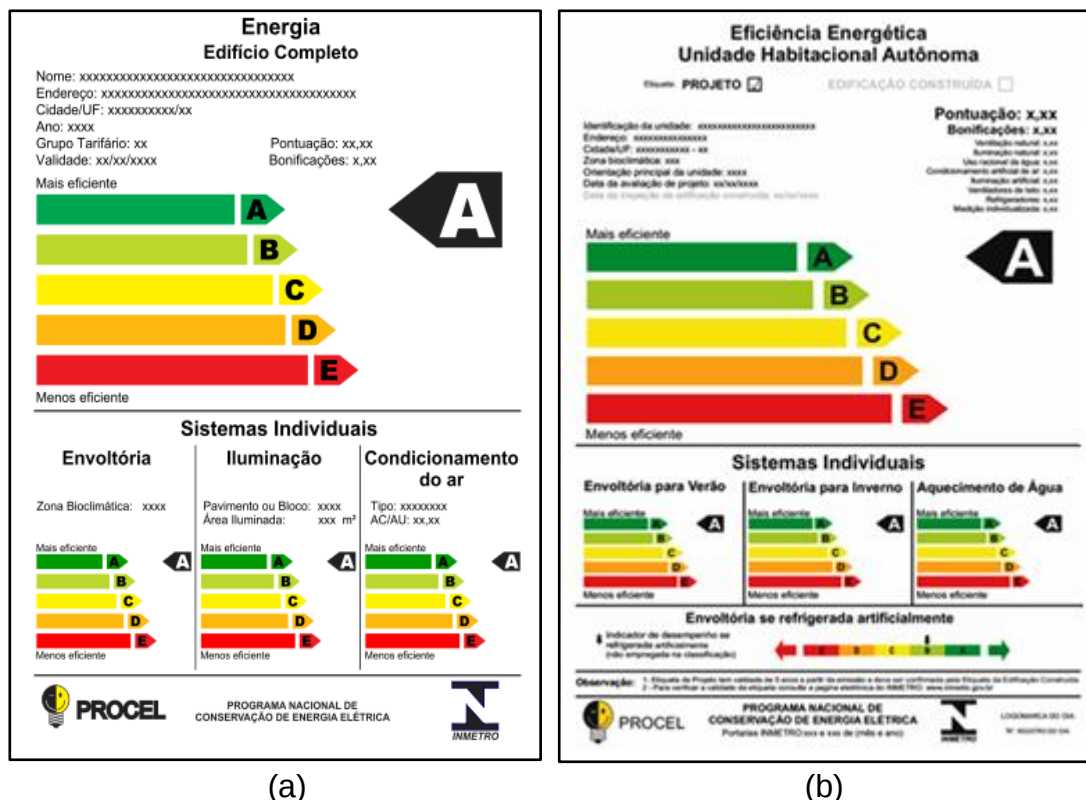
Uma das primeiras leis brasileiras sobre conservação de energia foi promulgada em 1993, Lei nº 8.631/1993, a qual estabelece que a Centrais Elétricas Brasileiras (ELETROBRAS) aloque recursos para expansão e melhoria do fornecimento de energia pública e para a reativação do Programa de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL) (BRASIL, 1993). Quatro anos depois, foi aprovada a Lei nº 9.478/1997, responsável pela criação do Conselho Nacional de Política Energética (CNPE), com o objetivo de promover o uso racional de energia no país (BRASIL, 1997; SOUZA *et al.*, 2009).

A lei brasileira de maior importância na área de conservação de energia em edificações foi publicada em 2001, Lei nº 10.295/2001, a qual exige que o governo federal desenvolva mecanismos de promoção de eficiência energética em edifícios construídos no país (BRASIL, 2001a). Dentre os fatores que impulsionaram a promulgação desta lei pode ser citado o racionamento nacional de energia elétrica ocorrido em 2001, consequência da falta de investimento em geração, transmissão e distribuição de energia elétrica e o baixo volume de água nos reservatórios das usinas hidrelétricas (BARDELIN, 2004).

Ainda em 2001, foi publicado o Decreto nº 4.059/2001 (BRASIL, 2001b), o qual regulamenta a Lei nº 10.295/2001 e estabelece níveis máximos de consumo de energia ou mínimos de eficiência energética para máquinas e eletrodomésticos produzidos ou vendidos no país. Tal decreto dispõe ainda que edifícios deveriam ser projetados e construídos baseados em indicadores técnicos e regulamentos específicos a serem definidos. Neste contexto, foi lançado em 2003 o Plano de Ação para Eficiência Energética em Edificações, que é conhecido como PROCEL Edifica (ELETROBRAS, 2003).

Em consonância com a Lei nº 10.295/2001 e o Decreto nº 4.059/2001, foram publicados, em 2009, o Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética em Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (RTQ-C) (BRASIL, 2009a) e seu documento complementar, intitulado Requisitos de Avaliação de Conformidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (RAC-C) (BRASIL, 2009b). No ano seguinte, 2010, foi publicado o Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência para Edifícios Residenciais (RTQ-R) (2010b) e em 2011 seu documento complementar, o Requisitos de Avaliação de Conformidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Residenciais (RAC-R) (BRASIL, 2011).

A certificação de eficiência energética de edifícios faz parte do Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE), realizado pelo Procel em parceria com o Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO). As edificações são avaliadas em seus estágios de projeto e de edifício construído pelo método prescritivo ou de simulação, apresentados de forma detalhada no regulamentos técnicos (RTQ-C e RTQ-R). No final do processo, a Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE), com validade de cinco anos, é entregue ao proprietário da edificação. Modelos de etiqueta para edifícios comerciais, públicos e de serviços e edifícios residenciais são apresentadas na Figura 2.1.



(a) (b)

Figura 2.1: Modelos de etiquetas PROCEL/INMETRO para edifícios comerciais, públicos e de serviços (a) e residenciais (b).
 Fonte: (BRASIL, 2009b; BRASIL 2011).

Segundo o Procel, o potencial de economia de energia em edifícios por aplicação de medidas de eficiência energética é expressivo. Estima-se que a economia pode chegar a 30% para edificações já existentes, por meio da realização de reformas, e a 50% para novas edificações, com aplicação de tecnologias energeticamente eficientes desde a concepção inicial do projeto (PROCEL, 2012).

Atualmente, a certificação de eficiência energética de edifícios é voluntária no Brasil, mas a expectativa é que se torne obrigatória. Ainda há poucas construções etiquetadas no país, cerca de 30 edifícios comerciais e pouco mais de 100 residenciais (INMETRO, 2012a; INMETRO, 2012b).

2.3 CERTIFICAÇÃO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE EDIFÍCIOS EM OUTROS PAÍSES

2.3.1 Estados Unidos

Nos Estados Unidos, as normas de eficiência energética em edifícios são aplicadas há mais de trintas anos; dentre as primeiras publicadas estão a norma 90/1975, da Sociedade Americana de Engenheiros de Aquecimento, Refrigeração e Ar Condicionado (*American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers* - ASHRAE) e a norma 24/1978, do Estado da Califórnia. Durante a década de 1990, a Agência de Proteção Ambiental (*Environmental Protection Agency* - EPA) desenvolveu o programa *Green Lights*, com o objetivo de incentivar o uso de sistemas de iluminação eficientes em edifícios comerciais e industriais. Alguns anos depois, o *Green Lights* fundiu-se com o programa *Energy Star Buildings*, o qual é voluntário e tem como principal finalidade contribuir para a redução das emissões de gases de efeito estufa por meio da aplicação de medidas de eficiência energética. De acordo com o EPA, o benefício do programa é evidente, visto que edifícios certificados com o *Energy Star Buildings* emitem, em média, 35% menos dióxido de carbono comparado com edifícios similares não certificados (EPA, 2009).

O programa estadunidense de eficiência energética de edificações mais recente é o *Building Energy Quotient* (bEQ), desenvolvido pela ASHRAE. O bEQ traz novidades em relação ao *Energy Star Buildings*, como por exemplo, apresenta maior diferenciação entre níveis de eficiência energética, incluindo uma classificação específica para Edifícios Energia Zero, edifícios estes caracterizados por produzirem toda a energia que consomem, ou seja, não possuem dependência energética externa (NELSON, 2010).

O programa *Building Energy Quotient* propõe dois tipos de etiquetas: como projetado (*as designed*) e em operação (*in operation*). A primeira etiqueta foi lançada em 2011, depois de uma fase piloto e a segunda, possivelmente, será lançada neste ano de 2012, de acordo com o

cronograma publicado pela ASHRAE. Ainda não há prazo de validade para a certificação bEQ, mas a ASHRAE recomenda uma reavaliação do edifício a cada 3 anos (ASHRAE, 2012a). Atualmente, a adesão ao programa é de carácter voluntário e destinado a edifícios comerciais (aqui também se inserem os de serviços). Na Figura 2.2 é apresentado um modelo de etiqueta bEQ.

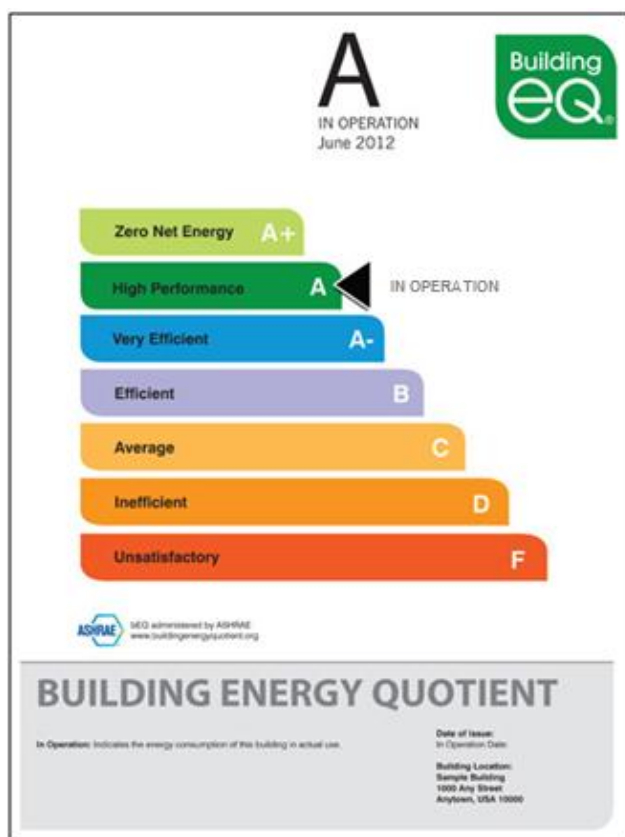


Figura 2.2: Modelo de etiqueta bEQ - *In Operation*.
Fonte: (ASHRAE, 2012b).

2.3.2 Portugal

Apesar de as primeiras normas europeias de eficiência energética terem sido lançadas na década de 1960 (WIEL *et al.*, 2006; WAIDE *et al.*, 1997), o primeiro instrumento legal de Portugal a tratar de eficiência energética em edificações foi introduzido pela promulgação do Decreto nº 40/1990, com a publicação das primeiras versões de regulamentos técnicos referentes à etiquetagem de edifícios (PORTUGAL, 2006a).

Conforme determinado pelo Parlamento Europeu por meio do Decreto nº 2002/1991, o qual dispõe sobre medidas de eficiência energética em edificações, o governo português criou o Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior nos Edifícios (SCE) e revisou o Regulamento dos Sistemas Energéticos e de Climatizações nos Edifícios (RSECE) e o Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE), o primeiro destinado a edifícios condicionados artificialmente e o segundo destinados a edifícios sem sistemas de climatização artificial (PORTUGAL, 2006a; PORTUGAL, 2006b).

Assim como a etiquetagem brasileira e estadunidense, a portuguesa possui dois tipos de etiqueta: projeto e edifício construído. Na etapa de projeto, é emitida a Declaração de Conformidade Regulamentar caso o projeto esteja em consonância com os regulamentos RCCTE ou RSECE e na etapa de edifício construído (novo ou existente) é emitido o Certificado Energético (ADENE, 2012c).

A introdução do programa de etiquetagem de edificações em Portugal ocorreu em três etapas, iniciando-se em 2007 para edifícios residenciais e de serviços (inclusos nesta classificação também os comerciais) com área de piso maior que 1.000 m². No ano seguinte, 2008, foram incluídos todos os novos edifícios, independentemente de sua área. Por fim, em 2009, foram incluídos edifícios que passaram por reformas ou já existentes. As etiquetas de edifícios residenciais possuem validade de 10 anos e as de edifícios de serviços de 2 a 10 anos, dependendo do tipo de atividade desenvolvida (ADENE, 2012a). Parte de um certificado energético português para edifício residencial é apresentado na Figura 2.3.



Certificação Energética
e Ar Interior
EDIFÍCIOS

Nº CER 1234567/2007



CERTIFICADO DE DESEMPENHO ENERGÉTICO E DA QUALIDADE DO AR INTERIOR

TIPO DE EDIFÍCIO: EDIFÍCIO HABITAÇÃO UNIFAMILIAR / FRACÇÃO AUTÓNOMA DE EDIF. MULTIFAMILIAR

Morada / Situação:

Localidade _____ Freguesia _____

Concelho _____ Região _____

Data de emissão do certificado _____ Validade do certificado _____

Nome do perito qualif. _____ Número do perito qualif. _____

Imóvel descrito na _____ Conservatória do Registo Predial de _____

sob o nº _____ Art. matricial nº _____ Fracção autón. _____

Este certificado resulta de uma verificação efectuada ao edifício ou fracção autónoma, por um perito devidamente qualificado para o efeito, em relação aos requisitos previstos no Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE, Decreto-Lei 80/2006 de 4 de Abril), classificando o imóvel em relação ao respectivo desempenho energético. Este certificado permite identificar possíveis medidas de melhoria de desempenho aplicáveis à fracção autónoma ou edifício, suas partes e respectivos sistemas energéticos e ventilação, quer no que respeita ao desempenho energético e à qualidade do ar interior.

1. ETIQUETA DE DESEMPENHO ENERGÉTICO

INDICADORES DE DESEMPENHO		CLASSE ENERGÉTICA
Necessidades anuais globais estimadas de energia primária para climatização e águas quentes	kgep/m ² .ano	A A*
		B* B
		C
Valor limite máximo regulamentar para as necessidades anuais globais de energia primária para climatização e águas quentes (limite inferior da classe B*)	kgep/m ² .ano	D
		E
		F
Emissões anuais de gases de efeito estufa associadas à energia primária para climatização e águas quentes	toneladas de CO ₂ equivalentes por ano	G

Figura 2.3: Parte do certificado SCE para edifícios do tipo Habitação Unifamiliar/Fracção Autónoma de Edifício Multifamiliar.
Fonte: (ADENE, 2012b).

O programa de certificação de eficiência energética português é de carácter mandatário desde julho de 2007 (ADENE, 2012a) e têm certificado um grande número de edifícios: cerca de 3.000 construções novas e 15.000 já existentes todo mês. A maioria das edificações novas tem recebido o nível mais alto de eficiência, indicando que a tendência é de se ter cada vez mais edifícios com menor consumo energético no país (IEA, 2010).

2.4 COMPARAÇÃO ENTRE OS PROGRAMAS DE ETIQUETAGEM BRASILEIRO, ESTADUNIDENSE E PORTUGUÊS

As questões propostas por Pérez-Lombard *et al.* (2009) para avaliar programas de certificação de eficiência energética de edifícios serão apresentadas a seguir para Brasil (PBE), Estados Unidos (bEQ) e Portugal (SCE).

i. O que deve ser calculado para se avaliar a eficiência energética das edificações?

Brasil: Na avaliação de projeto devem ser calculados indicadores de consumo (método prescritivo) ou o consumo de energia (método de simulação) com base nas características da envoltória, dos sistemas de iluminação, do sistema de aquecimento de água e eventuais bonificações. Bonificações são iniciativas sustentáveis adotadas nos edifícios, como uso racional de água e utilização de energias provenientes de fontes renováveis. Na avaliação do edifício construído, são verificados se as características presentes no projeto constam na construção, confirmando ou não o nível de eficiência energética obtido na fase de projeto (BRASIL, 2009a; BRASIL, 2010b).

Estados Unidos: Na avaliação do edifício como projetado (*as designed*) é calculado o consumo energético do edifício com base em componentes e estruturas de projeto (sistemas mecânicos, envoltória, orientação e iluminação natural). Na avaliação do edifício em operação (*in operation*) calcula-se o consumo energético após um ano de uso, levando-se em consideração não apenas as características da edificação, mas também condições operacionais (JARNAGIN, 2009).

Portugal: Na avaliação de projeto deve ser calculado o consumo energético com base em características da envoltória, dos sistemas de iluminação e do condicionamento de ar e do sistema de aquecimento de água. Na avaliação do edifício construído é realizada uma visita ao imóvel para verificar a situação do mesmo e efetuar o diagnóstico de eficiência energética (ADENE, 2012a; ADENE, 2012c).

ii. Como esse cálculo deve ser feito?

Brasil: A eficiência energética de um edifício na fase de projeto é calculada por meio do método prescritivo ou de simulação, apresentados de forma detalhada nos RTQs. No primeiro são utilizadas equações para determinar a eficiência energética do edifício e o segundo se baseia em uma comparação do consumo de energia entre dois modelos de edifícios: o real (o qual se pretende etiquetar) e o de referência (modelado conforme uma série de condições especificadas presentes nos RTQs) (BRASIL, 2009a; BRASIL, 2010b). Na avaliação do edifício construído deve ser utilizada uma série de métodos e equipamentos, apresentados nos RACs, para avaliar o edifício *in loco* (BRASIL, 2009b; BRASIL, 2011).

Estados Unidos: A avaliação do edifício como projetado (as *designed*) é baseada em simulações de custo energético do edifício com base em dados de projetos, de acordo com o método Orçamento do Custo da Energia (*Energy Cost Budget*). A avaliação do edifício em operação (*in operation*) baseia-se no consumo real de energia, com base em medições realizadas *in loco* (ASHRAE, 2009).

Portugal: O cálculo de consumo de energia do edifício em fase de projeto é realizado por meio de uso de um programa computacional desenvolvido pelo Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação de Portugal ou por meio de planilhas, dependendo do tipo de edifício em análise. Os modelos numéricos do programa ou planilhas são baseados nas diretrizes do RSECE e do RCCTE. Na avaliação do edifício construído, assim como nos programas brasileiro e estadunidense, uma avaliação de eficiência energética é realizada *in loco* (SANTOS *et al.*, 2008).

iii. Como devem ser estabelecidos os limites de eficiência energética?

Brasil: O PBE utiliza uma escala gradual de nível A (mais eficiente) ao nível E (menos eficiente), apresentada no Quadro 2.1. No método prescritivo, o nível de eficiência energética é obtido em função da Pontuação Total (PT), a qual é definida por meio de indicadores de consumo energético da edificação. Já no método de simulação, a escala apresentada no Quadro 2.1 é utilizada para definir o consumo de energia do edifício de referência para cada nível de eficiência energética. O consumo do edifício real deve ser menor que o consumo do edifício de referência para o nível de eficiência energética pretendido (BRASIL, 2009a; BRASIL, 2010b).

Quadro 2.1: Escala de eficiência energética do PBE

Pontuação, PT	Classificação
$4,5 \leq P < 5,0$	A
$3,5 \leq P < 4,5$	B
$2,5 \leq P < 3,5$	C
$1,5 \leq P < 2,5$	D
$P < 1,5$	E

Fonte: (BRASIL, 2009a; BRASIL, 2010b).

Estados Unidos: A escala de eficiência energética do bEQ é dividida em sete categorias, de A+ (edifício energia zero) a F (edifício com eficiência energética insatisfatória), apresentada no Quadro 2.2. O nível de eficiência energética é obtido por meio da razão (R) entre o consumo de energia do edifício avaliado e de um edifício de referência (ASHRAE, 2009).

Quadro 2.2: Escala de eficiência energética do bEQ

Classificação	Descrição	Razão, R
A+	Edifício energia zero	$R \leq 0$
A	Alto desempenho	$0,01 \leq R \leq 0,25$
A-	Muito bom	$0,26 \leq R \leq 0,50$
B	Bom	$0,51 \leq R \leq 0,75$
C	Razoável	$0,76 \leq R \leq 1,00$
D	Ruim	$1,01 \leq R \leq 1,25$
F	Insatisfatório	$R > 1,25$

Fonte: (ASHRAE, 2009).

Portugal: No SCE os edifícios são classificados de nível A+ (mais eficiente) a G (menos eficiente). A graduação de eficiência energética é diferenciada por tipo de edificação. A escala referente a edifícios residenciais é apresentada no Quadro 2.3. Assim como para o bEQ, o nível de eficiência energética é obtido por meio da razão (R) entre o consumo de energia do edifício avaliado e de um edifício de referência (ADENE, 2012a).

Quadro 2.3: Escala de eficiência energética do SCE para edifícios residenciais

Edifícios Existentes	Novos Edifícios	Classificação	Razão, R
		A+	$R \leq 0,25$
		A	$0,25 < R \leq 0,50$
		B	$0,50 < R \leq 0,75$
		B-	$0,75 < R \leq 1,00$
		C	$1,00 < R \leq 1,50$
		D	$1,50 < R \leq 2,00$
		E	$2,00 < R \leq 2,50$
		F	$2,50 < R \leq 3,00$
		G	$3,00 < R$

Fonte: (ADENE, 2012a).

iv. Com o quê os edifícios energeticamente eficientes devem ser comparados?

Brasil: O país ainda não possui um sistema consolidado de avaliação comparativa (*benchmarking*) de edifícios, ou seja, ainda não há dados suficientes para criar modelos que expressem a realidade nacional. Os requisitos de consumo de energia foram estabelecidos com base nos resultados da Pesquisa de Posse de Eletrodomésticos e Hábitos de Uso, realizada pelo PROCEL, atualizada em 2007 para edifícios residenciais e lançado em 2008 para edifícios comerciais (ELETROBRAS, 2007; ELETROBRAS, 2008; MORISHITA; GHISI, 2010).

Estados Unidos: O consumo de energia dos edifícios é comparado com padrões de consumo provenientes da Pesquisa de Consumo Energético de

Edifícios Comerciais (*Commercial Buildings Energy Consumption Survey – CBECS*) (NELSON, 2010).

Portugal: O consumo de energia dos edifícios é comparado com o consumo típico de diversas tipologias de edifícios presentes em Portugal, considerando seus hábitos de consumo (DGEG, 2002).

v. Como é o processo de etiquetagem de edificações?

Brasil: A avaliação do edifício é realizada por um Organismo de Inspeção Acreditado pelo INMETRO (OIA), também chamado de Laboratório de Inspeção. Na Figura 2.4 é apresentado um fluxograma das etapas do processo de certificação de um edifício pelo PBE.

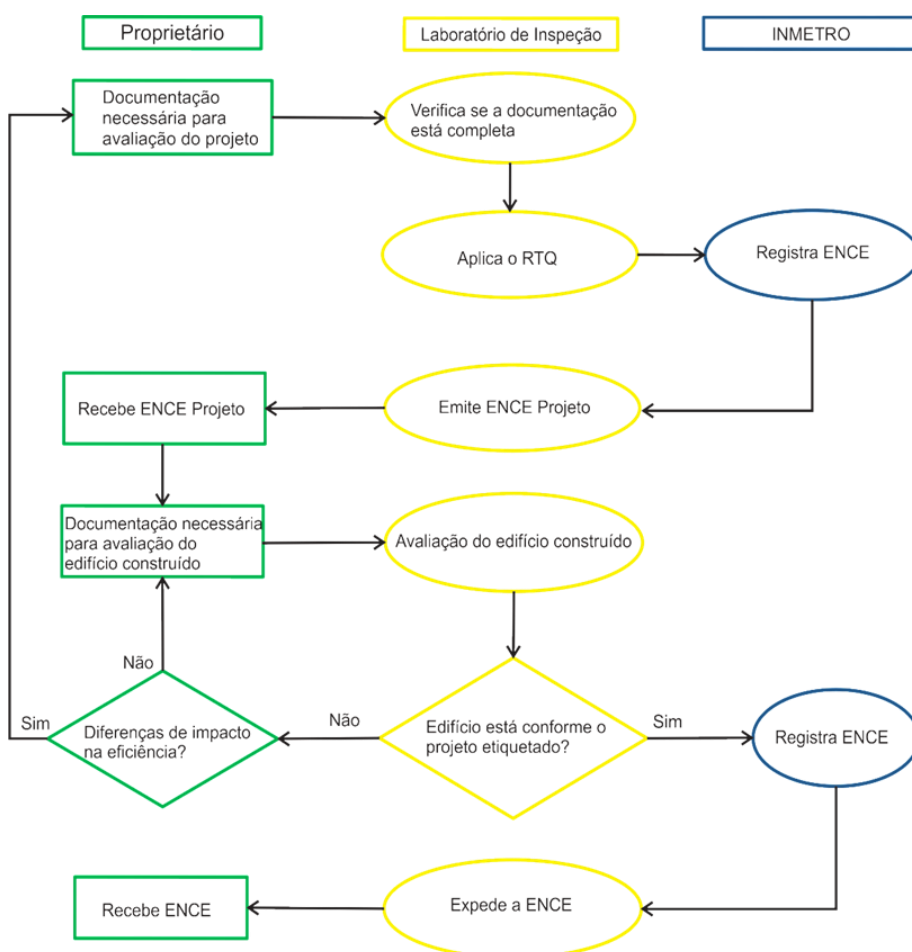


Figura 2.4: Processo para aquisição da etiqueta PROCEL/INMETRO. Fonte: (BRASIL, 2009b - modificado).

Estados Unidos: O responsável pelas avaliações é um profissional licenciado pela ASHRAE (JARNAGIN, 2009; NELSON, 2010). Na Figura 2.5 é apresentado o processo de aquisição da etiqueta bEQ.

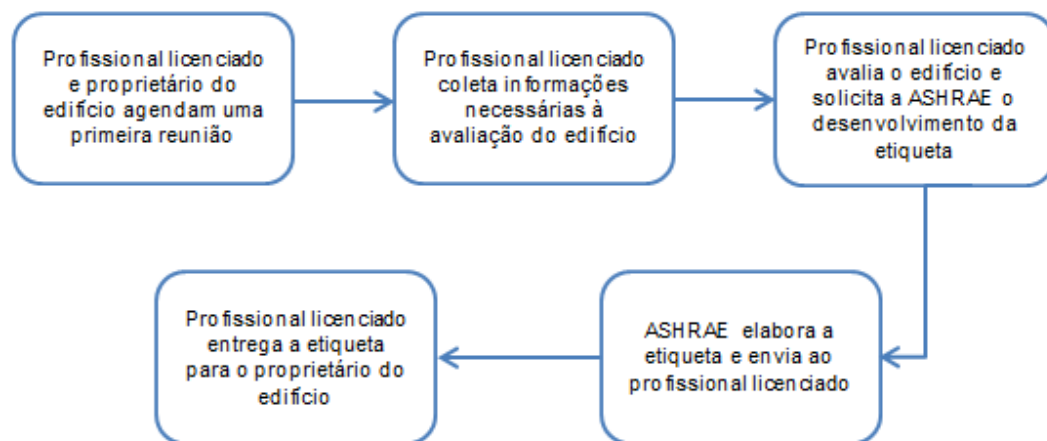


Figura 2.5: Processo para aquisição da etiqueta bEQ.
Fonte: (ASHRAE, 2012c - modificado).

Portugal: Assim como no bEQ, a avaliação no SCE é feita por profissionais licenciados, formados em Arquitetura ou Engenharia com no mínimo cinco anos de experiência em climatização de edifícios (ADENE, 2012a). Na Figura 2.6 é apresentado o processo de emissão do certificado de eficiência energética pelo SCE.

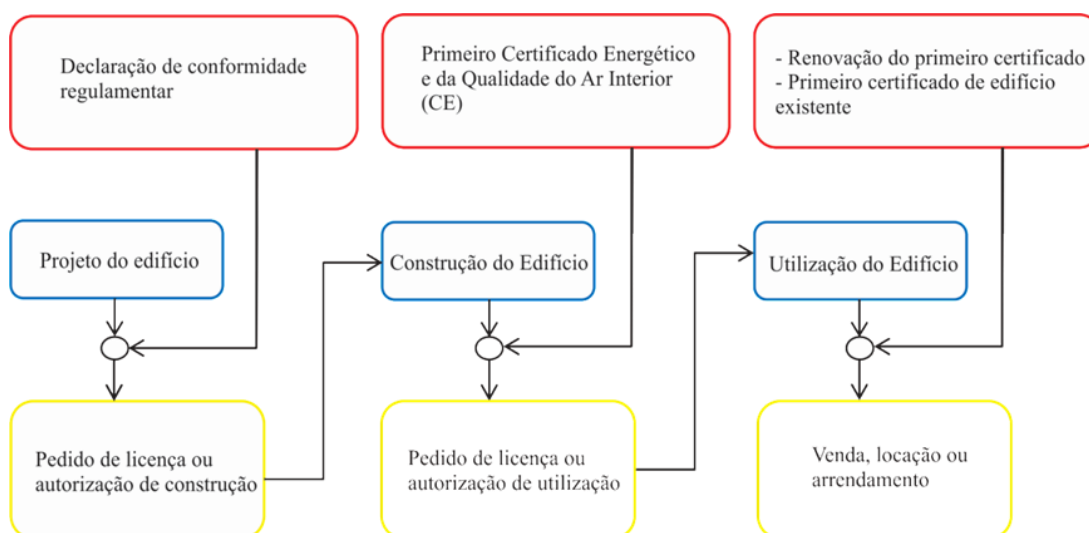


Figura 2.6: Processos para aquisição do certificado SCE.
Fonte: (ADENE, 2012c).

vi. Quais melhorias de eficiência energética devem ser recomendadas?

Brasil: O PBE não elabora um relatório com recomendações de melhoria de eficiência energética para as edificações etiquetadas.

Estados Unidos: O bEQ emite um relatório com descrição de oportunidades de melhoria da eficiência energética, incluindo estimativas de economia de energia, custos para implementação de tais medidas e tempo de retorno de capital (ASHRAE, 2009).

Portugal: Assim como o bEQ, o SCE apresenta recomendações de melhoria da eficiência energética para os edifícios etiquetados. É emitido um relatório incluindo potencial de economia de energia, custos financeiros para implementação das medidas e tempo de retorno de capital (ADENE, 2012a).

vii. Quais informações o certificado energético deve incluir?

Brasil: A etiqueta do PBE apresenta a classificação geral do edifício, a classificação dos sistemas avaliados separadamente (etiquetas parciais) e a pontuação obtida por bonificações, além de informações básicas, tais como localização, zona bioclimática, orientação do edifício e data de emissão e de validade da etiqueta. Também é entregue ao proprietário do edifício o relatório de conformidade, o qual indica os cálculos e parâmetros utilizados na avaliação (BRASIL, 2009b; BRASIL, 2011).

Estados Unidos: A etiqueta bEQ apresentada a classificação de eficiência energética do edifício, a data de emissão da etiqueta e informações da construção, como nome e endereço. O proprietário do imóvel também recebe o relatório de avaliação, contendo informações detalhadas sobre o desempenho energético do edifício, bem como sugestões de melhorias de eficiência energética (JARNAGIN, 2009). O relatório também inclui cálculos

de emissões de gás carbônico emitidas pela utilização do edifício (ASHRAE, 2012a).

Portugal: No certificado SCE é apresentada informações básicas da edificação, o nome do profissional responsável pelas avaliações, o nível de eficiência energética alcançado pelo edifício, sugestões de melhoria da eficiência energética e de emissões de gases do efeito estufa (ADENE, 2012a).

2.5 DISCUSSÃO

A aplicação de programas de etiquetagem de edifícios é relativamente recente, entre os países analisados os Estados Unidos é o pioneiro (*Energy Star*, 1999 e *bEQ*, 2011), seguido de Portugal (SCE, 2006) e Brasil (PBE para edifícios, 2009). A Figura 2.7 apresenta a trajetória de cada país na linha do tempo, considerando as leis, normas e programas de eficiência energética em edificações. Observa-se que as primeiras normas americanas sobre conservação de energia em edifícios surgiram na década de 70, enquanto que no Brasil tais políticas começaram a ser desenvolvidas na década de 90.



Figura 2.7: Progresso na implantação de normas e de programas de eficiência energética em edificações no Brasil, nos Estados Unidos e em Portugal.

A seguir são discutidos os pontos principais dos programas de etiquetagem brasileiro, estadunidense e português. No Quadro 2.4 são apresentadas informações-chave de cada programa.

Quadro 2.4: Comparação entre os programas de etiquetagem de edifícios no Brasil, Estados Unidos e Portugal

Parâmetro/País	Brasil	Estados Unidos	Portugal
Programa	PBE	<i>bEQ</i>	SCE
Lançamento	2009	2011	2007
Executor	Organismo de Inspeção Acreditado	Profissional licenciado	Profissional licenciado
Tipos de edifícios contemplados	Comercial, de serviços, público e residencial	Comercial ¹	Residencial e de serviços ¹
Tipos de etiqueta	Projeto e Edifício Construído	<i>As Designed e In Operation</i>	Edifício Construído
Adesão à certificação	Voluntária	Voluntária	Obrigatória
Validade da etiqueta	5 anos	Ainda não há, ASHRAE recomenda 3 anos	2 a 10 anos, dependendo do tipo de edifício
Sugestões de melhoria de eficiência	Não	Sim	Sim
Quantificação de emissões de CO ₂	Não	Sim	Sim

¹A classificação engloba edifícios comerciais e de serviços.

No Brasil, a certificação é executada por um Organismo de Inspeção Acreditado, nos Estados Unidos e em Portugal por um profissional licenciado. A criação de órgãos certificadores é uma demanda no Brasil, visto que há apenas uma unidade atualmente acreditada pelo INMETRO. Ressalta-se a qualidade de avaliação por organismos comparados a profissionais independentes, uma vez que há uma equipe multidisciplinar envolvida na certificação (arquitetos, engenheiros e especialistas em energias renováveis). Entretanto, a criação de organismos certificadores demanda mais tempo que o licenciamento de profissionais.

Diferente do PBE, a certificação *bEQ* e SCE geram relatórios com descrição de melhorias de eficiência energética e estudos de viabilidade

econômica sobre a implementação de tais medidas. Estas análises, energética e financeira, incentivam o emprego de melhores níveis de eficiência energética, contribuindo para o maior impacto do programa de etiquetagem. Seria necessária uma adaptação por parte do PBE, já que o programa se baseia apenas na medição de eficiência energética de produtos. No Brasil, estudos de melhoria de eficiência energética de edifícios têm sido realizados atualmente por consultores da área. A inclusão deste tipo de análise na avaliação brasileira é um passo importante para aprimorar a certificação de eficiência energética de edifícios.

É importante destacar que o PBE não quantifica as emissões de gás carbônico, como os programas SCE e bEQ, novamente, devido ao fato de ser um programa que se baseia exclusivamente no cálculo de eficiência energética de produtos. Assim como a inserção de estudos de melhoria de eficiência energética, a quantificação de emissões de gases pode ser um ponto complementar a ser desenvolvido futuramente.

Diferentemente do bEQ, o PBE e o SCE não avaliam as condições operacionais, o que pode gerar resultados não tão precisos sobre o comportamento energético dos edifícios. Essencialmente, se o comportamento do usuário for subestimado, o edifício poderá receber uma classificação melhor, não representando corretamente o consumo real de energia do edifício.

Enquanto o objetivo do PBE e do SCE é atingir o máximo de eficiência energética, o bEQ considera a possibilidade dos edifícios não possuírem dependência externa de energia (Edifícios Energia Zero). Em Portugal, está prevista a inclusão deste tipo de edifício futuramente (UE, 2010). No Brasil, apenas o regulamento referente a edifícios comerciais, de serviços e públicos contempla o uso de energia solar fotovoltaica (por meio de bonificação). A promulgação da Resolução ANEEL nº 482/2012 (BRASIL, 2012), a qual estabelece que as empresas distribuidoras de energia elétrica se preparem para receber energia gerada por sistemas de mini e microgeração, é um passo importante para impulsionar o uso de sistemas fotovoltaicos em edifícios brasileiros. Como os regulamentos passam por revisões frequentes, espera-se que haja a inclusão futura do uso de energia

solar fotovoltaica no regulamento residencial, assim como uma classificação para Edifícios Energia Zero.

Por fim, é necessário o esforço mútuo do governo, profissionais da área de construção civil e população para que as metas de economia de energia por meio de aplicação de programas de etiquetagem de edifícios sejam atingidas. Assim, os benefícios se refletirão no meio ambiente, com menores impactos negativos; nos usuários dos edifícios, que poderão ter menores gastos com energia; e no governo, com redução de custos no setor energético.

2.6 CONCLUSÃO

Vários países têm adotado leis, normas e programas de certificação de eficiência energética de edifícios para promover a redução do consumo de energia e de emissões de gases de efeito estufa. Dentre os programas analisados neste capítulo, o português se apresenta mais consolidado, é mandatório e engloba edifícios residenciais e de serviços, enquanto que os programas brasileiro e estadunidense são voluntários, sendo que o primeiro é destinado a edifícios residenciais, comerciais, de serviços e públicos e o segundo, a edifícios comerciais.

Entre as principais diferenças entre os programas de etiquetagem brasileiro (PBE), americano (bEQ) e português (SCE) podem ser citados: i) O bEQ e o SCE geram relatórios de melhorias de eficiência energética e quantificação de emissões de gases de efeito estufa e o PBE não; ii) A avaliação no bEQ e no SCE é realizado por um profissional licenciado e no PBE por um Organismo de Inspeção Acreditado; e iii) Apenas o bEQ considera as condições operacionais do edifício para definir o nível de eficiência energética construído.

As projeções sobre economia de energia e redução de emissões de gases de efeito estufa com a aplicação de programas de eficiência energética de edificações são otimistas, porém é necessária a participação efetiva do governo, de profissionais da área de construção civil e da

sociedade, para que programas de etiquetagem apresentem bons resultados.

2.7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADENE - Agência para a Energia. **Perguntas e Respostas sobre o SCE – Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior de Edifícios**. Disponível em: <http://www.adene.pt/pt-pt/SubPortais/SCE/PerguntasRespostas/Documents/PR_SCE_Verso_12_Mar_2009.pdf>. Acesso em: 01 mai. 2012a.

ADENE - Agência para a Energia, 2012. **Exemplos de certificados**. Disponível em: <<http://www.adene.pt/pt-pt/SubPortais/SCE/Apresentacao/Certificacaodeedificios/Paginas/Exemplosdecertificados.aspx>>. Acesso em: 27 abr. 2012b.

ADENE – Agência para a Energia. **Etapas da Certificação**. Disponível em: <<http://www.adene.pt/pt-pt/SubPortais/SCE/Apresentacao/ProcessodaCertificacao/Paginas/Etapasdacertificacao.aspx>>. Acesso em: 05 mai. 2012c.

ASHRAE - American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. **ASHRAE Building Energy Labeling Program - Implementation Report**, Atlanta: ASHRAE, 2009. 46 p.

ASHRAE - American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. **Frequently Asked Questions**. Disponível em: <http://www.buildingeq.com/index.php?option=com_content&view=article&id=107#B4>. Acesso em: 05 jun. 2012a.

ASHRAE - American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. **Building Owners: Order plaques and promote label**. Disponível em: <<http://buildingeq.com/index.php/what-is-beq>>. Acesso em: 05 mai. 2012b.

ASHRAE - American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. **Steps to Earn a Label**. Disponível em: <<http://buildingeq.com/index.php/get-started>>. Acesso em: 31 mai. 2012c.

BARDELIN, C. E. A. **Os efeitos do racionamento de energia elétrica ocorrido no Brasil em 2001 e 2002 com ênfase no consume de energia elétrica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia). 2004. 112 p. Unisersidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2004.

BRASIL. **Lei n. 8631, de 04 de março de 1993**. Dispõe sobre a fixação dos níveis das tarifas para o serviço público de energia elétrica, extingue o

regime de remuneração garantida e dá outras providências. Brasília: Diário Oficial da União, 04 março 1993.

BRASIL. **Lei n. 9478, de 06 de agosto de 1997.** Dispõe sobre a política energética nacional, as atividades relativas ao monopólio do petróleo, institui o Conselho Nacional de Política Energética e a Agência Nacional do Petróleo e dá outras providências. Brasília: Diário Oficial da União, 06 de agosto de 1997.

BRASIL. **Lei n. 10295, de 17 de outubro de 2001.** Dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia e dá outras providências. Brasília: Diário Oficial da União, 17 de outubro de 2001a.

BRASIL. **Decreto n. 4059, de 19 de dezembro de 2001.** Regulamenta a Lei no 10.295, de 17 de outubro de 2001, que dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia, e dá outras providências. Brasília: Diário Oficial da União, 20 de dezembro 2001b.

BRASIL. Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial. **Portaria 53, de 27 de fevereiro de 2009.** Regulamento Técnico da Qualidade para Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos. Rio de Janeiro: INMETRO, 2009a.

BRASIL. Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial. **Portaria 185, de 22 de junho de 2009.** Requisitos de Avaliação de Conformidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos. Rio de Janeiro: INMETRO, 2009b.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional 2010: Ano Base 2009.** Relatório final. Rio de Janeiro: EPE, 2010a.

BRASIL. Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial. **Portaria 449, de 25 de novembro de 2010.** Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Residenciais. Rio de Janeiro: INMETRO, 2010b.

BRASIL. Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial. **Portaria 122, de 15 março de 2011.** Requisitos de Avaliação da Conformidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais. Rio de Janeiro: INMETRO, 2011.

BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Normativa 482, de 17 de abril de 2012.** Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências. Diário Oficial, 08 de maio de 2012.

BATISTA, N. N.; ROVERE, E. L.; AGUIAR, J. C. R. Energy efficiency labeling of buildings: An assessment of the Brazilian case. **Energy and Buildings**, Oxford, v. 43, n. 6, p. 1179-1188, 2011.

CARLO, J. **Desenvolvimento de Metodologia de Avaliação da Eficiência Energética do Envolvimento de Edificações Não-residenciais**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). 2008. 215 p. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008

CASALS, X. G. Analysis of building energy regulation and certification in Europe: Their role, limitations and differences. **Energy and Buildings**, Oxford, v. 38, n. 5, p. 381-392, 2006.

DGEG - Direção Geral de Energia e Geologia. **Eficiência Energética nos Edifícios**. Lisboa: Ogilvy & Mather, 2002. 54 p.

ELETROBRAS - Centrais Elétricas Brasileiras S.A. **Procel Edifica** - Plano de Ação para Eficiência Energética em Edificações. Rio de Janeiro: ELETROBRAS/PROCEL, 2003.

ELETROBRAS - Centrais Elétricas Brasileiras S.A. **Pesquisa de posse de equipamentos e hábitos de uso**: Ano base 2005 - Classe residencial. Relatório Brasil. Rio de Janeiro: ELETROBRAS/PROCEL, 2007.

ELETROBRAS - Centrais Elétricas Brasileiras S.A. **Pesquisa de posse de equipamentos e hábitos de uso**: Ano base 2005 - Classe Comercial. Relatório Brasil. Rio de Janeiro: ELETROBRAS/PROCEL, 2008.

EPA - Environmental Protection Agency. **Celebrating a Decade of Energy Star Buildings**. Estados Unidos: EPA, 2009. 19 p.

IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Policy Pathway, Energy performance certification of buildings**. França: IEA. 2010. 60 p

INMETRO - Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial. **Tabela de edificações comerciais, de serviços e públicos**. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/consumidor/pbe/tabelas-comerciais.pdf>. Acesso em: 01 de abr. de 2012a.

INMETRO - Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial. **Tabelas de consumo/eficiência energética**. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/consumidor/pbe/residenciais.asp>. Acesso em: 01 de abr. de 2012b.

JARNAGIN, R. E. ASHRAE Building EQ. **ASHRAE Journal**, v. 51, p. 18-19, 2009.

MORISHITA, C.; GHISI, E. Assessment of the impact of energy-efficient household appliances on the electricity consumption in the residential sector

of Brazil. In: WORLD ENERGY CONGRESS, 21., 2010, Montreal. **Anais...** Montreal: WEC, 2010.

NELSON, R. O. **Building Energy Labeling: A Path to Improved Energy Performance for Commercial Buildings**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura). 2010. 188 p. Universidade do Novo México, Novo México, 2010.

PÉREZ-LOMBARD, L; ORTIZ, J.; POUT, C. Review on buildings energy consumption information. **Energy and Buildings**, Oxford, v. 40, n. 3, p. 394-398, 2008.

PÉREZ-LOMBARD, L.; ORTIZ, J.; GONZÁLEZ, R.; MAESTRE, I. R. A review of benchmarking, rating and labelling concepts within the framework of building energy certification schemes. **Energy and Buildings**, Oxford, v. 41, n. 3, p. 272-278, 2009.

PORTUGAL. **Decreto-lei 80/2006, de 04 de abril de 2006**. Diário da República, I Série - A, de 04 de abril de 2006a.

PORTUGAL. **Decreto-lei 79/2006, de 04 de abril de 2006**. Diário da República, I Série - A, de 04 de abril de 2006b.

PROCEL - Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica. **Edificações**. Disponível em: <<http://www.eletrobras.com/elb/procel/main.asp?TeamID=%7BA8468F2A-5813-4D4B-953A-1F2A5DAC9B55%7D>>. Acesso em: 04 de jun. 2012.

SANTOS, P.; MATEUS, P.; MALDONADO, E. Implementation of the EPBD in Portugal: Status and planning - March 2008. In: EUROPEAN COMMISSION (Org.). **Implementation of the Energy Performance of Buildings Directive: Country Reports 2008**. Brussels: EUROPEAN COMMISSION, p. 169-174, 2008.

SOUZA, H. M.; LEONELLI, P. A.; PIRES, C. A. P.; SOUZA, V. B.; PEREIRA, R. W. L. Reflexões sobre os principais programas em eficiência energética existentes no Brasil. **Revista Brasileira de Energia**, Itajubá, v. 15, n. 1, p. 7-26, 2009.

UE - União Europeia. **Directive 2010/31/EU do Parlamento Europeu e do Conselho, de 19 de maio de 2010**. Dispõe sobre o desempenho energético de edifícios - reformulação. Strasbourg: Jornal Oficial da União Europeia, 19 de maio de 2010.

WAIDE, P.; LEBOT, B.; HINNELLS, M. Appliance energy standards in Europe. **Energy and Buildings**, Oxford, v. 26, n. 1, p. 45-67, 1997.

WIEL, S.; EGAN, C.; DELLA CAVA, M. Energy efficiency standards and labels provide a solid foundation for economic growth, climate change

mitigation, and regional trade. **Energy for Sustainable Development**, Buenos Aires, v. 10, n. 3, p. 54-63, 2006.

3. FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS APLICADAS À ANÁLISE DE AQUECEDORES SOLARES DE ÁGUA

Resumo

Programas de simulação são importantes ferramentas para auxiliar a análise de diferentes alternativas energéticas em edificações, incluindo o uso de fontes renováveis de energia. Assim, o objetivo neste capítulo foi realizar uma análise comparativa de diferentes programas computacionais destinados à modelagem de aquecedores solares de água. Dentre os principais programas de simulação aplicados a sistemas solares térmicos empregados atualmente no Brasil e no mundo podem ser citados: *RETScreen International*, *EnergyPlus*, *TRNSYS*, *SolDesigner*, *SolarPro* e *T*SOL*. Entre tais ferramentas, apenas o *EnergyPlus* e o *RETScreen International* são de uso livre e apresentam boas capacidades de processamento. O primeiro possui um módulo de análise energética detalhado, enquanto o segundo possibilita um estudo de viabilidade econômica e de emissões de gases de efeito estufa de fácil aplicação. Os programas *EnergyPlus* e *RETScreen International* são destinados a um público alvo diverso, incluindo projetistas, educadores, pesquisadores e planejadores de sistemas energéticos. Dentre a atual gama de simuladores computacionais, é importante que o usuário compare determinadas características destas ferramentas, como linguagem de programação e capacidades de processamento dos programas, optando por aquela que seja capaz de gerar os resultados esperados para seus conhecimentos técnicos e suas habilidades de modelagem.

Palavras-chave: simulação, energia solar, aquecimento de água

3.1 INTRODUÇÃO

Os programas computacionais são importantes ferramentas para análise de edificações e de sistemas integrados à construção. Por meio da simulação é possível avaliar o desempenho térmico e energético de edifícios para diferentes alternativas de projeto como desenho arquitetônico, materiais construtivos, sistema de iluminação, sistema de condicionamento de ar e uso de fontes renováveis de energia. Além disso, pode-se estimar o consumo e o custo energético do edifício e impactos ambientais decorrentes de seu uso (MENDES *et al.*, 2005).

Os primeiros programas de modelagem de sistemas energéticos foram criados em países desenvolvidos, na década de 1970, como resultado da evolução de ferramentas computacionais e da necessidade de investigar fontes alternativas de energia. Entre os fatores que aumentaram o interesse em pesquisar fontes renováveis estavam-se a crise do petróleo de 1973 e o aumento da consciência ambiental (LBL, 2011).

Atualmente, o Departamento de Energia dos Estados Unidos lista em seu sítio eletrônico mais de 300 programas de simulação aplicados à análise de medidas de eficiência energética e uso de fontes renováveis de energia em edificações. Uma breve descrição de cada programa é fornecida, além de informações adicionais como público alvo, linguagem de programação e pontos fortes e fracos das ferramentas. Entre os principais programas de simulação destinados a aquecedores solares de água estão: *EnergyPlus*, *RETScreen International*, *SolDesigner*, *SolarPro*, *TRNSYS* e *T*Sol* (EERE, 2012).

Os programas de simulação de edifícios, e de seus sistemas energéticos, ainda não estão muito difundidos entre os profissionais brasileiros de engenharia e de arquitetura. Entre os principais motivos está a complexidade dos programas, com consequente dificuldade e demora de aprendizado. Normalmente, os programas de simulação necessitam de um grande número de dados de entrada, exigindo conhecimentos multidisciplinares dos usuários (WESTPHAL; LAMBERTS, 2005).

Portanto, dentro da atual variedade de programas de modelagem de aquecedores solares de água, objetivou-se com este capítulo realizar uma

análise comparativa das diferentes ferramentas computacionais disponíveis, com enfoque em suas capacidades e em seu público alvo.

3.2 PROGRAMAS COMPUTACIONAIS

3.2.1 *RETScreen International*

O programa *RETScreen International* é direcionado à análise de projetos que exploram fontes energéticas renováveis e medidas de eficiência energética diversas. Foi desenvolvido pelo Departamento de Recursos Naturais do Canadá em parceria com uma rede internacional de especialistas da indústria e de pesquisadores de universidades (HARDER; GIBSON, 2011).

Esse programa possibilita avaliar, de forma comparativa, o uso de fontes de energia renováveis e convencionais; com base na produção de energia, indicadores de viabilidade econômica e emissões de gases de efeito estufa (JUN *et al.*, 2011). Possui módulos específicos para projetos de energia eólica, pequenas hidroelétricas, cogeração, sistemas fotovoltaicos, sistemas fototérmicos e produção de calor usando biomassa (MARKOVIC *et al.*, 2011).

Ele também possui um banco de dados de produtos e bases meteorológicas de 4.700 cidades localizadas em diversos países. Os arquivos de dados inseridos no programa são do tipo Ano Meteorológico Típico (*Typical Meteorological Year - TMY*), criados por meio da compilação de dados de estações meteorológicas terrestres e de observações realizadas por satélites da Agência Espacial Americana - NASA (CTEC, 2005).

O *RETScreen International* pode ser utilizado para avaliar o uso de aquecedores solares de água para aplicações domésticas, comerciais e industriais. A eficiência energética dos sistemas é calculada pelo difundido método da Carta-F (BECKMAN *et al.*, 1977). As análises econômicas são realizadas por métodos de matemática financeira clássica, enquanto a redução de emissões de gases de efeito estufa é calculada por metodologia

criada pelos desenvolvedores do programa (CTEC, 2005). Um fluxograma de entradas e saídas do módulo energético do *RETScreen International* para análise de aquecedores solares de água é apresentado na Figura 3.1.

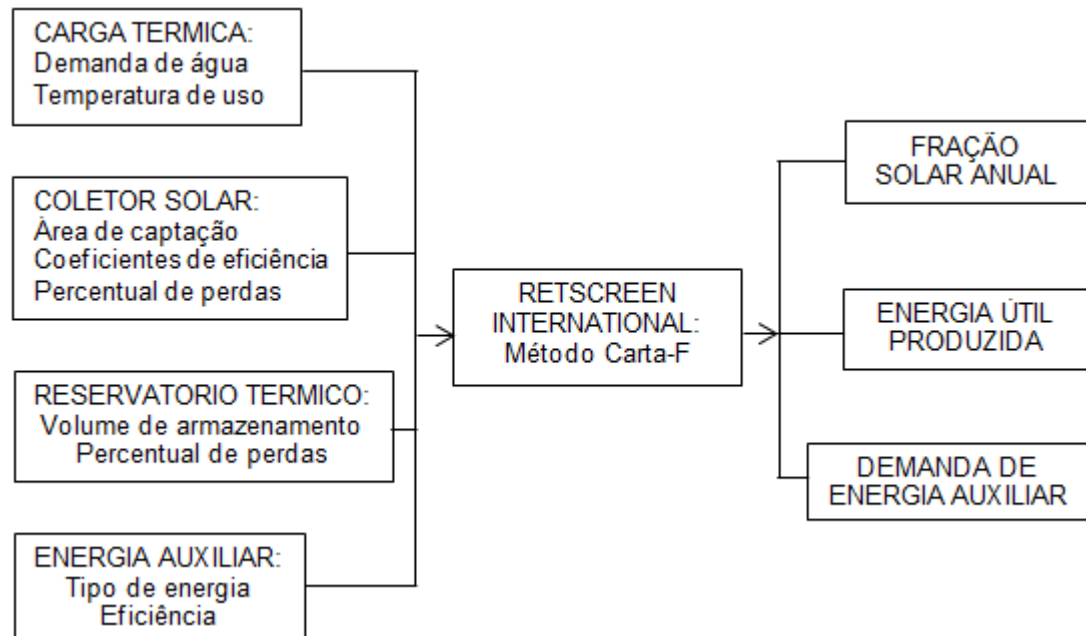


Figura 3.1: Fluxograma de entradas e saídas do módulo energético de aquecedores solares de água do *RETScreen International*.

A modelagem é realizada em planilha eletrônica, de forma intuitiva e de fácil entendimento para o usuário (MENDES *et al.*, 2011). A ferramenta está disponível em mais de 30 idiomas atualmente, incluindo o português. O Governo do Canadá mantém um portal virtual com manuais, cursos de treinamentos e fórum de discussão para os usuários do programa (NRCAN, 2012).

3.2.2 *EnergyPlus*

O programa *EnergyPlus* é, atualmente, uma das ferramentas computacionais mais utilizada para simular o comportamento termo-energético de edifícios. Foi desenvolvido pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos por meio da fusão dos programas *DOE-2* e *BLAST* (FUMO *et al.*, 2010).

Esta ferramenta foi criada com o objetivo inicial de possibilitar o cálculo de trocas térmicas e o consumo de energia em edifícios, por meio da modelagem física da construção e de seus sistemas. Buscando atender novas exigências dos usuários, as versões lançadas a partir do ano 2000 possuem funcionalidades adicionais, como possibilidade de adicionar ventilação natural, índices de conforto térmico e uso de sistemas solares térmicos e fotovoltaicos (CRAWLEY *et al.*, 2001).

Assim como o *RETScreen International*, o *EnergyPlus* calcula a eficiência energética de aquecedores solares de água pelo método da Carta-F e trabalha com arquivos de dados meteorológicos do tipo TMY (LBL, 2011). A grande diferença entre o módulo energético dos dois programas está no fato de o *EnergyPlus* permitir uma análise mais detalhada, como pode ser visto no fluxograma de entradas e saídas apresentado na Figura 3.2.

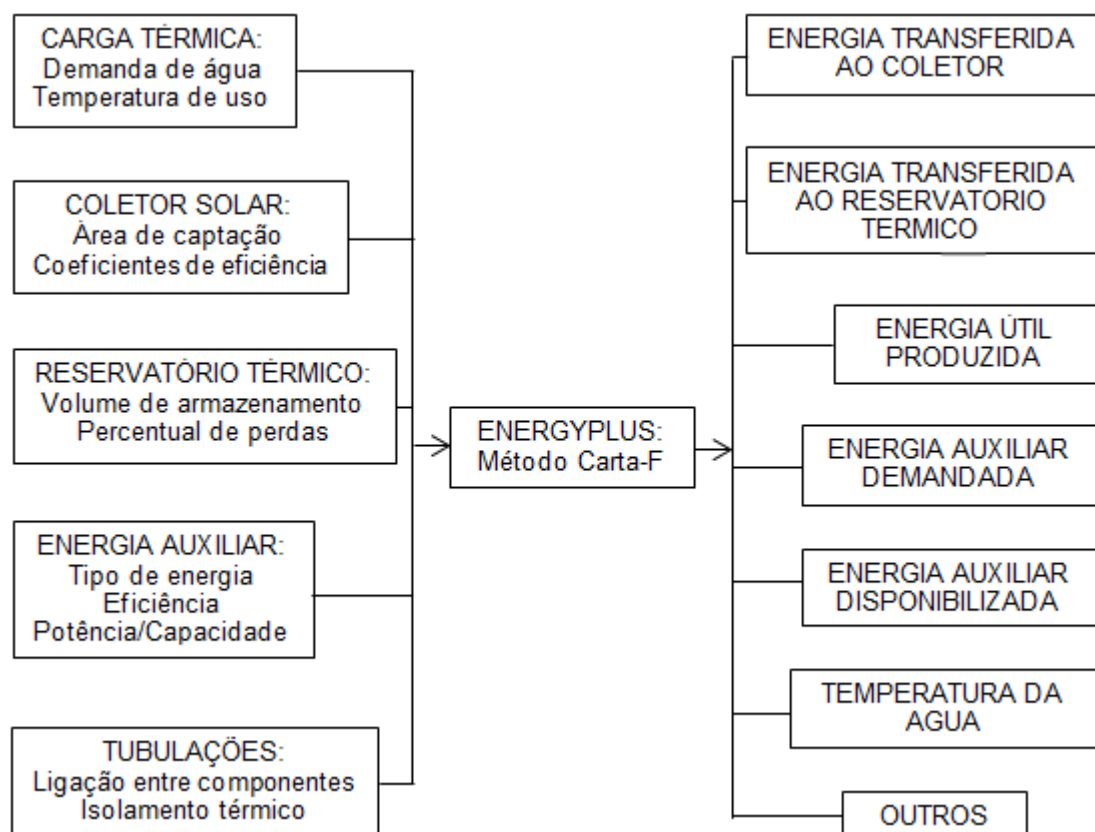


Figura 3.2: Fluxograma de entradas e saídas do módulo energético de aquecedores solares de água do programa *EnergyPlus*.

O *EnergyPlus* possui diversas características que o colocam à frente de outros programas de simulação de edifícios, tais como: simulação

simultânea e integrada de diferentes sistemas; intervalo de tempo de simulação menor que uma hora; cálculo da quantidade de calor em regime transiente e combinação de transferência de calor e massa (CRAWLEY *et al.*, 2001).

O programa é estruturado em módulos, o que possibilita ao usuário o desenvolvimento de cada um sem que este tenha necessariamente conhecimento sobre os outros. Além disso, esse tipo de estrutura facilita o desenvolvimento contínuo e incorporação de novos recursos à ferramenta computacional (SAILOR, 2008).

3.2.3 Outros programas

O *TRNSYS* é atualmente um dos programas de modelagem de sistemas fototérmicos mais difundidos no mundo. Foi desenvolvido nos Estados Unidos e tem como principal vantagem realizar análises em regime transiente. A biblioteca do *TRNSYS* possui vários componentes e rotinas que podem ser utilizadas pelos usuários do programa (AYOMPE *et al.*, 2011).

O programa *SolDesigner* foi desenvolvido na Alemanha e é destinado, principalmente, para dimensionamento de sistemas de aquecimento solar de água, mas também pode ser utilizado para fazer análises energéticas simplificadas. A simulação é realizada a partir de características da demanda diária de água e carga térmica, com geração de resultados como área de coletor, volume do reservatório térmico e estimativas da produção de energia (EERE, 2012).

Outra ferramenta computacional alemã bastante difundida para modelagem de aquecedores solares é o *T*SOL*. Diferente do *SolDesigner*, esta ferramenta permite a realização de análises termo-energéticas detalhadas do sistema. Possui um extenso banco de dados, contendo especificações de coletores solares, reservatórios térmicos, tubulações, bombas hidráulicas e trocadores de calor. Além disso, é possível avaliar a viabilidade econômica do projeto de aquecimento solar de água comparativamente a fontes convencionais (WOOLF, 2003).

O programa *SolarPro* foi desenvolvido nos Estados Unidos e, assim como o *EnergyPlus*, simula o funcionamento de aquecedores solares de água em intervalos horários e utiliza arquivos de dados meteorológicos do tipo TMY. As análises são feitas com base em especificações técnicas dos componentes do sistema e padrões de uso de água quente. O *SolarPro* possui um ambiente de simulação intuitivo, o que facilita seu uso por pessoas com pouca experiência em modelagem (EERE, 2012).

3.3 ANÁLISE COMPARATIVA DOS PROGRAMAS COMPUTACIONAIS

As ferramentas computacionais *EnergyPlus*, *RETScreen International*, *SolDesigner*, *SolarPro*, *TRNSYS* e *T*Sol* possuem capacidades de processamento diversas; algumas são mais simples, com função principal de dimensionamento, enquanto outras fazem uma análise mais detalhada do sistema. Algumas permitem avaliar ainda a viabilidade econômica e o potencial de redução de emissões de gases de efeito estufa. No Quadro 3.1 é apresentada uma análise comparativa dos programas citados anteriormente.

Quadro 3.1: Análise de diferentes ferramentas computacionais para simulação de aquecedores solares de água

Programa	Ponto Forte	Ponto Fraco	Público alvo	Acesso
<i>EnergyPlus</i>	Simulação detalhada e precisa	Entrada de dados em forma de texto	Projetistas Pesquisadores Consultorias Agências do governo	Livre
<i>RETScreen International</i>	Fácil estudo de viabilidade econômica	Análise energética simplificada	Projetistas Planejadores Gestores Educadores Pesquisadores	Livre
<i>SolDesigner</i>	Geração de projeto hidráulico detalhado	Não validado por testes	Projetistas Construtores Proprietários de residências Especialistas em hidráulica	Comercial
<i>SolarPro</i>	Modelagem detalhada do aquecedor solar	Não validado por testes	Projetistas Construtores Proprietários de residências	Comercial
<i>TRNSYS</i>	Modelagem em regime transiente	Não possui dados de entrada padrões	Projetistas Pesquisadores Empresas de consultorias	Comercial
<i>T*SOL</i>	Ambiente de simulação amigável	Não validado por testes	Projetistas Planejadores Pesquisadores Educadores	Comercial

Fonte: (EERE, 2012 - modificado).

Como apresentado no Quadro 3.1, algumas ferramentas, como o *SolDesigner* e *T*SOL*, possuem módulos simplificados, o que facilita seu uso por educadores e proprietários de imóveis que queiram fazer um pré-dimensionamento do sistema de aquecimento solar de água. Outros programas possibilitam uma simulação detalhada do sistema, o que os tornam aplicáveis à pesquisa científica, como o *EnergyPlus* e o *TRNSYS*. Há ainda aqueles voltados para diferentes públicos, devido às diversas possibilidades de análises, como o *RETScreen International*.

Além disso, a disponibilidade do programa (livre ou comercial) é outra informação importante para o usuário. A maioria das ferramentas computacionais apresentadas no Quadro 3.1 é comercial, todavia, os programas *EnergyPlus* e *RETScreen International*, de acesso livre, apresentam boas capacidades de processamento e atendem a diversos perfis de usuários.

A versatilidade de análises do *RETScreen International* tem feito com que pessoas interessadas em fontes renováveis de energia optem por este

programa. No Quadro 3.2 é apresentado um levantamento do número de projetos que utilizaram o *RETScreen International* no período de 1998 a 2003.

Quadro 3.2: Projetos facilitados pelo uso do *RETScreen International* de 1998 a 2003

País	Descrição dos projetos	Geração ou Área ¹	Custo dos projetos (Milhões de US\$)
Austrália	Energia Fotovoltaica Energia Eólica	940 kW	18,0
Brasil	Pequena Central Hidrelétrica	4.000 kW	6,0
Canadá	Energia fotovoltaica Energia eólica Energia por biomassa Energia geotérmica Pequena Central Hidrelétrica Energia solar térmica	127.000 kW 6.704 m ²	226,3
Costa Rica	Energia fotovoltaica	40 kW	0,5
Dinamarca	Energia fotovoltaica	250 kW	n/a
Espanha	Energia solar térmica	120 m ²	0,1
Estados Unidos	Energia solar térmica	560 m ²	0,3
Estônia	Pequena Central Hidrelétrica	500 kW	0,3
França	Pequena Central Hidrelétrica Energia Eólica	34.000 kW	42,0
Guatemala	Pequena Central Hidrelétrica	3.500 kW	7,5
Irlanda	Energia eólica	100.000 kW	210,0
Groenlândia	Energia fotovoltaica Energia eólica	32 kW	0,2
Índia	Energia fotovoltaica Pequena Central Hidrelétrica	1.089 kW	4,0
Itália	Energia por biomassa	48.000 kW	108,0
Mauritânia	Energia fotovoltaica Pequena Central Hidrelétrica	9 kW	0,1
Nova Zelândia	Energia fotovoltaica	n/a	0,1
Nicarágua	Pequena Central Hidrelétrica	12.000 kW	18,0
Rússia	Energia geotérmica	320 kW	0,6
Romênia	Energia solar térmica Energia eólica	8400 kW 80 m ²	21,0
República Tcheca	Pequena Central Hidrelétrica	2.000 kW	2,0
Senegal	Energia fotovoltaica Energia eólica	14 kW	0,5
Total		342,1 MW 7.464 m ²	665,5

¹Os projetos de energia solar térmica (aquecimento de água e ar) foram contabilizados por área de captação solar, enquanto os demais por potência de geração de energia elétrica. Fonte: (CTEC, 2004).

Conforme apresentado no Quadro 3.2, o *RETScreen International* tem sido empregado em análises de projetos de utilização de fontes renováveis de energia em todo mundo, com aplicações em estudos de diferentes

tecnologias limpas para geração de energia elétrica ou calor. Como o programa é de origem canadense, observa-se uma concentração de uso neste país. Os projetos desenvolvidos no Canadá responderam por 38% da geração de energia elétrica e 90% da área de coletores solares do total dos empreendimentos apresentados no Quadro 3.2.

Apesar de muito difundido entre planejadores e gestores de sistemas energéticos, há na literatura científica vários trabalhos sobre fontes renováveis de energia que empregam o *RETScreen International*, dentre eles: geração solar térmica (GASTLI; CHARABI, 2011), geração fotovoltaica (HARDER; GIBSON, 2011), usinas eólicas (HIMRI *et al.*, 2009) e pequenas centrais hidroelétricas (ALONSO-TRISTÁN *et al.*, 2011).

Diferentemente do *RETScreen International*, o *EnergyPlus* tem sido utilizado comumente por pesquisadores, devido ao seu método de simulação complexo e detalhado. Dentre os trabalhos científicos sobre modelagem de edifícios e de seus sistemas com emprego do programa *EnergyPlus*, podem ser citados: estudos de consumo de energia (FUMO *et al.*, 2010), desempenho energético (KIM; PARK, 2011); sistemas de climatização (ZHOU *et al.*, 2008); sistemas fototérmicos (BOJIĆ *et al.*, 2011) e sistemas fotovoltaicos (WANG *et al.*, 2009).

Portanto, dentro da gama de simuladores computacionais de aquecedores solares de água atualmente disponível, é necessário que o usuário verifique e compare determinadas especificações das ferramentas, como linguagem de programação, conjunto de capacidades e experiência requerida. Deste modo, será capaz de optar por um programa que atenda suas expectativas de acordo com seus conhecimentos técnicos e suas habilidades de modelagem.

3.4 CONCLUSÃO

Ferramentas computacionais destinadas à modelagem de sistemas energéticos têm sido empregadas em todo mundo para auxiliar profissionais e pesquisadores da área. Os programas podem ser aplicados em tarefas simples como dimensionamento ou análises detalhadas do sistema. As

ferramentas *RETScreen International*, *EnergyPlus*, *TRNSYS*, *SolDesigner*, *T*SOL* e *SolarPro* estão entre as mais difundidas atualmente para estudos de aquecedores solares de água.

Os programas *EnergyPlus* e *RETScreen International* são de uso livre e permitem a obtenção de resultados interessantes, sendo destinados a um público alvo diverso, incluindo projetistas, pesquisadores e planejadores energéticos. O primeiro programa possui um módulo de análise energética detalhado, enquanto o segundo apresenta módulos de viabilidade econômica do sistema e análise de emissões de gases de efeito estufa.

Portanto, dentro da atual diversidade de programas computacionais, cabe ao usuário comparar determinadas especificações, como linguagem de programação e capacidades de processamento, para que possa optar por aquele que seja capaz de gerar os resultados esperados para os seus conhecimentos e as suas habilidades de modelagem.

3.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AYOMPE, L. M; DUFFY, A.; MCCORMACK, S. J.; CONLON, M. Validated TRNSYS model for forced circulation solar water heating systems with flat plate and heat pipe evacuated tube collectors. **Applied Thermal Engineering**, Whitley Bay, v. 31, n. 8, p. 1536-1542, 2011.

ALONSO-TRISTÁN, C.; GONZÁLEZ-PE, D., Díez-Medavilla, D.; RODRÍGUEZ-AMIGO, M.; GARCÍA-CALDERÓN, T. Small hydropower plants in Spain: A case study. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Golden, v. 15, n. 6, p. 2729-2735, 2011.

BECKMAN, W. A.; KLEIN, S. A.; DUFFIE, J. A. **Solar Heating Design by the F-chart method**. Nova York: Wiley-Interscience, 1977. 218 p.

LBL - Lawrence Berkeley National Laboratory. **Manual programa do EnergyPlus**. Orlando: Berkeley Lab, 2011.1798 p.

BOJIĆ, M.; NIKOLIĆ, N.; NIKOLIĆ, D.; SKERLIĆ, J.; MILETIĆ, I. Toward a positive-net-energy residential building in Serbian conditions. **Applied Energy**, Stockholm, v. 88, n. 7, p. 2407-2419, 2011.

CRAWLEY, D. B.; LAWRIE, L. K.; WILKELMANN, F. C.; BUHL, W.F.; HUANG, Y. J.; PEDERSEN, C. O.; STRAND, R. K.; LIESEN, R. J.; FISHER, D. E.; WITTE, M. J.; GLAZER, J. *EnergyPlus: creating a new-generation*

building energy simulation. **Energy and Buildings**, Oxford, v. 22, n. 4, p. 319-331, 2001.

CTEC - CANMET Energy Technology Centre. **Manual programa RETScreen International**. Varennes: CTEC, 2005. 108 p.

CTEC - CANMET Energy Technology Centre. **RETScreen International: Results and Impacts 1996-2012**. Varennes: CTEC, 2004. 44 p.

EERE - Office of Energy Efficiency and Renewable Energy. **Building Energy Software Tools Directory**. Disponível em: <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/tools_directory/>. Acesso em: 20 fev. 2012.

FUMO, N.; MAGO, P.; LUCK, R. Methodology to estimate building energy consumption using EnergyPlus Benchmark Models. **Energy and Buildings**, Oxford, v. 42, n. 12, p. 2331-2337, 2010.

GASTLI, A.; CHARABI, Y. Solar water heating initiative in Oman energy saving and carbon credits. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Golden, v. 15, n. 4, p. 1851-1856, 2011.

HARDER, E.; GIBSON, J. M. The costs and benefits of large-scale solar photovoltaic power production in Abu Dhabi, United Arab Emirates. **Renewable Energy**, Brighton, v. 36, n. 2, p. 789-796, 2011.

HIMRI, Y.; STAMBOULI, V.; DRAOUI, B. Prospects of wind farm development in Algeria. **Desalination**, Swansea, v. 239, n. 1, p. 130-138, 2009.

JUN, D.; XU, Z.; XUE, J.; XIAOLIN, X.; YUXI, T. Economic analysis and policy suggestions on gas power generation projects considering carbon emission reduction. **Procedia Environmental Sciences**, New York, v. 11, Part B, p. 1029-1038, 2011.

KIM, D.; PARK, C. Difficulties and limitations in performance simulation of a double skin façade with EnergyPlus. **Energy and Buildings**, Oxford, v. 43, n. 12, p. 3635-3645, 2011.

MARKOVIC, D.; CVETKOVIC, D.; MASIC, B. Survey of software tools for energy efficiency in a community. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Golden, v. 15, n. 9, p. 4897-4903, 2011.

MENDES, G; LOAKIMIDIS, C.; FERRÃO, P. On the planning and analysis of Integrated Community Energy Systems: A review and survey of available tools. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Golden, v. 15, n. 9, p. 4836-4854, 2011.

MENDES, N.; WESTPHAL F. S.; LAMBERTS R.; CUNHA NETO, J. A. B. Uso de instrumentos computacionais para análise do desempenho térmico e

energético de edificações no Brasil. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 5, n. 4, p. 47-68, 2005.

NRCAN - Natural Resources Canada. **RETScreen International**. Disponível em: <<http://www.etscreen.net/pt/home.php>>. Acesso em: 23 jan. 2012.

SAILOR, D. J. A green roof model for building energy simulation programs. **Energy and Building**, Oxford, v. 40, n. 8, p. 1466-1478, 2008.

WANG, L.; GWILLIAM, J.; JONES, P. Case study of zero energy house design in UK. **Energy and Buildings**, Oxford, v. 41, n. 11, p. 1215-1222, 2009.

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

WOOLF, J. Renew: a renewable energy design tool for architects. **Renewable Energy**, Brighton, v. 28, n. 10, p. 1555-1561, 2003.

ZHOU, Y. P.; WU, J. Y.; WANG, R. Z.; SHIOCHI, S.; LI, Y. M. Simulation and experimental validation of the variable-refrigerant-volume (VRV) air-conditioning system in EnergyPlus. **Energy and Buildings**, Oxford, v. 40, n. 6, p. 1041-1047, 2008.

4. ANÁLISE TÉCNICA DE SISTEMAS DE AQUECIMENTO SOLAR DE ÁGUA EM RESIDÊNCIAS

Resumo

O chuveiro elétrico é o eletrodoméstico com maior participação de consumo de energia em residências brasileiras e está presente em mais de 70% dos domicílios. O uso expressivo de chuveiro elétrico dificulta a gestão de cargas do sistema elétrico nacional, devido à grande potência deste equipamento e ao fato de seu acionamento ocorrer principalmente no horário de pico. Objetivou-se com este capítulo analisar o desempenho termo-energético de um aquecedor solar com apoio elétrico destinado a suprir a demanda de água quente de uma residência típica brasileira, comparativamente ao uso de chuveiro elétrico. Foram dimensionados sistemas solares de modo a atender diferentes condições de conforto de banho e níveis de eficiência energética pela certificação brasileira de edifícios residenciais. Além disso, foi dimensionado um sistema solar para cada condição de conforto de banho pela NBR 15569, norma técnica brasileira de referência. O aquecedor solar foi analisado com o uso do programa *EnergyPlus* nas condições climáticas de Viçosa, Minas Gerais. A substituição do chuveiro elétrico por sistema solar provocou uma redução de, aproximadamente, 71% no consumo de energia elétrica destinado ao aquecimento de água da residência e uma diminuição em torno de 36% no consumo de energia elétrica total da residência. Foi verificado, ainda, que a atual metodologia de classificação do sistema de aquecimento solar de água pela certificação brasileira de eficiência energética de edifícios residenciais se limita a exigir uma eficiência energética já prevista na NBR 15569.

Palavras-chave: energia solar, aquecimento de água, eficiência energética

4.1 INTRODUÇÃO

A maioria das residências brasileiras possui sistema de aquecimento elétrico de água. Em 2005, aproximadamente 73,5% das habitações no país possuíam chuveiro elétrico, equivalente a uma média de 0,89 chuveiros elétricos instalados por residência. Este é o equipamento com maior participação no consumo de energia elétrica em domicílios brasileiros, seguido da geladeira e do ar-condicionado (ELETROBRAS, 2007).

O uso expressivo de chuveiros elétricos no país resulta em um grande inconveniente para a gestão de cargas do sistema elétrico nacional. Como são acionados, normalmente, no começo da noite, respondem por parte significativa do pico da curva de carga do setor residencial, como pode ser observado na Figura 4.1. Nos últimos anos, o problema intensificou-se, uma vez que a potência nominal típica destes equipamentos, a qual estava em torno de 3 kW, aumentou para valores de 4,4 kW a 6,5 kW. Podem ser encontrados no mercado brasileiro modelos com potências de até 8 kW (NASPOLINI *et al.*, 2011).

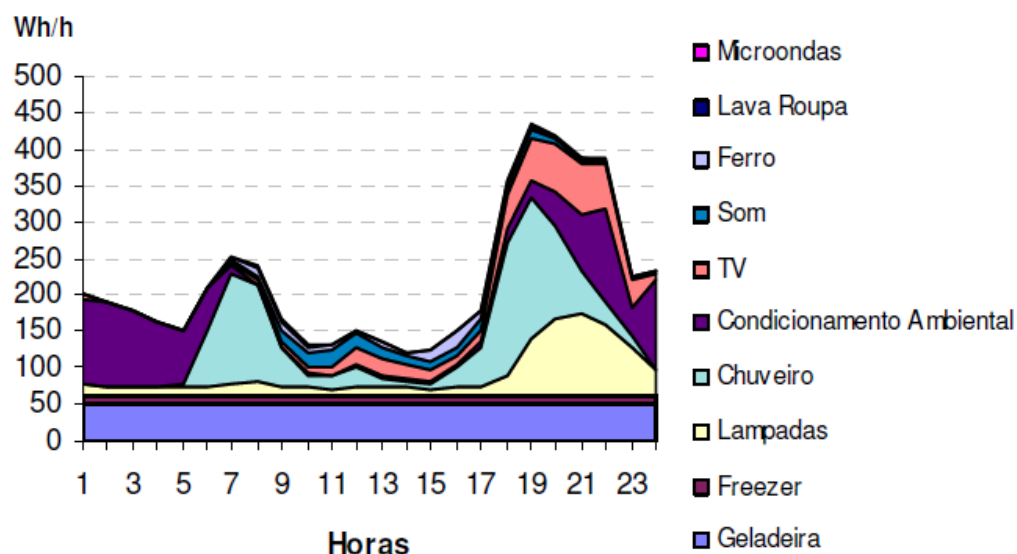


Figura 4.1: Curva de carga diária típica do setor residencial brasileiro.
Fonte: (ELETROBRAS, 2007).

Deve ser ressaltado que o maior problema do chuveiro elétrico não se deve ao elevado consumo de energia, mas à alta potência requerida para seu funcionamento. A demanda agregada de milhões de chuveiros elétricos

ligados no horário próximo às 19h coincide com o acionamento do sistema de iluminação residencial e pública, de eletrodomésticos e parcela dos setores comercial e industrial que ainda estão em funcionamento, requerendo uma potência total que se aproxima do limite da capacidade instalada do sistema elétrico nacional (HERMSDORFF, 2001).

Uma alternativa para diminuir o consumo e a demanda de energia elétrica do setor residencial brasileiro é a substituição do chuveiro elétrico por outras fontes energéticas. Pesquisas realizadas no Brasil e em outros países comprovam a viabilidade técnica dos aquecedores solares de água, considerando diferentes níveis de disponibilidade de radiação solar e estágios de desenvolvimento da tecnologia fototérmica (TANABE, 1998; KALOGIROU, 2009; CASSARD *et al.*, 2011, COELHO, 2011).

Atualmente, o setor brasileiro de aquecimento solar de água é formado por, aproximadamente, 200 empresas que atuam na fabricação, projeto, venda, instalação e consultoria (DASOL, 2012). A eficiência energética de coletores solares e reservatórios térmicos comercializados no país é avaliada pelo Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE). Em janeiro de 2012, foram avaliadas mais de 50 marcas e 220 modelos de coletores e reservatórios (INMETRO, 2012).

O objetivo neste capítulo foi analisar o desempenho termo-energético de um sistema de aquecimento solar de água residencial, comparativamente ao uso de chuveiro elétrico. Foram dimensionados e simulados aquecedores solares que atendiam diferentes condições de conforto de banho e níveis de eficiência energética pela certificação brasileira de eficiência energética de edifícios residenciais.

4.2 MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho foi realizado no Laboratório de Energia do Departamento de Engenharia Agrícola e no Laboratório de Tecnologias em Conforto Ambiental e Eficiência Energética do Departamento de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais.

4.2.1 Modelo residencial e demanda de água quente

Foi considerada uma tipologia residencial e padrões de uso de iluminação e de eletrodomésticos definidos por Tavares (2006) e Sorgato (2009). O modelo representa uma residência unifamiliar destinada a quatro moradores, com área construída de 63 m², dois dormitórios, uma sala, uma cozinha e um banheiro. Segundo Tavares (2006), este modelo possui características que representa 58% das edificações residenciais brasileiras. O modelo habitacional descrito é apresentado na Figura 4.2.

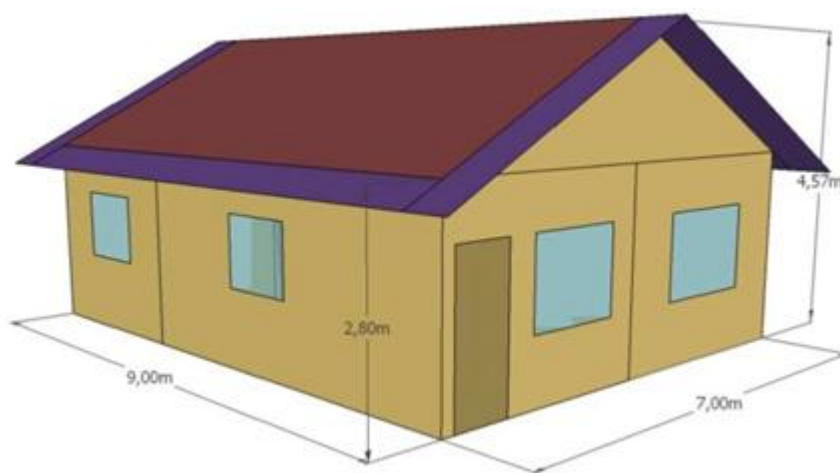


Figura 4.2: Representação geométrica do modelo residencial analisado
Fonte: (SORGATO, 2009).

Foi considerado que a residência possui demanda de água quente apenas para banho, atendida por chuveiro elétrico ou aquecedor solar com apoio elétrico (por meio de uma resistência elétrica instalada no interior do reservatório térmico). O aquecedor solar empregado na análise é composto por coletores solares planos e reservatório térmico horizontal, com circulação natural de água (efeito termossifão). Na Figura 4.3, é apresentado um esquema do aquecedor solar de água considerado.

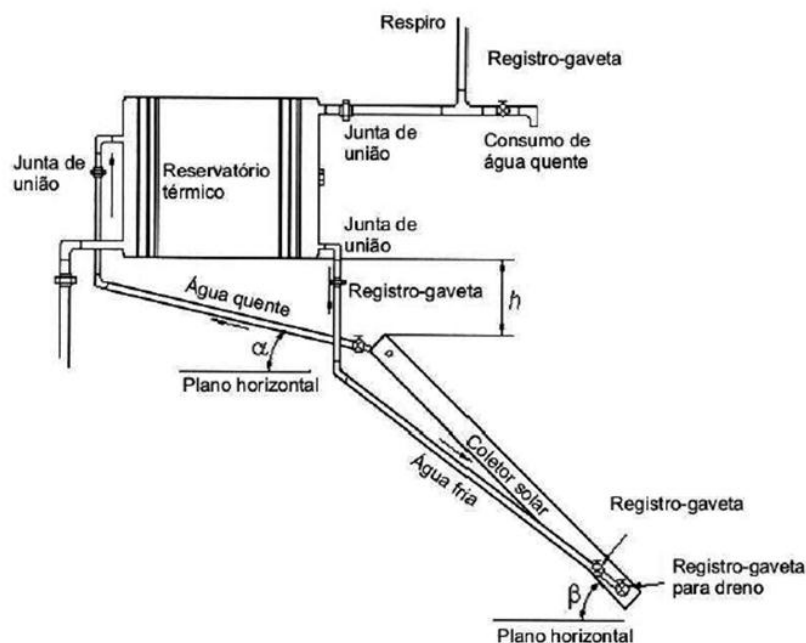


Figura 4.3: Esquema de um aquecedor solar de água por termossifão.
Fonte: (ABNT, 2008).

4.2.2 Dimensionamento e simulação do aquecedor solar

O aquecedor solar foi dimensionado e simulado para as condições meteorológicas do município de Viçosa, Minas Gerais. Foi empregado um arquivo de dados do tipo TMY, desenvolvido por Guimarães e Carlo (2011), com base em séries de cinco anos, do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

A norma brasileira de referência sobre projetos de aquecimento solar de água, a NBR 15569 (ABNT, 2008), recomenda o uso de vazões de chuveiros de 3 a 15 L/min no dimensionamento de aquecedores solares. Com o objetivo de avaliar diferentes vazões com um fator de qualidade para o usuário, foram considerados três níveis de conforto de banho: conforto reduzido (vazão do chuveiro de 3 L/min), conforto regular (vazão do chuveiro de 5 L/min) e conforto bom (vazão do chuveiro de 8 L/min).

Para cada condição de conforto de banho foram dimensionados sistemas solares com diferentes níveis de eficiência energética pela certificação brasileira de edificações residenciais. Além disso, para cada condição de conforto, foi dimensionado um aquecedor solar pela metodologia apresentada na NBR 15569 (ABNT, 2008). Sendo possível,

assim, investigar o nível de eficiência energética obtido por sistemas solares dimensionados conforme recomendações da norma técnica de referência.

Na certificação de eficiência energética de edifícios residenciais, o sistema de aquecimento solar de água é avaliado pela fração solar e por pré-requisitos específicos para cada nível de eficiência energética. A fração solar é dada pela razão entre a geração de energia solar térmica e a demanda total de energia para aquecimento de água. O procedimento completo de classificação do sistema de aquecimento de água é apresentado no Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Residenciais (RTQ-R) (BRASIL, 2010). Sistemas com fração solar igual ou superior a 70% são classificados como nível A. Para sistemas com fração solar inferior a 70%, o nível de eficiência energética é obtido por meio da ponderação dos equivalentes números do sistema solar e de energia auxiliar pela demanda de água quente atendida por cada sistema. No caso de aquecedores com fração solar inferior a 70% com apoio (*backup*) elétrico, calcula-se o equivalente numérico ponderado do sistema solar-elétrico com base nos valores apresentados nos Quadros 4.1 e 4.2 e, em seguida, obtém-se o nível de eficiência energética do sistema de aquecimento de água pelo Quadro 4.3.

Quadro 4.1: Equivalente numérico para sistemas de aquecimento solar de água

Fração solar anual, FS (%)	Equivalente numérico
$FS \geq 70$	5
$60 \leq FS < 70$	4
$50 \leq FS < 60$	3
$FS < 50$	2

Fonte: (BRASIL, 2010).

Quadro 4.2: Equivalente numérico para sistemas de aquecimento elétrico de água

Potência, P (W)	Equivalente numérico
$P \leq 4600$	2
$P > 4600$	1

Fonte: (BRASIL, 2010).

Quadro 4.3: Correspondência entre equivalente numérico e classificação de nível de eficiência energética

Classificação	Equivalente numérico
A	5
B	4
C	3
D	2
E	1

Fonte: (BRASIL, 2010).

Depois da obtenção do nível de eficiência energética pela metodologia apresentada anteriormente, é necessário verificar se o sistema de aquecimento de água atende aos pré-requisitos específicos para o nível de eficiência encontrado. Caso os pré-requisitos não sejam atendidos, o nível de eficiência energética final do sistema de aquecimento de água será rebaixado. Entre os pré-requisitos específicos para obtenção do nível A ou B, estão: coletores solares com classificação A ou B pelo Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE) e reservatórios térmicos com Selo PROCEL (Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica).

A fração solar anual do sistema pode ser calculada pelo método do dimensionamento ou pelo método de simulação. O primeiro é apresentado detalhadamente no Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (RTQ-R) (BRASIL, 2010). Já para o emprego do segundo método, é obrigatório o uso de programas computacionais que calculem a fração solar de aquecedores solares de água pelo método da Carta-F (BECKMAN *et al.*, 1977). Nesta pesquisa trabalhou-se com o método do dimensionamento.

O RTQ-R (BRASIL, 2010) e a NBR 15569 (ABNT, 2008), calculam a fração solar do sistema pelo método da Carta-F. Este método foi desenvolvido com base em aquecedores solares com circulação forçada e apresenta limitações de precisão quando aplicado a sistemas com circulação natural (termossifão). Isto ocorre porque em sistemas forçados a taxa de fluxo de água no coletor solar é fixa e o fluido armazenado no reservatório está em uma condição de mistura completa. A fim de se corrigir tais limitações, Malkin (1985) desenvolveu o método da Carta-F modificado para sistemas com circulação natural. Segundo Malkin (1985), o uso do método

da Carta-F original subestima a fração solar de sistemas termossifão por desconsiderar a estratificação do fluido no reservatório térmico. Como se pretende comparar os resultados deste trabalho com as referências nacionais citadas anteriormente (NBR 15569 e o RTQ-R) optou-se pelo método original, mesmo não sendo o mais adequado.

Os parâmetros adotados no dimensionamento dos aquecedores solares da residência são apresentados a seguir:

- i. Aquecedor solar destinado a atender apenas demanda de água quente para banho;
- ii. Residência com quatro moradores;
- iii. Um banho diário por pessoa;
- iv. Tempo de banho de 10 minutos;
- v. Temperatura de uso da água para banho de 40 °C;
- vi. Horário de banho: 19h às 20h;
- vii. Coletor solar plano com dutos de cobre e cobertura de vidro, área útil por placa de 1,00 m², fator de eficiência ótica 0,779, coeficiente global de perdas 6,795 W/(m².K), Etiqueta Nacional de Conservação de Energia A, Selo PROCEL;
- viii. Posicionamento dos coletores solares: voltados para o norte geográfico com inclinação igual à latitude local acrescida de 10°;
- ix. Reservatório térmico horizontal com revestimento de aço inoxidável e isolamento de poliuretano, volume de 200 ou 300 L, dependendo da necessidade de armazenamento, com resistência elétrica de 2.000 W, Selo PROCEL; e
- x. Resistência elétrica programada para ligar quando a temperatura da água no reservatório térmico for igual ou inferior a 45°C e desligar quando a temperatura da água for igual ou superior a 50°C, com programador horário de acionamento no intervalo de 18 às 20h.

No dimensionamento de cada sistema foi utilizada a menor área de coletores solares que atendesse a cada condição de conforto de banho e nível de eficiência energética, considerando um parcelamento máximo de 10 vezes na área útil da placa de coletor solar considerada (1,0 m²), ou seja, áreas múltiplas a 0,10 m². Já em relação ao reservatório térmico, foi

escolhido o modelo com menor volume que atendesse à necessidade de armazenamento de água quente.

O caso de referência, representado pelo aquecimento de água por uso de chuveiro elétrico, foi atendido por modelos comerciais com duas opções de potências (“inverno/verão”): 4.500/3.200 W, 5.500/4.800 W e 7.500/5.500 W para as condições de conforto reduzido, regular e bom, respectivamente. Com base nas temperaturas médias mensais de Viçosa (MG), foi definido que a menor potência seria utilizada nos meses de janeiro, fevereiro, março, abril, outubro, novembro e dezembro, enquanto a maior potência seria usada em maio, junho, julho, agosto e setembro. Desta forma, foi possível comparar o consumo de energia do chuveiro elétrico e do sistema solar com apoio elétrico durante um ciclo anual.

Os sistemas solares dimensionados para atender o nível de eficiência energética A para cada condição de conforto de banho foram simulados termo-energeticamente pelo programa *EnergyPlus*, o qual avalia a eficiência energética por meio do método da Carta-F, assim como a NBR 15569 (ABNT, 2008) e o RTQ-R (BRASIL, 2010). Os parâmetros do aquecedor solar e da residência avaliados são apresentados a seguir.

- i. Radiação incidente sobre a área de coletores solares (kWh/ano);
- ii. Energia transferida ao coletor solar (kWh/ano);
- iii. Temperatura média da água no coletor solar (°C);
- iv. Energia armazenada no reservatório térmico (kWh/ano);
- v. Temperatura média da água no reservatório térmico (°C);
- vi. Consumo de energia elétrica auxiliar ao sistema solar (kWh/ano); e
- vii. Consumo total de energia elétrica na residência - sistema de iluminação, eletrodomésticos e aquecimento de água (kWh/ano).

4.2.3 Método da Carta-F

O método da Carta-F foi desenvolvido por Beckman *et al.* (1977) e objetiva calcular a eficiência energética de aquecedores solares de água, representada pela fração solar anual. A seguir será explicado o método conforme apresentado no RTQ-R (BRASIL, 2010).

Primeiramente, deve-se calcular o volume do sistema de armazenamento, de acordo com a Equação 4.1.

$$V_{\text{armaz}} = \frac{V_{\text{consumo}} (T_{\text{consumo}} - T_{\text{ambiente}})}{(T_{\text{armaz}} - T_{\text{ambiente}})} \quad (4.1)$$

em que:

- V_{armaz} = Volume de armazenamento do sistema de aquecimento solar, L;
- V_{consumo} = Volume de consumo diário de água a ser aquecida, L/dia;
- T_{consumo} = Temperatura de consumo de utilização, °C;
- T_{armaz} = Temperatura de armazenamento da água, °C; e
- T_{ambiente} = Temperatura ambiente média anual do ar externo do local de instalação do sistema, °C.

Obter a demanda de energia útil considerando os valores de radiação solar para cada mês do ano, por meio da Equação 4.2.

$$DE_{\text{mês}} = (V_{\text{consumo}} N T_{\text{consumo}}) - 0,00161 T_{\text{AF}} \quad (4.2)$$

em que:

- $DE_{\text{mês}}$ = Demanda de energia, kWh/mês;
- V_{consumo} = Volume de consumo diário de água a ser aquecida, L/dia;
- N = Número de dias do mês considerado; dias/mês;
- T_{consumo} = Temperatura de consumo de utilização, °C; e
- T_{AF} = Temperatura da água fria da rede, °C.

Calcular a radiação solar mensal incidente sobre a superfície inclinada dos coletores, utilizando a Equação 4.3.

$$E_{\text{Imês}} = H_{\text{dia}} N \quad (4.3)$$

em que:

$El_{\text{mês}}$ = Energia solar mensal incidente sobre as superfícies dos coletores, kWh/(m².mês);

H_{dia} = Radiação solar incidente no plano inclinado, kWh/(m².dia); e

N = Número de dias do mês considerado; dias/mês;

Determinar o parâmetro D_1 , por meio da Equação 4.4.

$$D_1 = \frac{EA_{\text{mês}}}{DE_{\text{mês}}} \quad (4.4)$$

em que:

$DE_{\text{mês}}$ = Demanda de energia, kWh/mês; e

$EA_{\text{mês}}$ = Energia solar mensal absorvida pelos coletores, kWh/mês, calculada por meio da Equação 4.5.

$$EA_{\text{mês}} = S_c (F'_R \tau \sigma) El_{\text{mês}} \quad (4.5)$$

em que:

S_c = Superfície de absorção do coletor, m²;

$El_{\text{mês}}$ = Energia solar mensal incidente sobre as superfícies dos coletores, kWh/(m².mês); e

$F'_R \tau \sigma$ = Fator de adimensional, calculado por meio da Equação 4.6.

$$F'_R \tau \sigma = [F'_R (\tau \sigma_n)] \left(\frac{\tau \sigma}{\tau \sigma_n} \right) \left(\frac{F'_R}{F_R} \right) \quad (4.6)$$

em que:

$F'_R (\tau \sigma)_n$ = Fator de eficiência óptica do coletor, obtido nas tabelas do PBE para coletores solares, adimensional;

$\tau \sigma / \tau \sigma_n$ = Modificador do ângulo de incidência, adimensional; e

F'_R / F_R = Fator de correção do conjunto coletor/trocador, adimensional.

Determinar o parâmetro D_2 , por meio da Equação 4.7.

$$D_2 = \frac{EP_{\text{mês}}}{DE_{\text{mês}}} \quad (4.7)$$

em que:

$DE_{\text{mês}}$ = Demanda de energia, kWh/mês; e

$EP_{\text{mês}}$ = Energia solar mensal não aproveitada pelos coletores, kWh/mês, calculada por meio da Equação 4.8.

$$EP_{\text{mês}} = 100 S_c (F'_{RU_L} - T_{\text{ambiente}} \Delta T) \quad (4.8)$$

em que:

S_c = Superfície de absorção do coletor, m²;

T_{ambiente} = Temperatura média mensal do local de instalação do coletor, °C;

ΔT = Período de tempo considerado (horas); e

F'_{RU_L} = Fator de dimensionamento, kW/(m².K), calculado pela Equação 4.9.

$$F'_{RU_L} = (F_{RU_L}) \left(\frac{F'_R}{F_R} \right) 10^{-3} \quad (4.9)$$

em que:

F_{RU_L} = Coeficiente global de perdas do coletor, obtido nas tabelas do PBE para coletores solares, W/(m².K); e

F'_R/F_R = Fator de correção do conjunto coletor/trocador, adimensional;

Com base nos parâmetros D_1 e D_2 , calcula-se a fração solar para cada mês do ano, utilizando a Equação 4.10.

$$f = 1,029 D_1 - 0,065 D_2 - 0,245 D_1^2 + 0,0018 D_2^2 + 0,0215 D_1^3 \quad (4.10)$$

em que:

- f = Fração solar mensal, adimensional;
- D_1 = Fator de dimensionamento 1, adimensional; e
- D_2 = Fator de dimensionamento 2, adimensional.

Encontrar a energia útil coletada pelo aquecedor solar para cada mês, por meio da Equação 4.11.

$$EU_{\text{mês}} = f DE_{\text{mês}} \quad (4.11)$$

em que:

- $EU_{\text{mês}}$ = Energia útil mensal coletada (kWh/mês);
- f = Fração solar mensal, adimensional;
- $DE_{\text{mês}}$ = Demanda de energia (kWh/mês).

Por fim calcular, a fração solar anual do sistema de aquecimento solar de água pela Equação 4.12.

$$F = \frac{\sum_{i=1}^{12} EU_{\text{mês}}}{\sum_{i=1}^{12} DE_{\text{mês}}} \quad (4.12)$$

em que:

- F = Fração solar anual, adimensional;
- $EU_{\text{mês}}$ = Energia útil mensal coletada (kWh/mês); e
- $DE_{\text{mês}}$ = Demanda de energia (kWh/mês).

Os autores do método da Carta-F também propuseram um ábaco para obtenção direta da fração solar mensal a partir dos valores dos parâmetros D_1 e D_2 . O ábaco é apresentado na Figura 4.4.

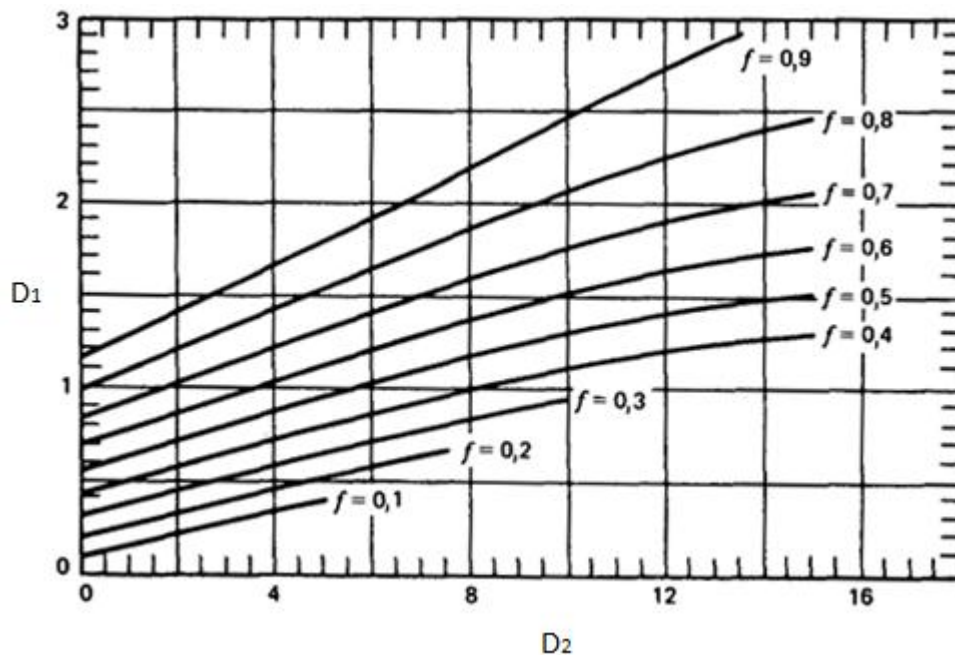


Figura 4.4: Ábaco para determinação da fração solar pelo método da Carta-F.

Fonte: (BECKMAN *et al.*, 1977 - modificado).

As variáveis técnicas dos coletores solares simulados neste trabalho, necessárias para o cálculo da fração solar anual do sistema de aquecimento de água, são apresentadas a seguir.

- i. Fator de eficiência óptica do coletor ($F'_R (\tau\sigma)_n$): 0,779, adimensional;
- ii. Modificador do ângulo de incidência ($\tau\sigma / \tau\sigma_n$): 0,96 adimensional;
- iii. Fator de correção do conjunto coletor/trocador (F'_R / F_R): 0,95 adimensional; e
- iv. Coeficiente global de perdas do coletor ($F_R U_L$): 6,795 W/(m².K).

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.3.1 Dimensionamento do aquecedor solar

Os dimensionamentos do sistema solar térmico para as diferentes condições de conforto de banho e níveis de eficiência pela certificação brasileira de edifícios residenciais são apresentados no Quadro 4.4.

Quadro 4.4: Dimensionamento do sistema solar para diferentes condições de conforto de banho e níveis de eficiência energética, considerando a ponderação entre fração solar e elétrica

Eficiência/Conforto	Reduzido	Regular	Bom
Nível A	CS 1,0 m ² RT 200 L	CS 1,9 m ² RT 200 L	CS 3,0 m ² RT 300 L
Nível B	—	—	—
Nível C	CS 0,9 m ² RT 200 L	CS 1,5 m ² RT 200 L	CS 2,3 m ² RT 300 L
Nível D	CS 0,7 m ² RT 200 L	CS 1,1 m ² RT 200 L	CS 1,8 m ² RT 300 L

Nota: CS é a área de coletor solar e RT é o volume do reservatório térmico.

A atual metodologia de classificação do sistema de aquecimento solar de água pela certificação brasileira de eficiência energética de edifícios residenciais, com ponderação da eficiência dos sistemas solar e elétrico para frações solares menores que 70%, impossibilita a obtenção direta do nível de eficiência energética B. Isto ocorre devido ao peso de cada sistema (Quadros 4.1 e 4.2) no cálculo do equivalente numérico ponderado, não sendo possível alcançar equivalente igual ou superior 4. Um sistema de aquecimento solar de água somente receberá classificação nível B caso possua fração solar anual igual ou superior a 70% e não atenda os pré-requisitos do nível A, com consequente rebaixamento de nível de A para B. Para efeito de comparação, os dimensionamentos anteriores foram refeitos, considerando apenas a eficiência energética do aquecedor solar, ou seja, a fração solar anual atendida, os quais são apresentados no Quadro 4.5.

Quadro 4.5: Dimensionamento do sistema solar para diferentes condições de conforto de banho e níveis de eficiência energética, considerando apenas a fração solar

Eficiência/Conforto	Reduzido	Regular	Bom
Nível A	CS 1,0 m ² RT 200 L	CS 1,9 m ² RT 200 L	CS 3 m ² RT 300 L
Nível B	CS 0,9 m ² RT 200 L	CS 1,5 m ² RT 200 L	CS 2,3 m ² RT 300 L
Nível C	CS 0,7 m ² RT 200 L	CS 1,1 m ² RT 200 L	CS 1,8 m ² RT 300 L
Nível D	CS 0,6 m ² RT 200 L	CS 1,0 m ² RT 200 L	CS 1,7 m ² RT 300 L

Nota: CS é a área de coletor solar e RT é o volume do reservatório térmico.

Comparando os Quadros 4.5 e 4.6, observa-se que a determinação do nível de eficiência energética exclusivamente pela fração solar promove o aumento em um nível na classificação do sistema de aquecimento de água, ou seja, de C para B e de D para C. Entretanto, o cálculo da eficiência energética adotado atualmente pela certificação brasileira, promovendo a redução de nível A diretamente para C, para sistemas com frações solares menores que 70%, incentiva o dimensionamento de aquecedores com maiores valores de fração solar.

O dimensionamento do aquecedor solar pela metodologia apresentada na NBR 15569 (ABNT, 2008) para as três condições de banho é apresentado no Quadro 4.6.

Quadro 4.6: Dimensionamento do aquecedor solar pela NBR 15569 para as três condições de conforto de banho

Conforto de banho	Dimensionamento NBR15569	Fração solar (%)
Reduzido	CS 1,3 m ² RT 200 L	79,6
Regular	CS 2,1 m ² RT 200 L	75,6
Bom	CS 3,4 m ² RT 300L	75,7

Nota: CS é a área de coletor solar e RT é o volume do reservatório térmico.

Observa-se que o dimensionamento proposto pela NBR 15569 (ABNT, 2008) exige uma área de coletor solar superior à mínima necessária para atender o limite do nível A (Quadro 4.4), com consequentes frações solares superiores a 70%. A metodologia de dimensionamento apresentada na NBR 15569 é baseada em uma fração solar anual teórica de 70%. Dentre os fatores que podem fazer com que a fração solar calculada diferencie deste valor estão o volume de armazenamento e o fator de correção de instalação considerados, definidos pelo usuário do método. Quanto maior o volume de armazenamento em relação ao volume mínimo necessário, maior será a fração solar. Por outro lado, quanto maior o fator de correção de instalação, referente ao desvio da orientação e da inclinação dos coletores em relação a uma condição ideal (orientados para o norte geográfico e com inclinação igual à latitude local acrescida de 10°), menor a fração solar. Neste trabalho,

foi considerado o volume de armazenamento comercialmente superior ao mínimo necessário e a instalação ideal, o que resultou em fração solar com valores moderadamente superiores a 70%.

Desta forma, desde que os profissionais da área de aquecimento solar de água atendam às recomendações apresentados na NBR 15569 (ABNT, 2008), não são necessárias adequações no dimensionamento para que seja atingido o nível máximo de eficiência para o sistema de aquecimento de água pela certificação brasileira de edifícios residenciais. Porém, devem ser observados os pré-requisitos apresentados no RTQ-R (BRASIL, 2010) para que o bom nível de eficiência energética obtido pelo uso de altas frações solares seja mantido na classificação final do sistema de aquecimento de água.

Deve ser ressaltado que a fração solar dos sistemas apresentados neste trabalho foi calculada pelo método da Carta-F original (BECKMAN *et al.*, 1977). Caso fosse utilizado o método da Carta-F modificado (MALKIN, 1985) seriam obtidas possivelmente maiores frações solares, ou ainda, seria necessário menor área de coletores solares para atender cada nível de eficiência energética. Portanto, é necessária uma adequação do RTQ-R (BRASIL, 2010) e da NBR 15669 (ABNT, 2008), quanto ao método de avaliação de aquecedores solares de água, os quais utilizam o método da Carta-F para sistemas forçados e termossifão, sendo o último geralmente empregado para fins residenciais no Brasil.

Uma observação importante sobre os dimensionamentos apresentados neste capítulo refere-se ao volume do reservatório térmico do aquecedor solar. Para o caso de conforto reduzido, seria necessário um armazenamento mínimo de 80 L a 50°C para atender a demanda de 120 L/dia a 40°C. Portanto, um reservatório térmico de 100 L atenderia os dimensionamentos referentes a esta condição de conforto. Porém, não existem reservatórios de 100 L no mercado brasileiro que possuam Selo PROCEL (pré-requisito específico do nível A de sistemas de aquecimento solar de água). Por este motivo, optou-se por reservatórios de 200 L nos dimensionamentos referentes à condição de conforto reduzido. Tal situação evidencia a necessidade de adaptação do mercado nacional de sistemas de

aquecimento solar de água para que a etiquetagem de edifícios possa ser aplicada com êxito no país.

4.3.2 Simulação termo-energética do sistema solar

O sistema de aquecimento solar de água classificado como nível de eficiência energética A, dimensionado para cada condição de conforto de banho foi simulado termo-energeticamente pelo programa *EnergyPlus*. Optou-se em simular aquecedores reais, ou seja, uso de menor área inteira de coletor solar de 1,0 m² que atendesse o limite do nível A. Os dimensionamentos e parâmetros técnicos avaliados do sistema solar são apresentados no Quadro 4.7.

Quadro 4.7: Parâmetros técnicos do sistema de aquecimento solar de água para diferentes condições de conforto de banho

Parâmetro do sistema/ Conforto de banho	Reduzido	Regular	Bom
Área de coletores solares (m ²)	1,0	2,0	3,0
Volume do reservatório térmico (L)	200,0	200,0	300,0
Radiação incidente sobre a área de coletores solares (kWh/ano)	1.353,5	2.707,0	4.060,5
Energia líquida transferida aos coletores solares (kWh/ano)	811,9	1.355,9	2.150,6
Energia líquida armazenada no reservatório térmico (kWh/ano)	630,3	1.079,8	1.715,6
Energia elétrica auxiliar ao sistema solar (kWh/ano)	225,9	345,5	583,5
Temperatura média da água no coletor solar, período de incidência solar (°C)	41,5	41,2	40,8
Temperatura média da água no reservatório térmico, período integral (°C)	49,3	49,1	48,9

A radiação incidente sobre a área de coletores solares sofreu acréscimo linear com o aumento da condição de conforto de banho, devido ao acréscimo de uma placa de coletor a cada elevação da condição de conforto. O valor máximo de 940,2 W/m² foi registrado no dia 26/10, às 13h00min, e o valor mínimo, para o mesmo horário, foi verificado no dia 31/07, igual a 89,30 W/m² para o arquivo de dados meteorológicos empregado, do tipo TMY. Portanto, a magnitude da incidência de radiação solar sobre a área de coletor sofreu variação em até dez vezes para um

mesmo horário no decorrer do ano. Esta grande variação de incidência pode ser explicada, além das típicas diferenças de radiação solar recebidas no período de verão e inverno, pela possível presença de nebulosidade no dia 31/07.

A quantidade de energia líquida transferida aos coletores solares é representada pela incidência de radiação solar sobre a superfície de captação menos as perdas térmicas ocorridas neste processo. Os sistemas referentes às condições de conforto reduzido, regular e bom apresentaram perdas térmicas no coletor solar de 541,6 kWh/ano, 1.351,1 kWh/ano e 1.909,9 kWh/ano (diferença entre os valores das linhas 3 e 4 do Quadro 4.7), respectivamente.

A razão entre a quantidade de energia transferida e incidente na área de captação solar é conhecida como eficiência térmica do coletor. O modelo de coletor solar simulado apresentou eficiência térmica média de 54,4%, considerando as três condições de conforto de banho. Segundo a classificação de eficiência energética do PBE, este modelo de coletor possui eficiência térmica de 59,8%. A diferença entre o valor médio obtido neste trabalho e o calculado pelo PBE pode ser devido, dentre outros fatores, às condições climáticas e às vazões de teste empregadas em cada análise. A eficiência energética do coletor é um dos parâmetros mais importantes para determinar o desempenho de um aquecedor solar, influenciando diretamente no cálculo da fração solar anual do sistema.

A quantidade de energia líquida armazenada no reservatório térmico refere-se à energia prontamente disponível para aquecimento, ou seja, desconsideradas as perdas térmicas para o meio externo. Os reservatórios referentes às condições de conforto reduzido, regular e bom apresentaram perdas térmicas de 181,6 kWh/ano, 276,1 kWh/ano e 435 kWh/ano (diferença entre os valores das linhas 4 e 5 do Quadro 4.7), respectivamente. Comparando as perdas com o consumo de energia elétrica auxiliar ao sistema solar (valores da linha 8 do Quadro 4.7) observa-se que o valor de perdas térmicas no reservatório equivale-se a, aproximadamente, 70% do consumo da energia auxiliar. Portanto, como não é possível impedir que parte da energia gerada pelo aquecedor solar seja perdida por meio de trocas térmicas com o meio externo, deve-se optar sempre que possível por

reservatórios com baixa condutividade térmica. Apesar das perdas no reservatório parecerem elevadas quando comparadas ao consumo de energia auxiliar, com média de 0,11 kWh/litro/mês, elas estão abaixo dos valores calculados pelo PBE para os modelos de reservatórios simulados (média de 0,18 kWh/litro/mês).

A temperatura média da água no coletor solar, calculada para o período de incidência de radiação solar foi, aproximadamente, igual para os sistemas dimensionados para as condições de conforto reduzido, regular e bom, com diferença abaixo de um grau Celsius (40°C a 41°C). Foram verificadas temperaturas em torno de 60°C nas horas de máxima insolação e temperaturas de aproximadamente 30°C nas horas de mínima insolação. A temperatura média da água no reservatório térmico, calculada para período integral, também foi aproximadamente igual para as três condições de conforto de banho, com diferença abaixo de um grau Celsius (48°C a 49°C). Portanto, a temperatura média da água no reservatório térmico está abaixo da temperatura de acionamento da resistência elétrica (45°C), evitando o consumo excessivo de energia auxiliar.

O aumento da condição de conforto de banho de reduzido para regular e regular para bom provocou um acréscimo de aproximadamente 53% e 69% no consumo de energia da resistência elétrica, respectivamente. Este aumento diferencial de consumo é devido à elevação desigual das vazões de água utilizadas: conforto reduzido (3 L/min), regular (5 L/min) e bom (8 L/min). O aumento da condição de conforto reduzido para regular exige um aquecimento adicional de 80 L/dia, enquanto de regular para bom de 120 L/dia.

O fluxo de energia, entre os componentes principais do aquecedor solar para a condição de conforto de banho regular, é apresentado na Figura 4.5. Observa-se que a maior parte da energia é perdida no coletor solar. Já as perdas no reservatório térmico poderiam ser maiores caso a condutividade térmica do material de revestimento dele fosse maior. Como pode ser observado na Figura 4.5, as perdas térmicas no reservatório são maiores no período de inverno, devido à menor temperatura externa que favorece o aumento de trocas térmicas entre a água aquecida no interior do reservatório e o ar externo. Além disso, pode ser visto na Figura 4.5 a

relação inversa entre a dependência de energia auxiliar do sistema e a energia armazenada no reservatório térmico.

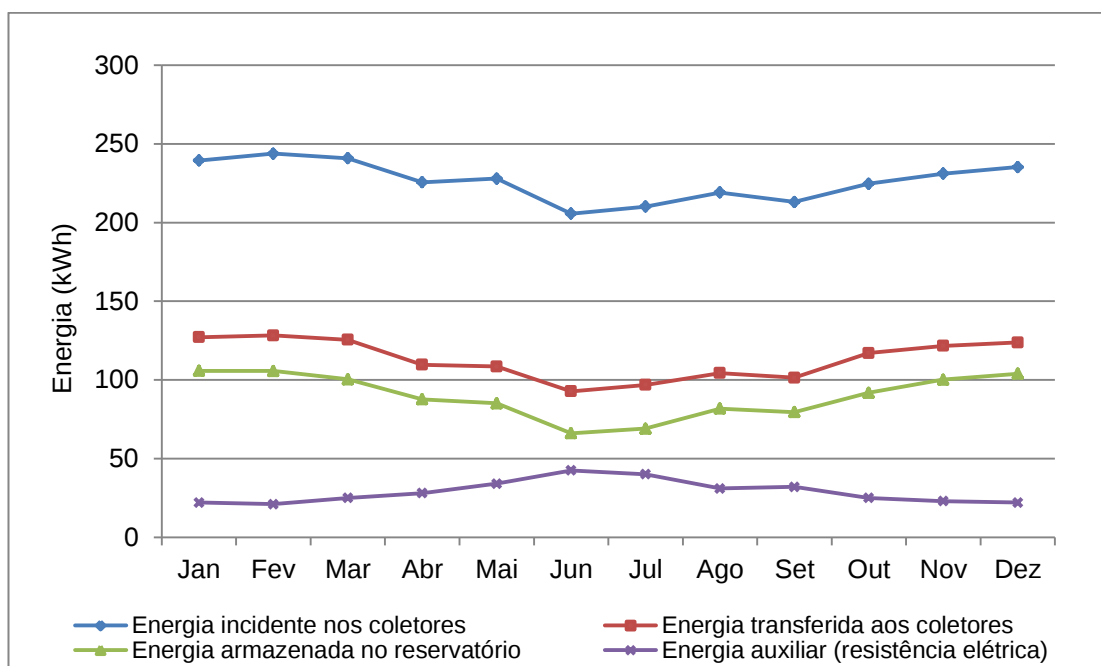


Figura 4.5: Energia transferida entre os componentes principais do aquecedor solar para a condição de conforto de banho regular e nível de eficiência energética A.

4.3.3 Consumo de energia pelos sistemas solar e elétrico

O consumo anual de energia elétrica pelas duas opções de aquecimento de água analisadas (chuveiro elétrico e aquecedor solar com apoio elétrico) e o consumo total da residência (iluminação, eletrodomésticos e aquecimento de água) são apresentados nos Quadros 4.8 e 4.9. Adicionalmente, é exibida nos quadros a participação do aquecimento de água no consumo total da residência nos períodos definidos: “verão” (chuveiro elétrico com uso de menor potência - janeiro, fevereiro, março, abril, outubro, novembro e dezembro) e “inverno” (chuveiro elétrico com uso de maior potência - maio, junho, julho, agosto e setembro). As diferenças de consumo da geladeira nos períodos de verão e inverno foram desconsideradas no cálculo do consumo de energia elétrica por eletrodomésticos.

Quadro 4.8. Consumo de energia elétrica da residência, do chuveiro elétrico e a participação desta opção de aquecimento de água no consumo total da residência

Conforto de banho	Residência (kWh/ano)	Chuveiro elétrico (kWh/ano)	Participação do chuveiro elétrico	
			Verão (%)	Inverno (%)
Reduzido	2.033,5	915,8	41,1	49,8
Regular	2.363,2	1.245,6	51,1	54,8
Bom	2.667,7	1.550,0	54,5	62,3

Quadro 4.9: Consumo de energia elétrica da residência, do sistema solar com apoio elétrico e a participação desta opção de aquecimento de água no consumo total da residência

Conforto de banho	Residência (kWh/ano)	Sistema solar (kWh/ano)	Participação do sistema solar	
			Verão (%)	Inverno (%)
Reduzido	1.343,9	225,9	14,3	20,2
Regular	1.463,2	345,5	20,3	27,8
Bom	1.702,0	583,5	30,1	39,5

O consumo anual de energia elétrica para atender o sistema de iluminação e uso de eletrodomésticos foi de 644,6 kWh/ano e 473,0 kWh/ano, respectivamente. Portanto, a residência brasileira típica estudada, apresenta consumo de energia elétrica de 1.117,6 kWh/ano, excluindo a energia necessária para aquecimento de água, atendida por aquecedor solar ou chuveiro elétrico.

Os percentuais de participação do chuveiro elétrico no consumo de energia elétrica encontrados nas simulações (Quadro 4.8) foram consideravelmente superiores à média nacional de 24%, apontado pela Pesquisa de Posse de Equipamentos e Hábitos de Uso do PROCEL, para o ano de 2005 (ELETROBRAS, 2007). Porém, como verificado por Naspolini *et al.* (2011), houve uma popularização de chuveiros elétricos com altas potências no país nos últimos anos, o que implica em maior participação deste equipamento no consumo de energia nas residências brasileiras.

Segundo estudo realizado por Fedrigo *et al.* (2009), a participação do chuveiro elétrico no consumo de energia elétrica no setor residencial difere bastante entre as regiões geográficas, os períodos de verão e de inverno e a faixa de consumo energético da residência. De acordo com os mesmos autores, na região Sudeste a participação do chuveiro é de 8,3% no verão e de 35,6% no inverno. A diferença obtida entre a participação do chuveiro elétrico nesta pesquisa e os valores apontados por Fedrigo *et al.* (2009)

pode ser explicada pelo elevado número de zonas bioclimáticas que abrangem a região Sudeste, causando uma heterogeneidade na demanda de água quente nesta região, dentre outros fatores. Viçosa está presente na zona bioclimática 3, uma das mais frias do país, o que implica em maior necessidade de energia para aquecimento de água, comparativamente a zonas mais quentes que estão presentes no Sudeste, como a zona bioclimática 8 (Vitória - ES e Rio de Janeiro - RJ). Para a região Sul, o estudo de Fedrigo *et al.* (2009), aponta que a participação do chuveiro elétrico é de 39,4% no verão e de 43,3% no inverno, valores mais próximos aos encontrados neste trabalho.

A substituição do chuveiro elétrico pelo aquecedor solar com apoio elétrico provocou uma redução de 75%, 72% e 62% no consumo de energia elétrica para as condições de conforto reduzido, regular e bom, respectivamente, uma média de 70%. Em relação ao consumo de energia da residência, a substituição do chuveiro elétrico por aquecedor solar provocou uma redução de, aproximadamente, 34%, 38% e 36% no consumo total de energia elétrica da residência para as condições de conforto reduzido, regular e bom, respectivamente, média de 36%.

Nas Figuras 4.6, 4.7 e 4.8 são apresentados os consumos mensais das opções de aquecimento de água por chuveiro elétrico e sistema solar para as três condições de conforto. Em cada figura, é apresentada a média anual para cada opção de aquecimento na forma de uma reta.

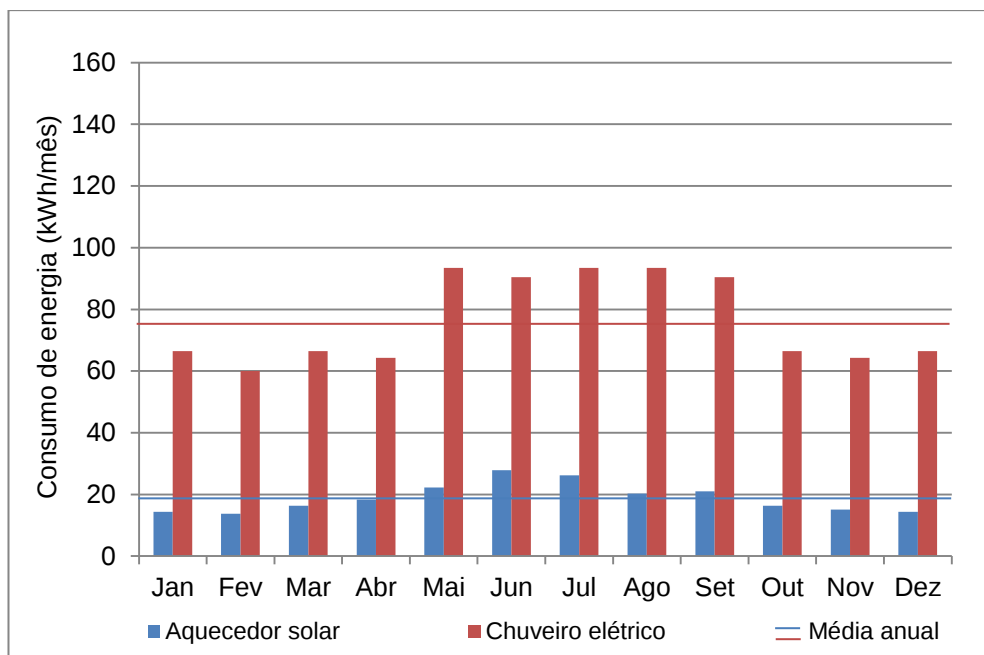


Figura 4.6: Consumo de energia mensal do sistema solar com apoio elétrico e chuveiro elétrico para a condição de conforto de banho reduzido.

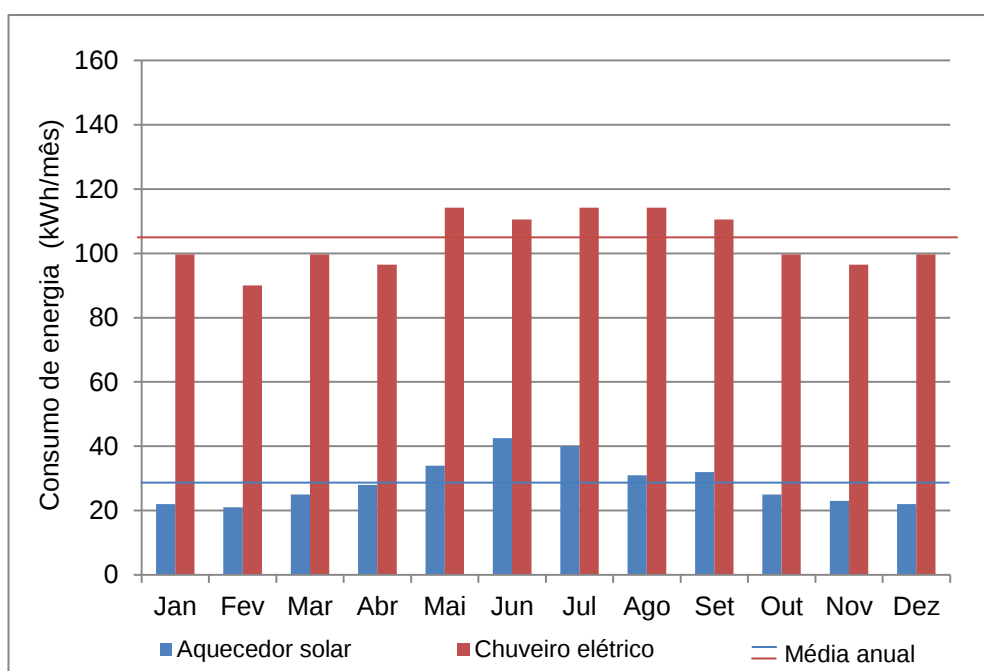


Figura 4.7: Consumo de energia mensal do sistema solar com apoio elétrico e chuveiro elétrico para a condição de conforto de banho regular.

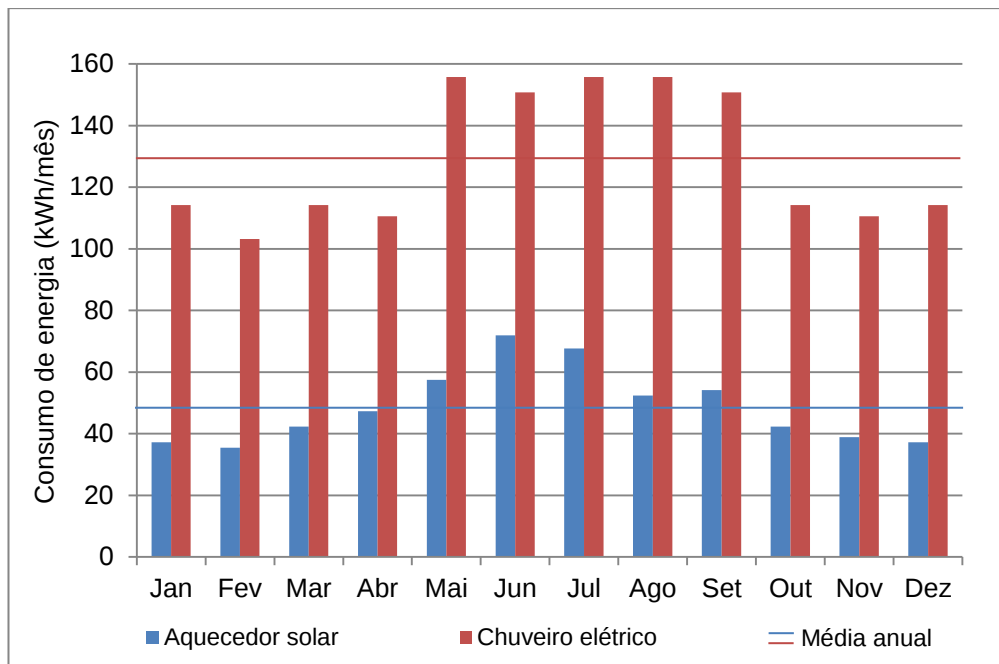


Figura 4.8: Consumo de energia mensal do sistema solar com apoio elétrico e chuveiro elétrico para a condição de conforto de banho bom.

De acordo com as Figuras 4.6, 4.7 e 4.8, o sistema de aquecimento solar apresentou maior dependência de energia elétrica nos meses de maio, junho e julho e menor dependência nos meses de janeiro, fevereiro e dezembro, para as três condições de conforto. No caso de aquecimento por chuveiro elétrico, como foram adotados equipamentos com duas opções de potências (“verão/inverno”), o consumo mensal de energia foi definido pela potência de uso e o número de dias do mês. Deve-se lembrar que foram empregados chuveiros com potências elétricas de 4.500/3.200 W, 5.500/4.800 W e 7.500/5.500 W para atender às condições de conforto reduzido, regular e bom, respectivamente. A menor potência foi utilizada nos meses de janeiro, fevereiro, março, abril, outubro, novembro e dezembro, enquanto a maior potência foi usada nos meses de maio, junho, julho, agosto e setembro.

O consumo médio de energia quando se utilizou a opção de aquecimento de água por chuveiro elétrico foi de 76,3 kWh/mês, 103,8 kWh/mês e 129,7 kWh/mês para as condições de conforto reduzido, regular e bom, respectivamente. Em contraste, o consumo médio de energia quando se usou o aquecedor solar com apoio elétrico foi de 18,9 kWh/mês, 28,8 e 48,7 kWh/mês para as condições de conforto reduzido, regular e bom,

respectivamente. O consumo de energia pelo aquecedor solar para a condição de conforto bom equivale a aproximadamente a 64% do consumo de energia pelo chuveiro elétrico para a condição de conforto reduzido. Portanto, a substituição do chuveiro elétrico por aquecedor solar permite a elevação da condição de conforto de banho com pequeno acréscimo de consumo de energia elétrica.

4.3.4 Proposição de nova classificação do sistema de aquecimento solar de água para o RTQ-R

Como apresentado anteriormente, a atual metodologia de classificação de sistemas de aquecimento solar de água do PBE de edifícios residenciais se limita a exigir um nível de eficiência energética já empregada pela norma 15569 (ABNT, 2008), de uso obrigatório por profissionais da área. Além disso, foi observado que para sistemas de aquecimento solar com *backup* elétrico não é possível obter de forma direta o nível de eficiência energética B, apenas por meio do rebaixamento de nível A para B, pelo não cumprimento de pré-requisitos do nível mais alto. Uma proposição de nova classificação para a classificação do sistema de aquecimento solar de água para o RTQ-R (BRASIL, 2010) é apresentada a seguir.

Classificação atual do sistema de aquecimento solar com apoio elétrico

Regra vigente: Sistemas com fração solar igual ou superior a 70% são classificados como nível A. Para sistemas de aquecimento de água com fração solar inferior a 70%, calcula-se o equivalente numérico ponderado do sistema de aquecimento solar-elétrico com base nos valores apresentados nos Quadros 4.1 e 4.2 e, em seguida, obtém-se o nível de eficiência energética do sistema de aquecimento de água pelo Quadro 4.3.

As classificações possíveis do sistema de aquecimento solar de água com *backup* elétrico pela atual metodologia RTQ-R é apresentado no

Quadro 4.10. Foi utilizado um equivalente numérico igual a 2 para o sistema elétrico, referente ao uso de potência menor que 4.600 W (Quadro 4.2). Sabe-se que não é necessário o uso de potências maiores que 4.000 W para auxiliar aquecedores solares, uma vez que a água é pré-aquecida mesmo em dias com baixa disponibilidade de radiação solar.

Quadro 4.10: Limites de classificação do sistema de aquecimento solar com *backup* elétrico pela atual metodologia RTQ-R

Fração solar anual, FS (%)	EqNum solar	EqNum elétrico	EqNum ponderado máximo	EqNum ponderado mínimo	Classificação final
$FS \geq 70$	5	2	5,0	5,0	A
$60 \leq FS < 70$	4	2	3,4	3,2	C
$50 \leq FS < 60$	3	2	2,6	2,5	D
$FS < 50$	2	2	2,0	2,0	D

Classificação proposta para sistema de aquecimento solar com apoio elétrico

A metodologia de classificação do sistema de aquecimento solar de água que será proposta se baseia na modificação dos valores presentes no Quadro 4.1 pelos valores apresentados no Quadro 4.11.

Quadro 4.11: Equivalente numérico para sistemas de aquecimento solar para a metodologia proposta

Fração solar anual, FS (%)	Equivalente numérico
$FS \geq 80$	5
$70 \leq FS < 80$	5
$60 \leq FS < 70$	4
$FS < 60$	3

Regra proposta: Sistemas com fração solar igual ou superior a 80% são classificados como nível A. Para sistemas de aquecimento de água com fração solar inferior a 80%, calcula-se o equivalente numérico ponderado do sistema solar-elétrico com base nos valores apresentados nos Quadros 4.1 e 4.11 e, em seguida, obtém-se o nível de eficiência energética do sistema de aquecimento de água pelo Quadro 4.3.

As classificações possíveis do sistema de aquecimento solar com *backup* elétrico pela metodologia proposta neste item são apresentadas no Quadro 4.12. Foi utilizado equivalente numérico igual a 2 para o sistema auxiliar elétrico, pelo mesmo motivo descrito anteriormente.

Quadro 4.12: Limites de classificação do sistema de aquecimento solar com *backup* elétrico para a metodologia proposta

Fração Solar anual, FS (%)	EqNum solar	EqNum elétrico	EqNum ponderado máximo	EqNum ponderado mínimo	Classificação final
$FS \geq 80$	5	2	5,0	5,0	A
$70 \leq FS < 80$	5	2	4,4	4,1	B
$60 \leq FS < 70$	4	2	3,4	3,2	C
$FS < 60$	3	2	2,6	2,5	D

Portanto, a metodologia de classificação do sistema de aquecimento solar com *backup* elétrico proposta neste item estabelece uma fração solar anual mínima de 80% para a obtenção do nível de eficiência energética A, valor este 10% maior que o empregado pela NBR 15669 (ABNT, 2008). Além disso, esta proposta foi formulada de modo a permitir que o nível de eficiência energética B seja alcançado não somente por rebaixamento de nível A para B.

4.4. CONCLUSÃO

O uso de três condições de conforto de banho e diferentes níveis de eficiência energética pelo PBE de edifícios residenciais mostrou-se uma opção satisfatória para avaliar o desempenho termo-energético do aquecedor solar de água. A substituição do chuveiro elétrico pelo sistema de aquecimento solar com apoio elétrico provocou uma redução média de 71% no consumo de energia elétrica destinado ao aquecimento de água da residência e 36% no consumo total de energia da residência.

Foi verificado que desde que os profissionais da área de aquecimento solar de água atendam às recomendações apresentadas na norma brasileira (NBR 15569) não é necessário adequações no dimensionamento para que

seja atingido o nível máximo de eficiência para o sistema de aquecimento pela certificação brasileira de edifícios residenciais. Porém, devem ser observados os pré-requisitos apresentados no RTQ-R para que o bom nível de eficiência obtida pelo uso de altos valores de fração solar seja mantido na classificação final do sistema de aquecimento de água.

Foi observado que a atual metodologia de classificação do sistema de aquecimento solar de água pela certificação brasileira de eficiência energética de edifícios residenciais se limita a exigir uma eficiência energética já prevista na NBR 15569 (fração solar anual mínima de 70%). Além disso, foi verificado que a metodologia impossibilita a obtenção direta do nível de eficiência energética B.

O PBE de edifícios e a NBR 15569 avaliam a eficiência de aquecedores solares pelo método da Carta-F original para sistemas com circulação de água forçada ou termossifão, sendo este método adequado para o primeiro tipo e o método da Carta-F modificado para o segundo. Portanto, é necessária uma adequação das referências brasileiras citadas anteriormente quanto ao método de avaliação de aquecedores solares de água, sendo os sistemas com circulação natural de água comumente utilizados para aplicações residenciais.

4.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15569**: Sistema de Aquecimento Solar de Água em Circuito Elétrico Direto - Projeto e Instalação. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

BECKMAN, W. A.; KLEIN, S. A.; DUFFIE, J. A. **Solar Heating Design by the F-Chart method**. Nova York: Wiley-Interscience, 1977. 218 p.

BRASIL. Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial. **Portaria 449, de 25 de novembro de 2010**. Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Residenciais. Rio de Janeiro: INMETRO, 2010.

CASSARD, H.; DENHOLM, P; ONG, S. Technical and economic performance of residential solar water heating in the United States. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Golden, v. 15, n. 8, p. 3789-3800, 2011.

COELHO, D. M. **Identificação de variáveis críticas e simulação do uso de coletores solares em prédios residências**. 125 p. 2011. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, 2011.

DASOL - Departamento Nacional de Aquecimento Solar. **Cidades Solares**. Disponível em: <<http://www.dasolabrava.org.br/informacoes/cidades-solares/>>. Acesso em: 19 abr. 2012.

ELETROBRAS - Centrais Elétricas Brasileiras S.A. **Pesquisa de Posse de Equipamentos e Hábitos de Uso: Ano Base 2005 - Classe Residencial - Relatório Brasil**. Rio de Janeiro: ELETROBRAS/PROCEL, 2007.

FEDRIGO, N. S.; GHISI, E.; LAMBERTS, R. Usos finais de energia elétrica no setor residencial brasileiro. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 10., 2009, Natal. **Anais...** Porto Alegre: ANTAC, 2009, p. 367-376.

GUIMARÃES, I. B. B.; CARLO, J. C. **Desenvolvimento do arquivo climático de Viçosa para simulação computacional de desempenho termo-energético**. Viçosa: UFV, 2011. 81 p. Relatório de pesquisa.

HERMSDORFF, W. **Proposta de gerenciamento para redução da demanda de energia elétrica**. 2001. 116 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2001.

INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia. **Tabelas de consumo / eficiência energética**. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/consumidor/tabelas.asp>>. Acesso em: 22 jan. 2012.

KALOGIROU, S. Thermal performance, economic and environmental life cycle analysis of thermosiphon solar water heaters. **Solar Energy**, Tampa, v. 83, n. 1, p. 39-48, 2009.

MALKIN, M. P. **Design of thermosyphon solar domestic hot water systems**. 1985. 125 p. Dissertação (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade de Wisconsin-Madison, Madison, WI, 1985.

NASPOLINI, H. F.; MILITÃO, H. S. G.; RÜTHER, R. The role and benefits of solar water heating in the energy demands of low-income dwellings in Brazil, **Energy Conversion and Management**, Belton, v. 51, n. 12, p. 2835-2845, 2010.

SORGATO, M. J. **Desempenho térmico de edificações residenciais unifamiliares ventiladas naturalmente**. 2009. 216 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2009.

TAVARES, S. F. **Metodologia para análise do ciclo de vida energético de edificações residenciais brasileiras**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). 2006. 225 p. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2006.

TANABE, C. S. **Viabilidade da análise exergética na elaboração de tarifas de energia elétrica**. 1998. 72 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1998

5. VIABILIDADE ECONÔMICA DE AQUECEDORES SOLARES DE ÁGUA RESIDENCIAIS

Resumo

O chuveiro elétrico é o equipamento com maior consumo e demanda de energia elétrica em habitações brasileiras, gerando altos custos para o consumidor residencial e para o sistema elétrico nacional. Uma alternativa para reduzir tais custos, é a substituição de chuveiros elétricos por outras fontes energéticas, como a energia solar térmica. Pesquisas realizadas em diversos países comprovam a viabilidade econômica de aquecedores solares de água comparativamente às opções de aquecimento elétrico e a gás. Neste capítulo, o objetivo foi avaliar a viabilidade econômica de sistemas solares térmicos dimensionados para atender diferentes condições de conforto de banho e níveis de eficiência energética pela certificação brasileira de edifícios residenciais, comparativamente ao uso de chuveiro elétrico. Na análise foram empregados os indicadores econômicos taxa interna de retorno (T_{IR}), valor presente líquido (V_{PL}), tempo de retorno de capital (T_{RC}) e custo da energia conservada (C_{EC}). Foi proposta, ainda, uma análise de sensibilidade para diversos cenários técnico-financeiros. Os indicadores T_{IR} , T_{RC} , V_{PL} e C_{EC} apresentaram valores médios de 26%, 4,5 anos, R\$ 5.047,00 e R\$ 0,28/kWh, respectivamente. O uso de aquecedores solares comparativamente ao chuveiro elétrico permaneceu viável para os diversos cenários propostos na análise de sensibilidade. Portanto, a substituição do chuveiro elétrico por aquecedor solar de água é economicamente viável no Brasil e continuará a ser, mesmo que fatores determinantes desta condição sofram certas modificações futuras.

Palavras-chave: energia solar, aquecimento de água, habitações, análise econômica.

5.1 INTRODUÇÃO

O chuveiro elétrico contribui com parcela importante do valor final da conta de energia elétrica do consumidor residencial e gera altos custos para o sistema elétrico nacional. Segundo Nogueira (2007), a instalação de um chuveiro elétrico de 4 kW exige um investimento em geração, transmissão e distribuição de energia elétrica de, aproximadamente, R\$ 10.000,00.

Uma alternativa para reduzir tais custos é a substituição do chuveiro elétrico por outras fontes energéticas. Pesquisas realizadas no Brasil e em outros países comprovam a viabilidade econômica do uso de aquecedores solares de água em habitações, comparativamente às opções de aquecimento elétrico e a gás (TANABE, 1998; HERMSDORFF, 2001; CRAWFORD; TRELOAR, 2004; KALOGIROU, 2009).

O capital investido em um aquecedor solar com apoio (*backup*) elétrico é geralmente recuperado em cinco anos, comparado ao uso de aquecimento elétrico (OLIVEIRA *et al.*, 2008; KALOGIROU, 2009; COELHO, 2011). Essa variação depende, principalmente, da disponibilidade de radiação solar, da eficiência energética do sistema, do valor da tarifa de energia elétrica e de políticas de incentivo ao uso da tecnologia de aquecimento solar (CASSARD *et al.*, 2011).

Segundo pesquisa realizada pelo PROCEL, a falta de conhecimento da sociedade sobre a viabilidade econômica do uso de aquecedores de água e o custo inicial do sistema estão entre os maiores entraves à disseminação do uso desta tecnologia no Brasil, principalmente nas residências de baixa renda (ELETROBRAS, 2007).

Nos últimos anos, alguns fatores têm contribuído para o crescimento do mercado brasileiro de aquecimento solar de água, dentre eles, a isenção de impostos que o setor obteve; os financiamentos aos interessados em adquirir o aquecedor solar, como o oferecido pela Caixa Econômica Federal; e a necessidade de reduzir o consumo de energia elétrica durante o racionamento ocorrido em 2001 (VARELLA, 2004).

Por conseguinte, objetivou-se com este capítulo analisar a viabilidade econômica do uso de aquecedores solares de água para atender diferentes condições de conforto de banho e níveis de eficiência energética pela

certificação brasileira de edifícios residenciais. Além disso, foi proposta uma análise de sensibilidade para diferentes cenários técnico-financeiros.

5.2 MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho foi realizado no Laboratório de Energia do Departamento de Engenharia Agrícola e no Laboratório de Tecnologias em Conforto Ambiental e Eficiência Energética do Departamento de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais.

5.2.1 Modelos analisados

A análise de viabilidade econômica do aquecedor solar, comparativamente ao uso do chuveiro elétrico, foi realizada para as 12 configurações de sistemas dimensionados no Capítulo 4:

- i. Três condições de conforto de banho (reduzido, regular e bom) para três classificações de nível de eficiência energética da certificação brasileira de edifícios residenciais (A, C e D) (BRASIL, 2010); e
- ii. Um dimensionamento utilizando a metodologia apresentada na norma brasileira de referência sobre aquecimento solar de água, NBR 15569 (ABNT, 2008), para cada condição de conforto de banho.

Detalhes sobre a residência, a demanda de água quente e o dimensionamento dos aquecedores solares estão presente no Capítulo 4. Como apresentado em tal capítulo, a metodologia de classificação do sistema de aquecimento solar de água da certificação brasileira de edifícios residenciais impossibilita a obtenção direta do nível de eficiência energética B, ou seja, um sistema somente será classificado como nível B por rebaixamento de nível A para B, devido o não cumprimento dos pré-requisitos do nível A. Por isto, as análises realizadas neste capítulo não abordam sistemas com classificação nível B pela certificação brasileira de edifícios residenciais.

5.2.2 Indicadores econômicos

Na avaliação de viabilidade econômica do aquecedor solar foram empregados os indicadores valor presente líquido (V_{PL}), taxa interna de retorno (T_{IR}), tempo de retorno de capital (T_{RC}) e custo da energia conservada (C_{EC}). Os três primeiros foram calculados com uso do programa computacional *RETScreen International*, o qual emprega metodologia de matemática financeira clássica (CTEC, 2005). O último indicador econômico foi calculado por metodologia elaborada por Martinaitis *et al.* (2004). Os indicadores econômicos utilizados na análise são detalhados a seguir.

Valor presente líquido (V_{PL})

O valor presente líquido (V_{PL}) refere-se ao fluxo de caixa final no horizonte de planejamento considerado, descontado a taxa de desconto, em moeda com valor atual. A taxa de desconto é também conhecida como taxa mínima de atratividade. O V_{PL} é calculado utilizando a Equação 5.1.

$$V_{PL} = \sum_{n=0}^N \frac{C_n}{(1 + d)^n} \quad (5.1)$$

em que:

- V_{PL} = Valor presente líquido, R\$;
- C_n = Fluxo de caixa para o ano n , R\$/ano;
- n = O n -ésimo ano, adimensional; e
- d = Taxa de desconto, % a.a.

Na análise de projetos pelo valor presente líquido, o investimento será economicamente viável se este indicador for positivo, ou seja, o custo inicial será pago e haverá geração de lucro. Para utilização do método do V_{PL} é necessário definir uma taxa para descontar os fluxos de caixa (CTEC, 2005).

Taxa interna de retorno (T_{IR})

A taxa interna de retorno (T_{IR}) é a taxa de desconto que faz com que o valor presente líquido do projeto seja igual à zero, no horizonte de planejamento considerado. É calculada utilizando a Equação 5.2.

$$0 = \sum_{n=0}^N \frac{C_n}{(1+T_{IR})^n} \quad (5.2)$$

em que:

- T_{IR} = Taxa interna de retorno, %;
- C_n = Fluxo de caixa para o ano n , R\$/ano;
- n = O n -ésimo ano, adimensional; e
- N = Horizonte de planejamento, anos.

Se a taxa interna de retorno for igual ou maior que a taxa mínima de atratividade, o projeto será considerado economicamente viável. A maior vantagem de avaliar um empreendimento pela T_{IR} é que seu valor não depende da taxa de desconto de uma dada organização. A T_{IR} obtida é específica para o projeto e se aplica a todos os investidores interessados no projeto (CTEC, 2005).

Tempo de retorno de capital (T_{RC})

O tempo de retorno de capital (T_{RC}) é o número de anos necessários para que o fluxo de caixa líquido se iguale ao investimento inicial. O T_{RC} é calculado utilizando a Equação 5.3.

$$T_{RC} = \frac{C_i}{C_{liq}} \quad (5.3)$$

em que:

T_{RC} = Tempo de retorno de capital, anos;

C_i = Custo inicial, R\$; e

C_{liq} = Fluxo de caixa líquido anual esperado, R\$/ano.

O tempo de retorno de capital é um indicador econômico exclusivamente temporal e não deve ser usado como o principal indicador para avaliar um projeto. Porém, é útil para verificar o nível de risco de um investimento. O T_{RC} deve ser empregado junto a indicadores de rentabilidade, como T_{IR} e V_{PL} (CTEC, 2005).

Custo da energia conservada (C_{EC})

O custo da energia conservada (C_{EC}) é um indicador econômico utilizado em tomadas de decisão referentes a medidas de conservação de energia (MCE). O C_{EC} é calculado utilizando a Equação 5.4.

$$C_{EC} = \frac{C_i}{\Delta E} \frac{d}{[1 - (1+d)^{-N}]} \quad (5.4)$$

em que:

C_{EC} = Custo da energia conservada, R\$/kWh;

C_i = Custo inicial da MCE, R\$;

ΔE = Energia economizada pela implementação da MCE em relação ao caso base, kWh;

N = Horizonte de planejamento da MCE, anos; e

d = Taxa de desconto anual.

Normalmente, os resultados do C_{EC} coincidem com os resultados do V_{PL} e da T_{IR} . No entanto, o cálculo do custo da energia conservada é mais facilmente compreendido do ponto de vista energético. O C_{EC} indica o que é mais barato: consumir energia ao não adotar uma medida de conservação ou economizar energia ao investir na medida de conservação. O

investimento é economicamente viável quando o C_{EC} for menor que o valor da tarifa de energia local (MARTINAITIS *et al.*, 2004).

5.2.3 Parâmetros técnico-financeiros

Na análise de viabilidade econômica do aquecedor solar, comparativamente ao uso de chuveiro elétrico, foram utilizados os seguintes parâmetros:

- i. Taxa de desconto igual a 8% a.a., como recomendado pela ANEEL para análise de projetos de aquecimento solar de água (ANEEL, 2008);
- ii. Horizonte de planejamento do aquecedor solar igual a 20 anos (ANEEL, 2008);
- iii. Tarifa atual de energia elétrica da Companhia Energética de Minas Gerais para o setor residencial, com impostos para o município de Viçosa, igual a R\$ 0,61/kWh (CEMIG, 2011); e
- iv. Reajuste da tarifa de energia elétrica igual a 2% a.a. acima da inflação, média dos últimos seis anos (ANEEL, 2011; IPEA, 2011).

5.2.4 Proposição de cenários futuros

Os parâmetros considerados no item 5.2.3 e o custo do aquecedor solar foram variados para a realização da análise de sensibilidade como apresentado a seguir, onde, os valores destacados em negrito e sublinhados correspondem ao caso base:

- i. Taxa de desconto: 4, 6, **8**, 10 e 12% a.a.;
- ii. Horizonte de planejamento do sistema solar: 10, 15, **20**, 25 e 30 anos;
- iii. Tarifa de energia elétrica: 0,41, 0,51, **0,61**, 0,71 e R\$ 0,81/kWh;
- iv. Reajuste da tarifa de energia acima da inflação: 0, 1, **2**, 3, e 4% a.a., e
- v. Variação do custo inicial: -30, -15, **0**, 15 e 30%.

A partir da análise de sensibilidade foram ajustadas equações de regressão linear relacionando os indicadores econômicos T_{IR} , V_{PL} , T_{RC} e C_{EC}

com a taxa de desconto, o horizonte de planejamento do sistema solar, a tarifa de energia elétrica, o reajuste da tarifa de energia elétrica e o custo inicial do aquecedor solar.

5.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.3.1 Custo inicial do sistema solar térmico

O custo inicial do aquecedor solar, incluindo coletores, reservatório térmico, material hidráulico e mão-de-obra para a instalação do sistema, referentes às diferentes condições de conforto de banho e níveis de eficiência energética pela certificação brasileira de edifícios residenciais são apresentados no Quadro 5.1.

Quadro 5.1: Custo inicial do aquecedor solar para diferentes condições de conforto de banho e níveis de eficiência energética, em reais

Eficiência/Conforto	Reduzido (R\$/sistema)	Regular (R\$/sistema)	Bom (R\$/sistema)
Nível A	2.435,00	2.715,00	3.250,00
Nível C	2.365,00	2.575,00	3.005,00
Nível D	2.295,00	2.435,00	2.830,00

Os valores apresentados no Quadro 5.1 foram orçados em uma empresa de aquecimento solar de água que atende a região de Viçosa, Minas Gerais. Os custos unitários são representados a seguir:

- i. Coletor solar plano com área de 1,0 m², dutos de cobre e cobertura de vidro, fator de eficiência ótica de 0,779 (adimensional), coeficiente global de perdas térmicas de 6,795 W/(m². K), Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE) A e Selo PROCEL: R\$ 350,00;
- ii. Reservatório térmico horizontal com capacidade de 200 L, fabricado em aço inoxidável com isolamento de poliuretano, Selo PROCEL: R\$ 850,00;
- iii. Reservatório térmico horizontal com capacidade de 300 L, fabricado em aço inoxidável com isolamento de poliuretano, Selo PROCEL: R\$ 1.000,00;

- iv. Material hidráulico, incluindo tubos, conexões e registros: R\$ 800,00; e
- v. Mão-de-obra para instalação do aquecedor solar: R\$ 400,00.

Como apresentado no Quadro 5.1, o aumento da condição de conforto de banho de reduzido para regular provocou um aumento médio de 10% no custo inicial do sistema solar, considerando os três níveis de eficiência energética. Enquanto a alteração de conforto regular para bom ocasionou um acréscimo médio de 18%, considerando, novamente os três níveis de eficiência energética. Esta diferença percentual é devido ao maior acréscimo de vazão entre as duas melhores condições de banho, exigindo maior área de coletor solar e capacidade de armazenamento. As condições de conforto reduzido, regular e bom são representadas pelas vazões de 3, 5 e 8 L/min, respectivamente.

5.3.2 Análise de viabilidade econômica

Os indicadores de viabilidade econômica taxa interna de retorno, valor presente líquido, tempo de retorno de capital e custo da energia conservada, para o aquecedor solar com apoio elétrico, comparativamente ao uso de chuveiro elétrico, são apresentadas nas Figuras 5.1 a 5.4.

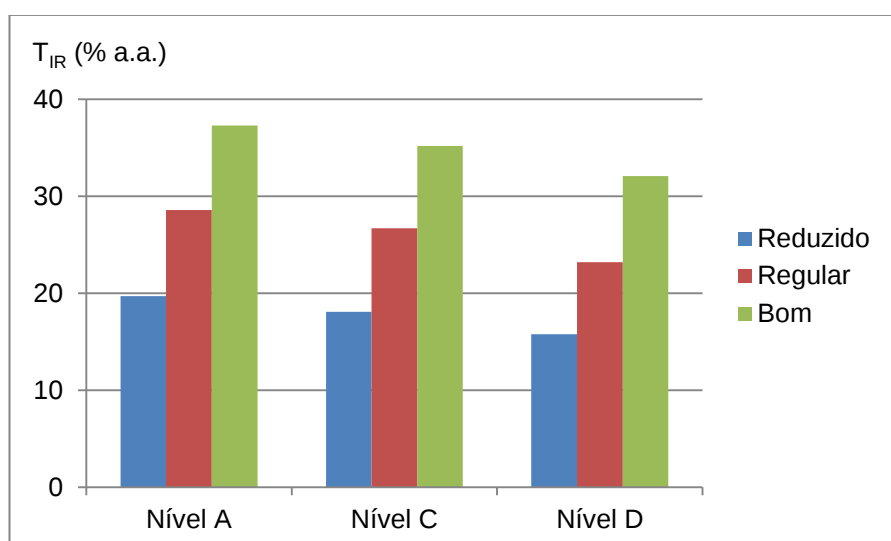


Figura 5.1: Taxa interna de retorno do aquecedor solar para diferentes condições de conforto de banho e níveis de eficiência energética.

Como a T_{IR} calculada para todos os casos foi maior que 8% (taxa mínima de atratividade considerada), a substituição do chuveiro elétrico pelo aquecedor solar com apoio elétrico é economicamente viável. O maior valor da taxa interna de retorno foi obtido para a condição de conforto de banho bom e nível de eficiência energética A (37,3%) e o menor para a condição de conforto reduzido e nível de eficiência energética D (15,8%). A T_{IR} média, considerando todos os casos analisados, foi de 26,3%, ou seja, equivalente a mais que o triplo da taxa mínima de atratividade.

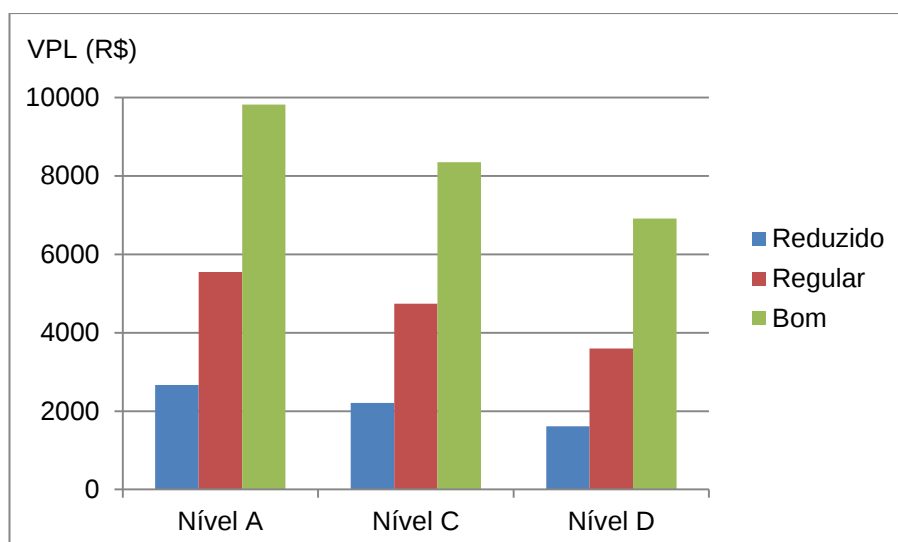


Figura 5.2: Valor presente líquido do aquecedor solar para diferentes condições de conforto de banho e níveis de eficiência energética.

O valor presente líquido médio para os casos analisados foi de R\$ 5.047,00, com variação de R\$ 1.099,00 (conforto reduzido, nível D) a R\$ 9.818,00 (conforto bom, nível A). Comparando o V_{PL} com o custo inicial do aquecedor solar, foi verificado que o caso mais atrativo gerou uma receita equivalente ao triplo do capital inicial investido e o caso menos atrativo, ainda viável, uma receita igual a 50% do custo inicial. Portanto, houve variação significativa do V_{PL} entre os diferentes dimensionamentos analisados.

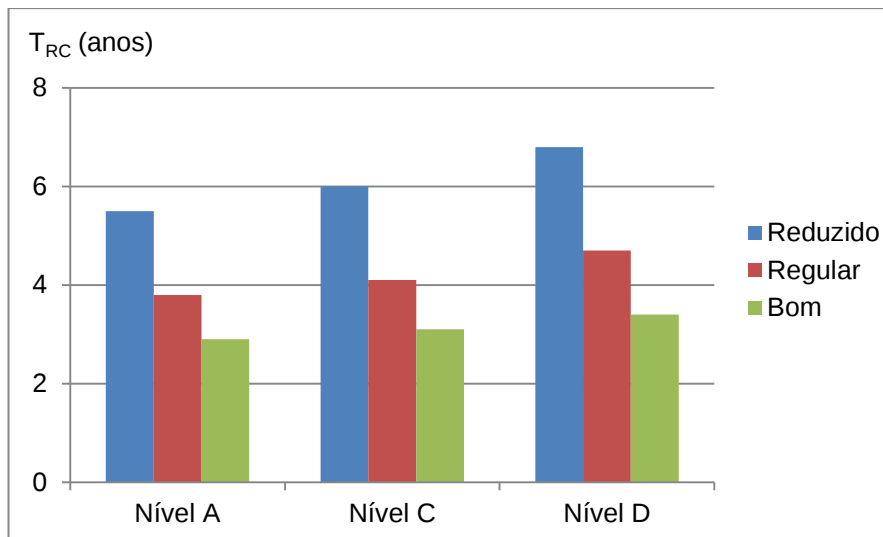


Figura 5.3: Tempo de retorno de capital do aquecedor solar para diferentes condições de conforto de banho e níveis de eficiência energética.

O tempo de retorno de capital médio dos aquecedores solares estudados foi de 4,5 anos. O menor T_{RC} foi encontrado para a condição de conforto bom e nível de eficiência energética A (2,9 anos) e o maior valor para a condição de conforto reduzido e nível de eficiência energética D (6,9 anos). Como foi considerado um horizonte de planejamento de 20 anos, houve recuperação do capital em um tempo máximo correspondente a 35% do ciclo de uso do aquecedor solar.

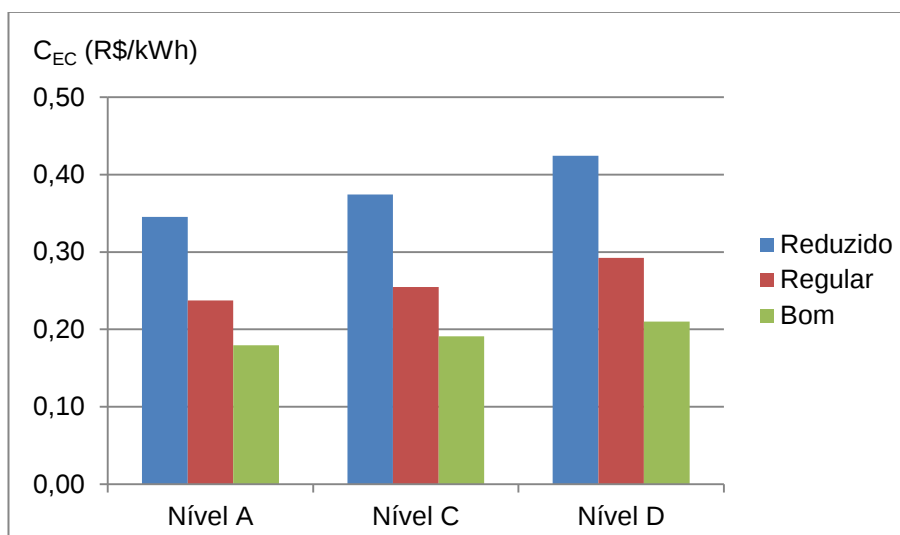


Figura 5.4: Custo da energia conservada do aquecedor solar para diferentes condições de conforto de banho e níveis de eficiência energética.

A análise econômica do aquecedor solar pelo indicador custo da energia conservada também foi viável, uma vez que o C_{EC} foi menor que a

tarifa de energia atualmente paga pelo o setor residencial em Viçosa - MG, igual a R\$ 0,61/kWh. Os valores de C_{EC} oscilaram de R\$ 0,18/kWh (conforto bom e nível de eficiência energética A) a R\$ 0,42/kWh (conforto reduzido e nível de eficiência energética D). O valor médio do indicador custo da energia conservada foi de R\$ 0,28/kWh, menor que metade da atual tarifa de energia elétrica paga pelos consumidores.

Portanto, todos os dimensionamentos do sistema de aquecimento solar de água analisados (três condições de conforto de banho e três níveis de eficiência energética pela certificação brasileira de edifícios residenciais) apresentaram-se economicamente viáveis pelos indicadores econômicos T_{IR} , V_{PL} , T_{RC} e C_{EC} .

Os aquecedores solares dimensionados para atender à condição de conforto bom foram os que apresentaram maior viabilidade econômica, enquanto os dimensionados para a condição de conforto reduzido apresentaram indicadores menos atrativos, mas ainda economicamente viáveis. Isto ocorre devido à maior parcela de água quente atendida por energia solar com elevação do conforto de banho, implicando em maiores custos evitados com energia elétrica pela substituição do chuveiro elétrico por aquecimento solar com apoio elétrico.

Para cada condição de conforto de banho, o caso que apresentou maior atratividade foi o sistema classificado como nível A, seguidos pelos aquecedores solares níveis C e D, respectivamente. Como apresentado no Capítulo 4, o nível de eficiência energética de sistemas de aquecimento solar de água em edifícios residenciais é definido pela fração solar anual, em que, quanto maior a fração solar mais alto o nível de eficiência energética. Desta forma, quanto maior o nível de eficiência, menor a dependência de energia elétrica auxiliar, implicando em melhores indicadores econômicos.

Ressalta-se que o custo de abastecimento e tratamento da água não foi considerado na análise de viabilidade econômica. Analisando apenas o consumo de água, observa-se que o aumento da condição de conforto reduzido a regular e regular a bom gera um excedente de 80 L/dia e 120 L/dia, respectivamente, na demanda de água. Em Viçosa, o custo da água é em torno de R\$ 2,287/m³ para domicílios com consumo total de 15 a 20 m³/mês (SAAE, 2012). Portanto, a elevação da condição de conforto de

banho de reduzido para regular e regular para bom, gera um custo adicional de R\$ 5,49/mês e R\$ 8,64/mês, respectivamente, na conta de água do consumidor.

A viabilidade econômica do aquecedor solar dimensionado para atender à condição de conforto de banho regular foi analisada para valores de fração solar de 10 a 90%. Os indicadores T_{IR} , T_{RC} , V_{PL} e C_{EC} são apresentados nas Figuras 5.5 e 5.6, em função da fração solar anual do sistema.

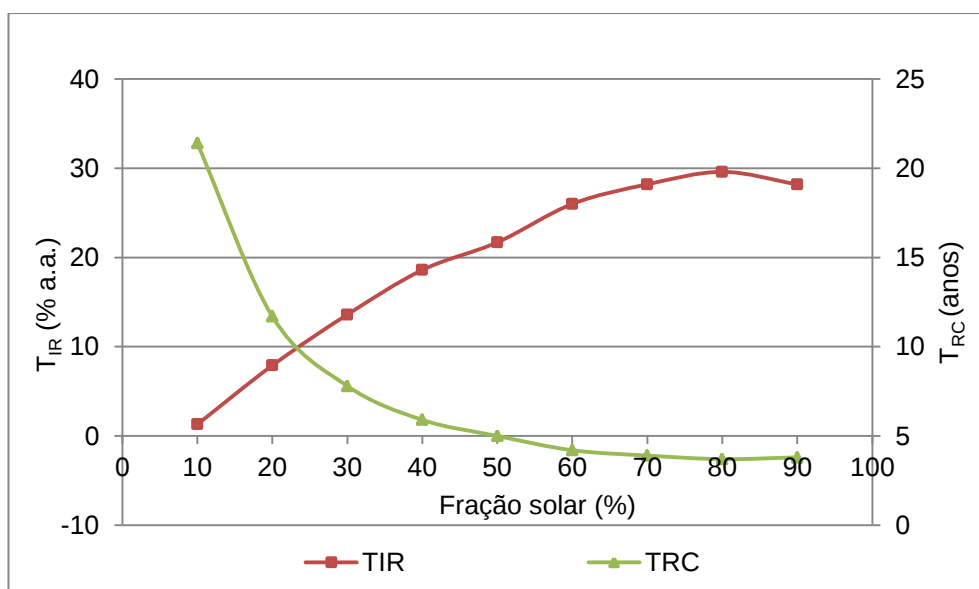


Figura 5.5: Variação dos indicadores T_{IR} e T_{RC} com a fração solar anual.

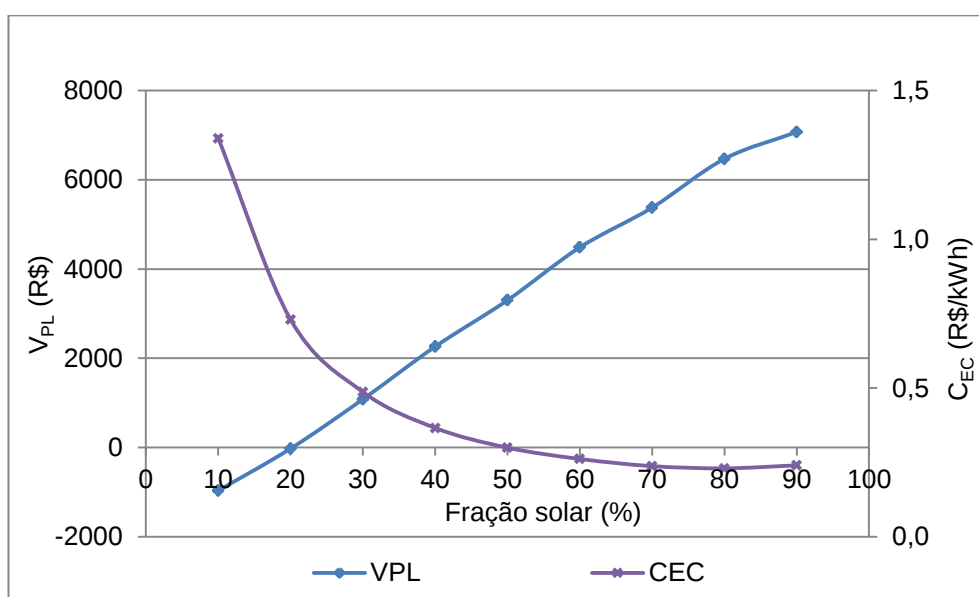


Figura 5.6: Variação dos indicadores V_{PL} e C_{EC} com a fração solar anual.

Pode-se observar nas Figuras 5.5 e 5.6 que os indicadores T_{IR} , T_{RC} e C_{EC} apresentam máxima viabilidade para valores de fração solar anual próximo a 80%. Apesar de o V_{PL} crescer de forma contínua no intervalo de fração solar de 10 a 90%, apresenta menor ganho percentual a partir de frações solares superiores a 80%. Isto ocorre devido ao menor acréscimo de aproveitamento solar por unidade de área de coletor para maiores valores de fração solar anual, como pode ser visto na Figura 5.7.

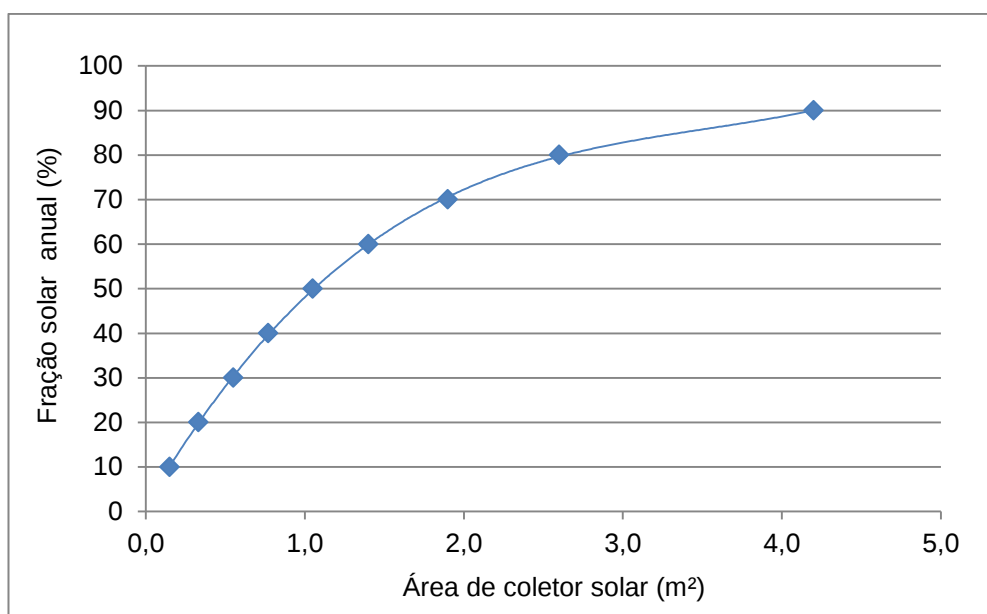


Figura 5.7. Relação entre área de coletor solar e a fração solar anual do sistema.

Portanto, considerando os indicadores econômicos e variáveis técnico-financeiras empregados neste trabalho, pode-se dizer que o pico de viabilidade econômica de aquecedores solares de água ocorre para valores próximos a 80%. Outras pesquisas recentes realizadas no Brasil apontam valores semelhantes ao encontrado neste trabalho, como Coelho (2011), no qual foi verificado que o pico de viabilidade ocorre para frações solares na faixa de 70 a 80%. Todavia, há no Brasil uma tradição em dimensionar sistemas com fração solar igual a 70%, valor este entregue pela NBR 15569 (ABNT, 2008), pela Lei Solar de São Paulo (ABRAVA, 2009) e pela certificação brasileira de eficiência energética de edifícios (BRASIL, 2010).

Foi verificado ainda, nas Figuras 5.5 e 5.6, que a substituição do chuveiro elétrico por aquecedor solar com apoio elétrico torna-se viável para frações solares acima de 30%. Portanto, deve-se evitar o

subdimensionamento de sistemas com frações solares abaixo deste valor, evitando prejuízos financeiros para o consumidor residencial que tenha interesse em adquirir o aquecedor solar. A Lei Solar de São Paulo, por exemplo, recomenda um valor mínimo de 40% no dimensionamento de sistemas de aquecimento solar de água (ABRAVA, 2009).

A viabilidade econômica dos sistemas solares dimensionados conforme as recomendações da NBR 15569 foi superior aos dimensionados no limite dos níveis de eficiência energética A, C e D. Os valores médios dos indicadores, considerando as três condições de conforto, para os aquecedores solares dimensionados no limite A e de acordo com a NBR 15569 são apresentados no Quadro 5.2. Como foi apresentado no Capítulo 4, os sistemas dimensionados conforme a NBR 15569 possuem fração solar média igual a 77%, enquanto os sistemas dimensionados no limite do nível A têm uma fração solar média de 70%.

Quadro 5.2: Indicadores econômicos para o sistema solar dimensionado no limite do nível A e pela NBR 15569

Indicadores econômicos	Limite do nível A	NBR 15569
T_{IR} (% a.a.)	28,50	29,20
T_{RC} (anos)	4,10	3,90
V_{PL} (R\$)	6.012,00	6.427,00
C_{EC} (R\$/kWh)	0,25	0,24

Portanto, o dimensionamento de aquecedores solares de água pela conforme a NBR 15569, de caráter obrigatório por profissionais da área, garante a obtenção do máximo nível de eficiência pela certificação de eficiência energética de edificações residenciais e boa viabilidade econômica, comparativamente ao uso de chuveiro elétrico.

5.3.3 Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade foi realizada para aquecedor solar dimensionado para atender à condição de conforto de banho regular e nível de eficiência energética A. As variações dos indicadores econômicos T_{IR} ,

T_{RC} , V_{PL} e C_{EC} para diferentes cenários técnico-financeiros são apresentadas a seguir.

Custo inicial do aquecedor solar

A variação do custo inicial do aquecedor solar de água (coletores, reservatório térmico, material hidráulico e mão-de-obra para instalação do sistema) modificou todos os indicadores de viabilidade econômica analisados, apresentados no Quadro 5.3. O C_{EC} foi o indicador que sofreu maior alteração, com diferença de, aproximadamente, 80% entre os casos de menor e maior custo do aquecedor solar. Enquanto o V_{PL} foi o indicador que apresentou menor alteração, com diferença máxima de 25%.

Quadro 5.3: Análise de sensibilidade para o custo inicial do aquecedor solar

Variação do custo inicial (%)	-30	-15	<u>0*</u>	15	30
T_{IR} (% a.a.)	40,20	33,40	<u>28,60</u>	24,90	22,10
V_{PL} (R\$)	6.367,26	5.960,26	<u>5.553,00</u>	5.146,26	4.738,26
T_{RC} (anos)	2,70	3,20	<u>3,80</u>	4,40	4,90
C_{EC} (R\$/kWh)	0,17	0,20	<u>0,24</u>	0,27	0,31

*Caso base em negrito sublinhado.

Na Figura 5.8 é apresentado o comportamento dos indicadores econômicos em função da variação do custo inicial do aquecedor solar. O V_{PL} se correlacionou de forma linear com o custo inicial do sistema solar e a T_{IR} , o T_{RC} e o C_{EC} de forma polinomial pelas equações 5.5, 5.6, 5.7 e 5.8, com seus respectivos coeficientes de determinação (R^2).

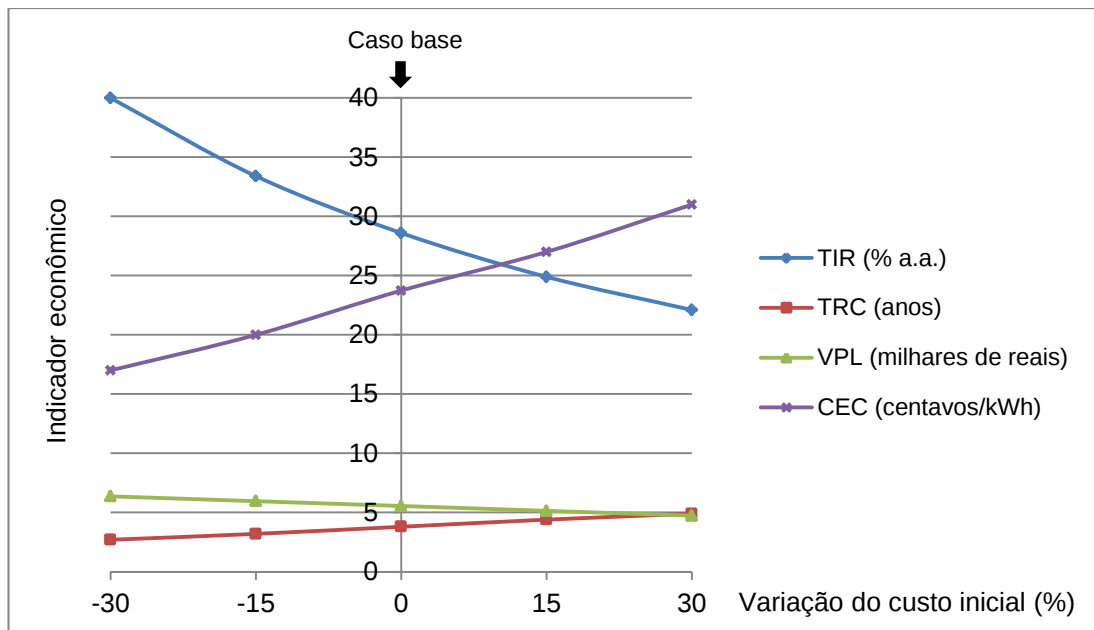


Figura 5.8: Relação entre os indicadores econômicos e o custo inicial do aquecedor solar.

$$y_{TIR} = 0,0028 x^2 - 0,2953 x + 28,5570; R^2 = 0,9996 \quad (5.5)$$

$$y_{VPL} = -0,0271 x + 5,5530; R^2 = 0,9999 \quad (5.6)$$

$$y_{TRC} = 0,0373 x + 3,8000; R^2 = 0,9987 \quad (5.7)$$

$$y_{CEC} = 0,0005 x^2 + 0,2333 x + 23,5290; R^2 = 0,9993 \quad (5.8)$$

em que:

y_{TIR} = Estimador da taxa interna de retorno, % a.a.;

y_{VPL} = Estimador do valor presente líquido, R\$;

y_{TRC} = Estimador do tempo de retorno de capital, anos; e

x = Capital inicial (R\$).

Taxa de desconto

A variação da taxa de desconto modificou diretamente apenas dois indicadores econômicos, o V_{PL} e o C_{EC} , como pode ser visto no Quadro 5.3. O V_{PL} e o C_{EC} sofreram variação máxima de 62% e 82%, respectivamente. Apesar de a T_{IR} permanecer constante, a modificação da taxa de desconto modifica a análise deste indicador, uma vez que a T_{IR} é comparada com a taxa de desconto considerada para o projeto (taxa mínima de atratividade).

O cenário com taxa de desconto igual a 4% foi o que apresentou maior viabilidade econômica, pois faz com que a taxa interna de retorno fica mais distante da taxa mínima de atratividade.

Quadro 5.4: Análise de sensibilidade para a taxa de desconto

Taxa de desconto (% a.a.)	4	6	8*	10	12
T _{IR} (% a.a.)	28,60	28,60	28,60	28,60	28,60
V _{PL} (R\$)	9.004,15	7.056,17	5.553,00	4.377,70	3445,89
T _{RC} (anos)	3,80	3,80	3,80	3,80	3,80
C _{EC} (R\$/kWh)	0,17	0,20	0,24	0,27	0,31

*Caso base em negrito sublinhado.

A variação dos indicadores econômicos em função da taxa de desconto é apresentada na Figura 5.9. Os indicadores T_{IR} e T_{RC} se mantiveram constantes, enquanto o V_{PL} e o C_{EC} se correlacionaram de forma polinomial com a taxa de desconto pelas equações 5.9, 5.10, 5.11 e 5.12, com seus respectivos coeficientes de determinação (R²).

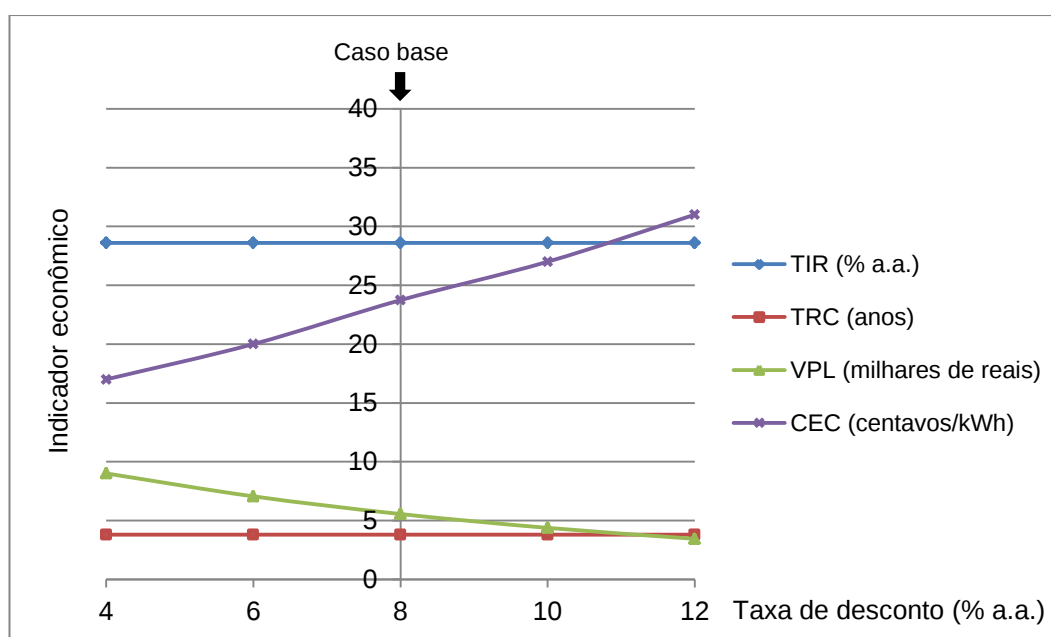


Figura 5.9: Relação entre os indicadores econômicos e a taxa de desconto.

$$y_{T_{IR}} = 26,80 \quad (5.9)$$

$$y_{V_{PL}} = 0,0421 x^2 - 1,3641 x + 13,7660; R^2 = 0,9998 \quad (5.10)$$

$$y_{T_{RC}} = 3,80 \quad (5.11)$$

$$y_{C_{EC}} = 0,0273 x^2 + 1,3136 x + 11,2750; R^2 = 0,9993 \quad (5.12)$$

em que:

- $y_{T_{IR}}$ = Estimador da taxa interna de retorno, % a.a.;
- $y_{V_{PL}}$ = Estimador do valor presente líquido, R\$;
- $y_{T_{RC}}$ = Estimador do tempo de retorno de capital, anos; e
- x = Taxa de desconto, % a.a.

Tarifa de energia elétrica

Assim como o custo inicial, a variação da tarifa de energia elétrica alterou todos os indicadores de viabilidade econômica analisados, os valores são apresentados no Quadro 5.5. O V_{PL} foi o indicador mais sensível à variação da tarifa de energia, com alteração máxima de 200%. Apesar de o C_{EC} permanecer constante, a variação da tarifa de energia elétrica afeta a análise deste indicador, pois o C_{EC} é comparado com o valor da tarifa de energia. Quanto maior a tarifa de energia elétrica, mais viável economicamente é a substituição do chuveiro elétrico por aquecedor solar (cenário correspondente à tarifa igual a 0,81 R\$/kWh).

Quadro 5.5: Análise de sensibilidade para a tarifa de energia elétrica

Tarifa de energia elétrica (R\$/kWh)	0,41	0,51	<u>0,61*</u>	0,71	0,81
T_{IR} (% a.a.)	19,10	23,80	<u>28,60</u>	32,90	37,30
V_{PL} (R\$)	2.812,93	4.161,21	<u>5.553,00</u>	6.857,76	8.206,03
T_{RC} (anos)	5,70	4,60	<u>3,80</u>	3,30	2,90
C_{EC} (R\$/kWh)	0,24	0,24	<u>0,24</u>	0,24	0,24

*Caso base em negrito sublinhado.

Na Figura 5.10 é apresentado o comportamento dos indicadores econômicos em função da tarifa de energia elétrica. O C_{EC} manteve-se constante e os demais indicadores se correlacionaram de forma polinomial com a tarifa de energia elétrica, pelas equações 5.13, 5.14, 5.15 e 5.16, com seus respectivos coeficientes de determinação (R^2).

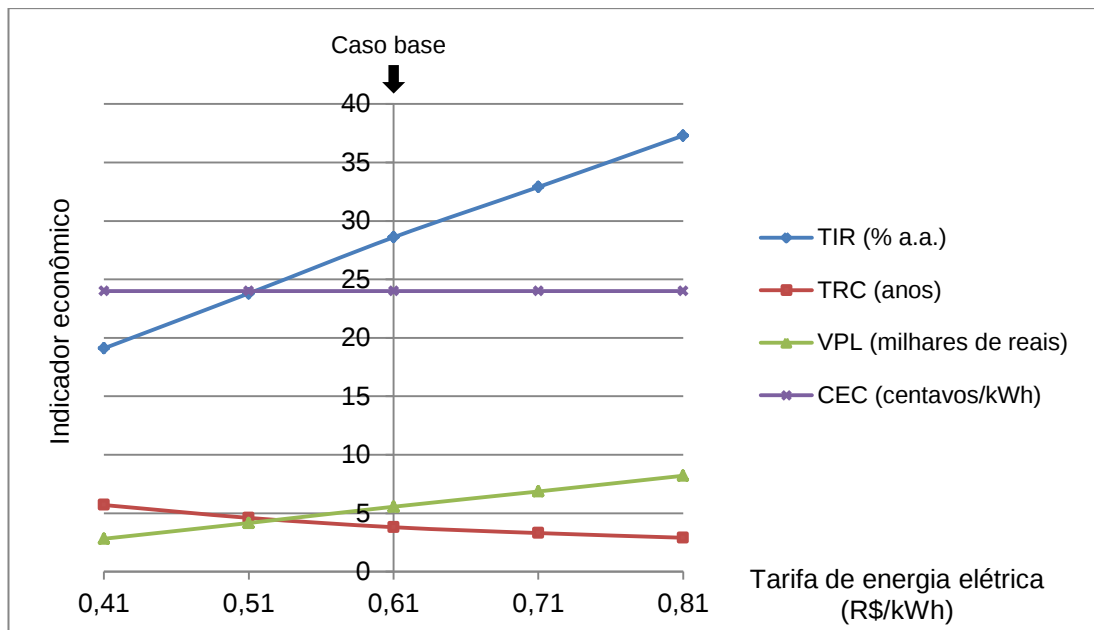


Figura 5.10: Relação entre os indicadores econômicos e a tarifa de energia elétrica.

$$y_{TIR} = 45,5000 x + 0,5850; R^2 = 0,9995 \quad (5.13)$$

$$y_{VPL} = 13,4830 x - 2,7063; R^2 = 0,9999 \quad (5.14)$$

$$y_{TRC} = 12,1430 x^2 - 21,7140 x + 12,5450; R^2 = 0,9991 \quad (5.15)$$

$$y_{CEC} = 24,00 \quad (5.16)$$

em que:

y_{TIR} = Estimador da taxa interna de retorno, % a.a.;

y_{VPL} = Estimador do valor presente líquido, R\$;

y_{TRC} = Estimador do tempo de retorno de capital, anos; e

x = Tarifa de energia elétrica, R\$/kWh.

Reajuste da tarifa de energia elétrica

A variação dos indicadores econômicos em função da modificação do reajuste da tarifa de energia elétrica é apresentada no Quadro 5.6. O reajuste da tarifa afetou apenas a T_{IR} e o V_{PL} , os quais sofreram variação máxima de 20 e 66%, respectivamente. O V_{PL} apresentou um acréscimo de, aproximadamente, R\$ 700,00 para cada um 1% de reajuste. A T_{RC} e o C_{EC}

não sofreram variação por não considerarem o reajuste da tarifa de energia elétrica em seu cálculo, somente o valor da tarifa.

Quadro 5.6: Análise de sensibilidade para o reajuste da tarifa de energia elétrica

Reajuste da energia (% a.a.)	0	1	<u>2*</u>	3	4
T _{IR} (% a.a.)	26,00	27,30	<u>28,60</u>	28,90	31,10
V _{PL} (R\$)	4.295,11	4.890,00	<u>5.553,00</u>	6.293,87	7.121,97
T _{RC} (anos)	3,80	3,80	<u>3,80</u>	3,80	3,80
C _{EC} (R\$/kWh)	0,24	0,24	<u>0,24</u>	0,24	0,24

*Caso base em negrito sublinhado.

A alteração dos indicadores econômicos em função da variação do reajuste da tarifa de energia elétrica é apresentada na Figura 5.11. O T_{RC} e o C_{EC} são constantes e a T_{IR} e o V_{PL} se correlaciona de forma polinomial com o reajuste da tarifa de energia pelas equações 5.17, 5.18, 5.19 e 5.20, com seus respectivos coeficientes de determinação (R²).

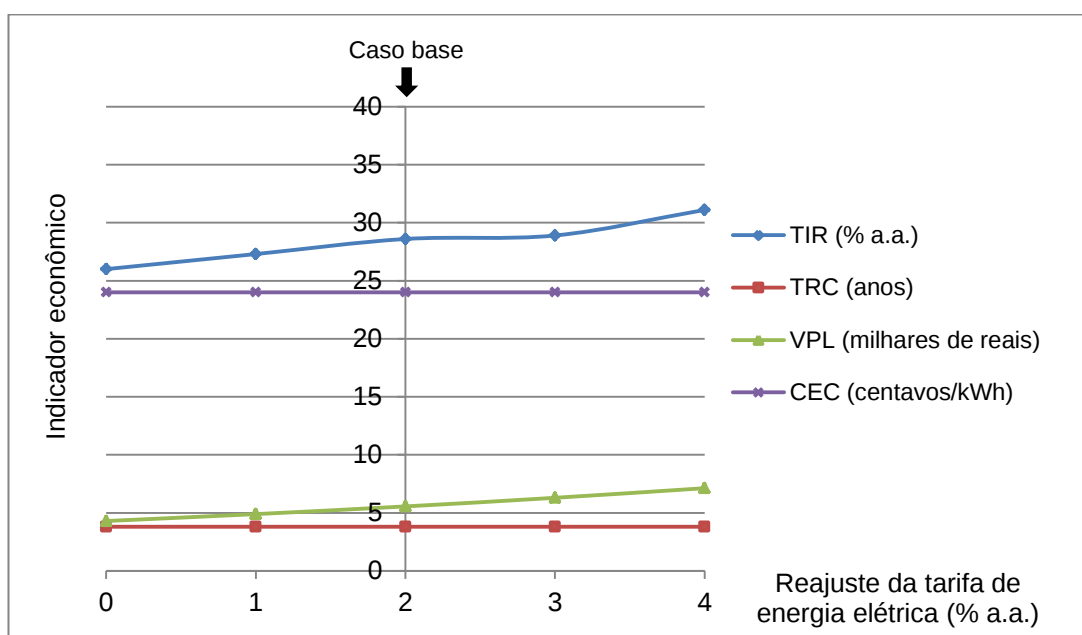


Figura 5.11: Relação entre os indicadores econômicos e o reajuste da energia elétrica

$$y_{TIR} = 0,1583 x^3 - 0,8929 x^2 + 2,3131 x + 24,9440; R^2 = 0,9851 \quad (5.17)$$

$$y_{VPL} = 0,7058 x + 4,2193; R^2 = 0,9958 \quad (5.18)$$

$$y_{TRC} = 3,80 \quad (5.19)$$

$$y_{CEC} = 24,00 \quad (5.20)$$

em que:

- y_{TIR} = Estimador da taxa interna de retorno, % a.a.;
- y_{VPL} = Estimador do valor presente líquido, R\$;
- y_{TRC} = Estimador do tempo de retorno de capital, anos; e
- x = Reajuste da tarifa de energia elétrica, R\$ a.a.

Horizonte de planejamento do aquecedor solar

A variação do horizonte de planejamento do sistema modificou de forma direta os indicadores T_{IR} , V_{PL} e C_{EC} , apresentados no Quadro 5.7. Entre estes, o V_{PL} foi o parâmetro mais sensível, com quase triplicação de seu valor na faixa de horizonte de planejamento estudada. O ciclo de vida do aquecedor solar interfere na análise do T_{RC} de forma indireta, pois, quanto maior o horizonte de planejamento, mais viável economicamente é a substituição do chuveiro elétrico por aquecedor solar.

Quadro 5.7: Análise de sensibilidade para o horizonte de planejamento do aquecedor solar

Horizonte de planejamento (anos)	10	15	<u>20*</u>	25	30
T_{IR} (% a.a.)	25,40	27,90	<u>28,60</u>	28,70	28,80
V_{PL} (R\$)	2.569,48	4.273,12	<u>5.553,00</u>	6.515,19	7.238,00
T_{RC} (anos)	3,80	3,80	<u>3,80</u>	3,80	3,80
C_{EC} (R\$/kWh)	0,35	0,27	<u>0,24</u>	0,22	0,21

*Caso base em negrito sublinhado.

O comportamento dos indicadores econômicos em função do horizonte de planejamento do sistema solar é apresentado na Figura 5.12. O T_{RC} foi mantido constante e os demais indicadores se correlacionaram de forma polinomial com o horizonte de planejamento pelas equações 5.21, 5.22, 5.23 e 5.24, com seus respectivos coeficientes de determinação (R^2).

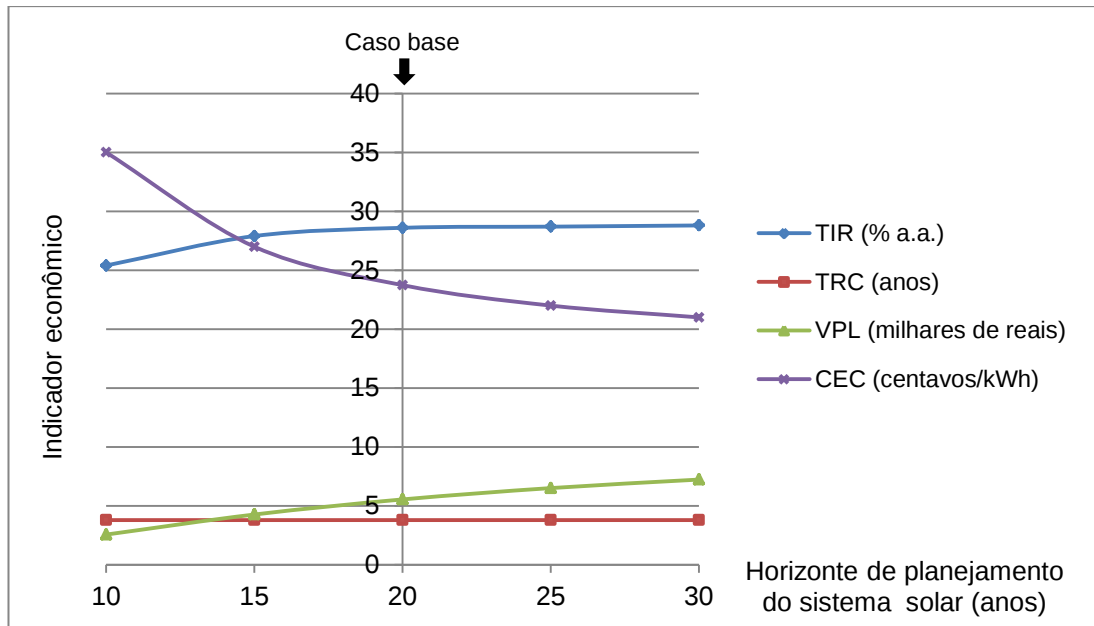


Figura 5.12: Relação entre os indicadores econômicos e o horizonte de planejamento do sistema solar.

$$y_{TIR} = 0,0012 x^3 - 0,0874 x^2 + 2,1071 x + 11,8800; R^2 = 0,9994 \quad (5.21)$$

$$y_{VPL} = - 0,0065 x^2 + 0,4921 x - 1,6812; R^2 = 0,9998 \quad (5.22)$$

$$y_{TRC} = 3,80 \quad (5.23)$$

$$y_{CEC} = - 0,0027 x^3 + 0,2044 x^2 - 5,4079 x + 71,275; R^2 = 0,9993 \quad (5.24)$$

em que:

- y_{TIR} = Estimador da taxa interna de retorno, % a.a.;
- y_{VPL} = Estimador do valor presente líquido, R\$;
- y_{TRC} = Estimador do tempo de retorno de capital, anos; e
- x = Horizonte de planejamento do sistema solar, anos.

De acordo com os resultados apresentados nos Quadros 5.3 a 5.12, apenas a T_{IR} e o V_{PL} foram sensíveis de forma direta ou indireta à variação de todos os parâmetros técnicos ou financeiros analisados. Portanto, recomenda-se o uso destes indicadores em estudos de análise de viabilidade econômica de aquecedores solares de água. Todavia, o T_{RC} e o C_{EC} são indicadores interessantes, pois permitem uma avaliação temporal e energética, o que aumenta as possibilidades de análise quando empregados conjuntamente com os indicadores V_{PL} e T_{IR} . No Quadro 5.8 é apresentado

estado de sensibilidade dos indicadores T_{IR} , T_{RC} , V_{PL} e C_{EC} aos parâmetros técnico-financeiros analisados anteriormente.

Quadro 5.8. Sensibilidade dos indicadores econômicos aos parâmetros técnico-financeiros

Indicadores econômicos	Capital inicial	Taxa de desconto	Tarifa de energia	Reajuste da energia	Horizonte de planejamento
T_{IR}	SD	SI	SD	SD	SD
T_{RC}	SD	NS	SD	NS	SD
V_{PL}	SD	SD	SD	SD	SD
C_{EC}	SD	SD	SI	NS	SD

Nota: Sensível diretamente (SD), sensível indiretamente (SI) e não sensível (NS).

A análise de sensibilidade gerou informações que possibilitaram a obtenção de equações que representam a tendência dos indicadores econômicos em função de parâmetros técnico-financeiros do sistema solar. Portanto, as equações 5.5 a 5.24 podem ser utilizadas para encontrar os indicadores T_{IR} , V_{PL} , T_{RC} e C_{EC} para valores contidos nos cenários técnico e financeiro estudados neste trabalho.

Observa-se que nenhum dos cenários técnico-financeiros propostos na análise de sensibilidade inviabilizou a substituição do chuveiro elétrico por aquecedor solar com apoio elétrico. De forma que não foram obtidos valores de T_{IR} menor que 8% a.a., T_{RC} maior que 20 anos, C_{EC} maior que R\$ 0,61/kWh ou V_{PL} menor que zero. Portanto, o uso de aquecedores solares de água é atualmente viável no Brasil e continuará a ser, mesmo que alguns fatores técnicos ou financeiros determinantes para esta condição, como capital inicial para aquisição do aquecedor solar ou valor da tarifa de energia elétrica, sofram certas modificações futuras.

Deve ser ressaltado que fatores externos que favoreceriam o uso do aquecimento solar comparado ao elétrico não foram contabilizados no estudo de viabilidade econômica, dentre eles: diminuição de emissão de gases de efeito estufa; maior sustentabilidade local, regional e nacional; diminuição de investimentos em geração, transmissão e distribuição de energia elétrica e melhoria da classificação de eficiência energética de edificações residenciais pelo Programa Brasileiro de Etiquetagem.

Portanto, políticas governamentais de investimento em geração de energia elétrica devem ser tratadas em conjunto com políticas de

conservação de energia, para que se justifiquem investimentos no setor de aquecimento solar de água no país.

5.4 CONCLUSÃO

A substituição de chuveiro elétrico por aquecedor solar com apoio elétrico para diferentes condições de conforto de banho e níveis de eficiência energética pela certificação brasileira de edifícios residenciais mostrou-se economicamente viável. Os aquecedores solares dimensionados para atender melhores condições de conforto de banho e maiores níveis de eficiência energética foram os que apresentaram melhores indicadores econômicos.

Foi verificado que a substituição do chuveiro elétrico por aquecedor solar apresenta ponto de máxima viabilidade econômica quando os sistemas possuem fração solar anual próximo a 80%. Os indicadores T_{IR} , T_{RC} , V_{PL} e C_{EC} apresentaram valores médios de 26% a.a., 4,5 anos, R\$ 5.047,00 e R\$ 0,28/kWh, respectivamente, considerando as três condições de conforto e os três níveis de eficiência energética.

O dimensionamento de aquecedores solares de água conforme as recomendações da NBR 15569, de caráter obrigatório por profissionais da área, garante a obtenção do máximo nível de eficiência pela certificação de eficiência energética de edificações residenciais e boa viabilidade econômica, comparativamente ao uso de chuveiro elétrico.

A substituição de chuveiro elétrico por sistema solar permaneceu economicamente viável para os diversos cenários propostos na análise de sensibilidade. Portanto, o uso de aquecedores solares de água é, atualmente, viável no Brasil e continuará a ser, mesmo que fatores determinantes desta condição sofram certas modificações futuras.

5.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. **Manual para Elaboração do Programa de Eficiência Energética**. Brasília: ANEEL, 2008.

ANEEL - Agência Nacional de Energia. **Reajuste Tarifário Anual**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=95>>. Acesso em 16 nov. 2011.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15569**: Sistema de Aquecimento Solar de Água em Circuito Elétrico Direto - Projeto e Instalação. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

ABRAVA - Associação Brasileira de Refrigeração, Ar-Condicionado, Ventilação e Aquecimento. **Guia de Parametrização da Lei Solar de São Paulo**. São Paulo, 2009. Disponível em: <<http://www.abrinstal.com.br/abrin.asp?area=30&id=436>>. Acesso em: 10 jul. 2010.

BRASIL. Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial. **Portaria 449, de 25 de novembro de 2010**. Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Residenciais. Rio de Janeiro: INMETRO, 2010.

CASSARD, H.; DENHOLM, P. ONG, S. Technical and economic performance of residential solar water heating in the United States. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Golden, v. 15, n. 8, p. 3789-3800, 2011.

CEMIG - Companhia Energética de Minas Gerais. **Tarifa de energia elétrica - Setor residencial**. Viçosa: CEMIG, 2011.

CTEC - CANMET Energy Technology Centre. **Manual programa RETScreen International**. Varennes: CTEC, 2005. 108 p.

COELHO, D. M. **Identificação de variáveis críticas e simulação do uso de coletores solares em prédios residências**. 2011. 125 p. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, 2011.

CRAWFORD, R. H.; TRELOAR, G. J. Net energy analysis of solar and conventional domestic hot water systems in Melbourne, Australia. **Solar Energy**, Tampa, v. 76, n.1, p. 159-163, 2004.

ELETROBRAS - Centrais Elétricas Brasileiras S.A.. **Pesquisa de posse de equipamentos e hábitos de uso**: Ano base 2005 - Classe residencial. Relatório Brasil. Rio de Janeiro: ELETROBRAS/PROCEL, 2007.

HERMSDORFF, W. **Proposta de gerenciamento para redução da demanda de energia elétrica**. 2001. 116 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2001.

IPEA - Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. **Série histórica da Inflação IGP-M**: período 1990-2010. Disponível em: <<http://www.ipeadata.gov.br/>>. Acesso em: 15 nov. 2011.

KALOGIROU, S. Thermal performance, economic and environmental life cycle analysis of thermosiphon solar water heaters. **Solar Energy**, Tampa, v. 83, n. 1, p. 39-48, 2009.

MARTINAITIS, V.; ROGOZZA, A.; BIKMANIENE, I. Criterion to evaluate the "twofold benefit" of the renovation of buildings and their elements. **Energy and Buildings**, Oxford, v. 36, n.1, p. 3-8, 2004.

NOGUEIRA, L. A. H. Uso racional: a fonte energética oculta. **Estudos avançados**, São Paulo, v. 21, n. 59, p. 91-105, 2007.

OLIVEIRA, L. F. C.; FERREIRA, R. C.; ALMEIDA, R. A.; LOBATO, E. J. V.; MEDEIROS, A. M. M. Potencial de redução do consumo de energia elétrica pela utilização de aquecedores solares no estado de Goiás. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 28, n. 3, p. 406-416, 2008.

SAAE - Serviço Autônomo de Água e Esgoto de Viçosa. Tarifas. Disponível em: <http://www.saaevicosa.com.br/portal/?page_id=20>. Acesso em: 05 mai. 2012.

TANABE, C. S. **Viabilidade da análise exergética na elaboração de tarifas de energia elétrica**. 1998. 72 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1998.

VARELLA, F. K. O. M. **Tecnologia solar residencial: inserção de aquecedores solares de água no distrito de Barão Geraldo - Campinas**. 2004. 136 p. Dissertação (Mestrado em Planejamento de Sistemas Energéticos) - Universidade Estadual de Campinas, SP, 2004.

6. IMPACTOS AMBIENTAIS DO USO DE AQUECEDORES SOLARES DE ÁGUA EM HABITAÇÕES

Resumo

As emissões de gases de efeito estufa sofreram aumento de mais de 36% nos últimos 20 anos. Entre as principais fontes antropogênicas de emissões, encontram-se o setor de abastecimento de energia, as indústrias, os transportes e as edificações. O objetivo neste capítulo foi investigar o potencial de redução de emissões de gases de efeito estufa pelo emprego de aquecedores solares de água em residências brasileiras. Foi utilizado um método de cálculo de emissões de gases de efeito estufa desenvolvido pelo governo do Canadá, em parceria com o Programa Ambiental das Nações Unidas e com o Fundo Protótipo de Carbono do Banco Mundial. Uma residência típica brasileira com sistema de aquecimento solar de água deixa de emitir, aproximadamente, 95 e 256 kgCO₂equivalente/ano, comparado ao uso de chuveiro elétrico e aquecedor a gás, respectivamente. Foi verificado, ainda, que o setor residencial brasileiro deixa de emitir, atualmente, 96.511 kgCO₂equivalente/ano pelo uso de aquecedores solares de água. Já o potencial de redução de emissões por substituição de aquecimento elétrico e a gás por solar é de aproximadamente 4,73 tCO₂equivalente/ano e 1,02 tCO₂equivalente/ano, respectivamente. Portanto, o Brasil emite mais de cinco milhões de toneladas de dióxido de carbono ao ano proveniente de aquecimento de água em residências. Tal valor tende a crescer futuramente caso não haja aumento na participação de fontes renováveis na oferta interna de energia elétrica e, ou, no uso de alternativas energéticas descentralizadas, como a energia solar térmica.

Palavras-chave: energia solar, aquecimento de água, emissões de gases de efeito estufa, sustentabilidade

6.1 INTRODUÇÃO

As emissões de gases de efeito estufa sofreram um acréscimo de mais 36% no período de 1992 a 2008 (UNEP, 2011). Em 2009, aproximadamente, 75% das emissões foram geradas em 15 países: China, Estados Unidos, Índia, Rússia, Japão, Alemanha, Canadá, Coreia do Sul, Irã, Reino Unido, Arábia Saudita, África do Sul, México, Brasil e Austrália, nesta ordem (EIA, 2012).

Entre as principais fontes antropogênicas de emissões de gases de efeito estufa estão o setor de abastecimento de energia, as indústrias e o desmatamento de florestas, os quais somados são responsáveis por mais de 60% das emissões de dióxido de carbono. Os edifícios residenciais e comerciais respondem por cerca de 8% das emissões mundiais. A participação de diferentes setores nas emissões de gases de efeito estufa globais é apresentada na Figura 6.1 (IPCC, 2007).

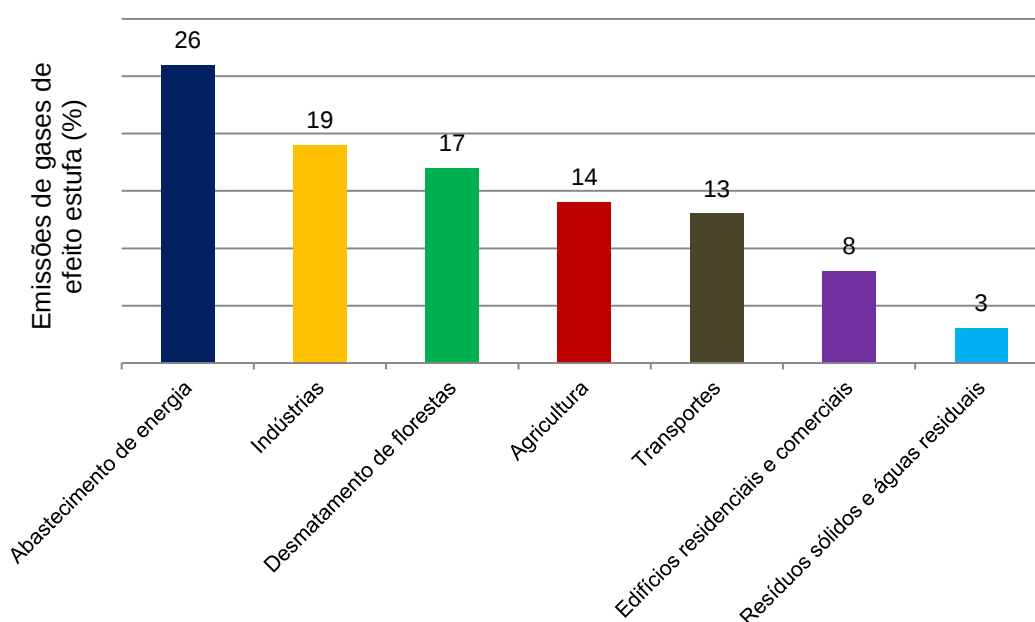


Figura 6.1: Participação de diferentes setores nas emissões globais de gases de efeito estufa.

Fonte: (IPCC, 2007).

Em edifícios residenciais, o aquecimento de água é um dos principais usos finais de energia, tornando esta atividade uma importante fonte de emissões de gases de efeito estufa. Por esta razão, muitos países têm

incentivado o uso de aquecedores solares de água para reduzir as emissões provenientes de residências. Entre tais países estão Alemanha, Espanha, Grécia, Dinamarca, Turquia, Estados Unidos e Japão (MARTINS; PEREIRA, 2011; CETIN; EGRICAN, 2011).

A Grécia, por exemplo, deixou de emitir 1,67 milhões de toneladas de dióxido de carbono pelo uso de aquecedores solares de água residenciais em 2000. Tal quantia excedeu em 75,8% a meta definida pelo programa grego de mudanças climáticas para o setor residencial naquele ano (TSILINGIRIDIS; MARTINOPOULOS, 2010). A Ilha de Chipre, pertencente à Turquia e à Grécia, obteve o recorde mundial de aquecedores solares de água em 2003, com um sistema instalado para cada 3,7 habitantes, evitando a emissão de 160.000 toneladas de gás carbônico por ano (KALOGIROU, 2009).

A exploração de fontes renováveis, incluindo a energia solar térmica e fotovoltaica, é uma medida promissora para mitigar as atuais emissões de gases de efeito estufa, principalmente em países fortemente dependentes de combustíveis fósseis (KALOGIROU, 2009). Em países com geração predominantemente hidráulica, como o Brasil, o uso expressivo de energia solar pode retardar a necessidade de construção de usinas geradoras de energia elétrica (OLIVEIRA *et al.*, 2008). Entre os principais problemas associados às grandes centrais hidrelétricas podem ser citados: expulsão de populações ribeirinhas; perda de terrenos agricultáveis; e danos à diversidade de flora e fauna da região (JUNK; MELLO, 1990).

O objetivo neste capítulo foi investigar o potencial de redução de emissões de gases de efeito estufa por meio da substituição de sistema de aquecimento convencional de água por aquecedores solares em uma residência típica brasileira. Também foi estimado o potencial total de redução de emissões pelo setor residencial brasileiro e por outros países.

6.2 MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho foi realizado no Laboratório de Energia do Departamento de Engenharia Agrícola e no Laboratório de Tecnologias em

Conforto Ambiental e Eficiência Energética do Departamento de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais.

6.2.1 Modelos analisados

A análise de emissões de gases de efeito estufa pelo sistema de aquecimento de água da residência típica brasileira foi realizada para as 12 configurações de sistemas dimensionados no Capítulo 4:

- i. Três condições de conforto de banho (reduzido, regular e bom) para três classificações de nível de eficiência energética certificação brasileira de edifícios residenciais (A, C e D) (BRASIL, 2010); e
- ii. Um dimensionamento utilizando a metodologia apresentada na norma brasileira de referência sobre aquecimento solar de água, NBR 15569 (ABNT, 2008), para cada condição de conforto de banho.

Detalhes sobre a residência, a demanda de água quente e o dimensionamento dos aquecedores solares estão presente no Capítulo 4. Como apresentado em tal capítulo, a metodologia de classificação do sistema de aquecimento solar de água da certificação brasileira de edifícios residenciais impossibilita a obtenção direta do nível de eficiência energética B, ou seja, um sistema somente será classificado como nível B por rebaixamento de nível A para B, devido o não cumprimento dos pré-requisitos do nível A. Por isto, as análises realizadas neste capítulo não abordam sistemas com classificação nível B pela certificação brasileira de edifícios residenciais.

6.2.2 Metodologia de cálculo de emissões de gases de efeito estufa

As emissões de gases de efeito estufa (GEE) foram calculadas utilizando o programa *RETScreen International*. A metodologia utilizada por esta ferramenta foi desenvolvido pelo Departamento de Recursos Naturais do Canadá, em colaboração com o Programa Ambiental das Nações Unidas

(UNEP) e o Fundo Protótipo de Carbono do Banco Mundial (PCF) (CTEC, 2005).

Neste método, as emissões de gases de efeito estufa são contabilizadas na forma de dióxido de carbono equivalente. As emissões de outros gases são convertidas em emissões de dióxido de carbono de acordo com seu potencial de aquecimento global (PAG). Valores de PAG calculados para vários gases pelo Painel Internacional sobre Mudanças Climáticas (IPCC) estão incorporados no programa *RETScreen International* (CTEC, 2005).

A redução de emissões de gases de efeito estufa é calculada pelo uso da Equação 6.1.

$$\Delta GEE = GEE_{base} - GEE_{proposto} \quad (6.1)$$

em que:

$$\begin{aligned} \Delta GEE &= \text{Redução de emissões de GEE, tCO}_2\text{equivalente/ano;} \\ GEE_{base} &= \text{Emissões de GEE geradas pelo caso base, tCO}_2\text{equivalente/ano; e} \\ GEE_{proposto} &= \text{Emissões de GEE geradas pelo caso proposto, tCO}_2\text{equivalente/ano.} \end{aligned}$$

Neste trabalho, o caso base é representado pelo uso de chuveiro elétrico ou aquecedor a gás, e o caso proposto corresponde ao aquecedor solar com apoio elétrico. As emissões geradas pelo caso base e pelo caso proposto são calculadas pelas Equações 6.2 e 6.3, respectivamente.

$$GEE_{base} = e_{elet} E_{base} \quad (6.2)$$

em que:

$$\begin{aligned} GEE_{base} &= \text{Emissões de GEE geradas pelo caso base, tCO}_2\text{equivalente/ano;} \\ e_{elet} &= \text{Fator de emissão de GEE para geração de energia} \end{aligned}$$

elétrica, tCO₂equivalente/MWh; e

$$E_{\text{base}} = \text{Consumo de energia elétrica do caso base, MWh/ano.}$$

$$GEE_{\text{proposto}} = e_{\text{elet}} E_{\text{proposto}} \quad (6.3)$$

em que:

GEE_{proposto} = Emissões de GEE geradas pelo caso proposto, tCO₂equivalente/ano;

E_{elet} = Fator de emissão de GEE para geração de energia elétrica, tCO₂equivalente/MWh; e

E_{proposto} = Consumo de energia elétrica do caso proposto, MWh/ano.

Os fatores de emissão presentes nas equações 6.2 e 6.3 são calculados pela Equação 6.4.

$$e = (e_{\text{CO}_2} \text{PAG}_{\text{CO}_2} + e_{\text{CH}_4} \text{PAG}_{\text{CH}_4} + e_{\text{N}_2\text{O}} \text{PAG}_{\text{N}_2\text{O}}) \left(\frac{1}{\eta} \right) \quad (6.4)$$

em que:

e = Fator de emissão de GEE, tCO₂equivalente /MWh;

e_{CO_2} = Fator de emissão de dióxido de carbono, tCO₂ /MWh;

e_{CH_4} = Fator de emissão de metano, tCH₄/MWh;

$e_{\text{N}_2\text{O}}$ = Fator de emissão de óxido nitroso, tN₂O/MWh;

PAG_{CO_2} = Potencial de aquecimento global dióxido de carbono, adimensional;

PAG_{CH_4} = Potencial de aquecimento global do metano, adimensional;

$\text{PAG}_{\text{N}_2\text{O}}$ = Potencial de aquecimento global do óxido nitroso, adimensional; e

η = Rendimento de conversão energética, adimensional.

O programa *RETScreen International* possui um banco de dados com fatores de emissões de gases de efeito estufa de diversas fontes

energéticas, diferenciadas por país. A diferenciação por local é importante, principalmente quando são empregadas fontes energéticas secundárias, porque os fatores de emissões de GEE podem variar bastante conforme a matéria-prima e os métodos de transformação. Por exemplo, o fator de emissão de gases de efeito estufa presente no banco de dados do programa para energia elétrica é de 0,082 tCO₂/MWh e de 0,544 tCO₂/MWh para Brasil e Estados Unidos, respectivamente (CTEC, 2005).

Anualmente, o Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) calcula o valor do fator de emissões de gases de efeito estufa para geração de energia elétrica pelo sistema elétrico brasileiro. Os últimos fatores de emissão de GEE publicados pelo MCTI são apresentados no Quadro 6.1.

Quadro 6.1: Fator de emissão de gases de efeito estufa do sistema elétrico brasileiro

Ano base	Fator de emissão de gases de efeito estufa (tCO ₂ /MWh)
2006	0,081
2007	0,077
2008	0,146
2009	0,079
2010	0,140
2011	0,106

Fonte: (MCTI, 2012).

Portanto, o valor presente no banco de dados do *RETSscreen International* para geração de energia elétrica no Brasil (0,082 tCO₂/MWh), o qual será empregado no cálculo de emissões de gases de efeito estufa nesta pesquisa, está de acordo com os calculados pelo MCTI nos últimos anos.

Apesar de vários gases estarem associados ao mecanismo de efeito estufa, incluindo dióxido de carbono, metano, óxido nitroso, clorofluorcarbonetos e hidrofluorcarbonetos, apenas os três primeiros são considerados no cálculo de emissões de GEE do programa *RETSscreen International*, devido à grande participação destes gases nas emissões mundiais (CTEC, 2005). Os potenciais de aquecimento global adotados pelo programa são apresentados no Quadro 6.2.

Quadro 6.2: Potencial de aquecimento global de gases de efeito estufa

Gás de efeito estufa	Potencial de aquecimento global (adimensional)
Dióxido de carbono	1
Metano	21
Óxido nitroso	30

Fonte: CTEC (2005).

6.2.3 Premissas de cálculo de emissões de gases de efeito estufa para residência típica brasileira e setor residencial nacional

Por meio da aplicação do programa *RETScreen International*, foram calculadas as emissões de gases de efeito estufa pela opção de aquecimento solar com apoio (*backup*) elétrico e chuveiro elétrico para as diferentes condições de conforto de banho e níveis de eficiência energética pela certificação brasileira de edifícios residenciais. Também foi calculado o valor de emissões de GEE caso a residência típica possuísse sistema de aquecimento de água a gás.

A partir do cálculo das emissões evitadas para a residência típica brasileira, foram estimadas as emissões atualmente evitadas pelo setor residencial e seu potencial total de redução, representado pela substituição de chuveiros elétricos e aquecedores a gás por aquecedores solares. O número de residências brasileiras com sistema de aquecimento elétrico, solar e a gás foi estimado com base em informações levantadas pela Eletrobras (2007), pela ABRAVA (2008) e pelo IBGE (2010).

Segundo dados obtidos pela Pesquisa de Posse de Equipamentos e Hábitos do PROCEL (ELETROBRAS, 2007), em 2005, a participação de diferentes fontes em sistemas de aquecimento de água em residências brasileiras estava dividido como apresentado na Figura 6.2.

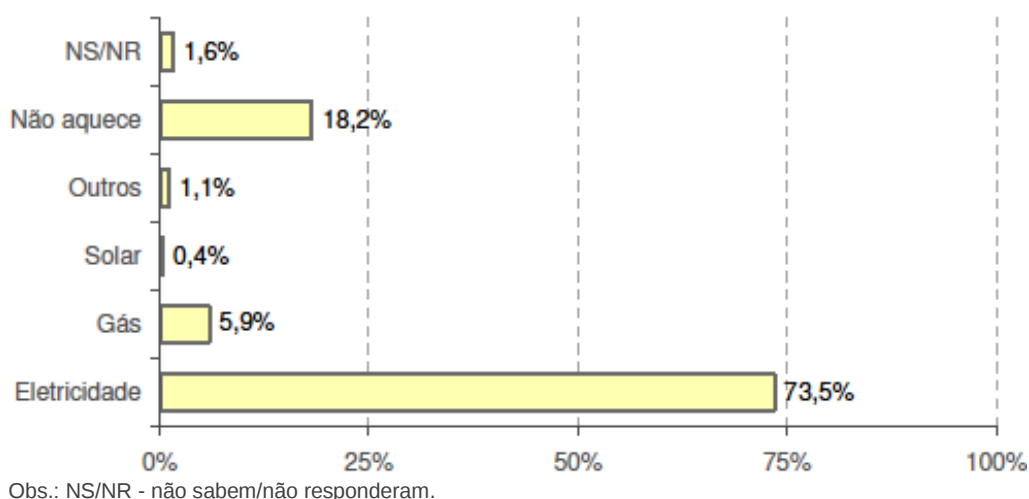


Figura 6.2: Fontes energéticas utilizadas para aquecimento de água no setor residencial brasileiro.
Fonte: (ELETROBRÁS, 2007).

De acordo com a Associação Brasileira de Refrigeração, Ar Condicionado, Ventilação e Aquecimento, houve, nos últimos anos, um crescimento do uso de aquecedores solares de água no país, verificando-se que, em 2008 aproximadamente 1,5% dos domicílios brasileiros possuíam aquecedores solares de água (ABRAVA, 2008).

Na falta de dados mais atuais sobre a participação do uso de aquecimento elétrico e a gás no país, neste trabalho, foi considerado que 73,5% das residências brasileiras utilizam aquecimento elétrico de água (ELETROBRAS, 2007), 5,9% a gás (ELETROBRAS, 2007) e 1,5% solar (ABRAVA, 2008).

Segundo os dados preliminares do último Censo Demográfico (IBGE, 2010), ano base 2009, o Brasil possui 67.557.424 domicílios. Aplicando a participação dos sistemas de aquecimento elétrico, a gás e solar de água considerada no parágrafo anterior, pode-se dizer que o país possui, aproximadamente, 49.654.707 residências atendidas por aquecimento elétrico, 3.985.888 por aquecimento a gás e 1.013.361 por aquecimento solar, respectivamente.

6.2.4 Premissas de cálculo de emissões de gases de efeito estufa para residências em outros países

O estudo de emissões de gases de efeito estufa provenientes de sistemas de aquecimento de água residenciais também foi realizado considerando a matriz energética dos cinco maiores emissores mundiais: China, Estados Unidos, Índia, Rússia e Japão (EIA, 2012). Na análise de emissões de GEE para estes países foi considerado o sistema de aquecimento solar dimensionado para a condição de conforto de banho regular e nível de eficiência energética A pela certificação brasileira de edifícios residenciais. Pesquisas realizadas em outros países empregam parâmetros semelhantes aos adotados neste trabalho: domicílios com ocupação de quatro pessoas; demanda diária de água para banho entre 200 e 300 litros; e temperatura da água para uso em torno de 40°C (CASSARD *et al.*, 2011; HAN *et al.*, 2011; DHARUMAN *et al.*, 2006). Este fato permitiu realizar comparações entre as emissões de GEE provenientes de sistemas de aquecimento de água em residências no Brasil e nos países selecionados.

O programa *RETScreen International* possui, em seu banco de dados, os fatores de emissão de gases de efeito estufa referentes ao uso de energia elétrica para China, Estados Unidos, Índia, Rússia e Japão, além de Brasil, os quais serão utilizados nesta análise (CTEC, 2005). A participação de diferentes fontes na matriz energética brasileira, e dos demais países citados anteriormente, é apresentada na Figura 6.3. Com exceção do Brasil, os países presentes na Figura 6.3 possuem grande dependência de petróleo, carvão mineral e gás natural, implicando em altos fatores de emissão de GEE. Os fatores de emissão de gases de efeito estufa provenientes do uso de energia elétrica na China, Estados Unidos, Índia, Rússia e Japão é de 0,845; 0,544; 0,933; 0,333 e 0,416 tCO₂/MWh, respectivamente, enquanto para o Brasil é de 0,082 tCO₂/MWh.

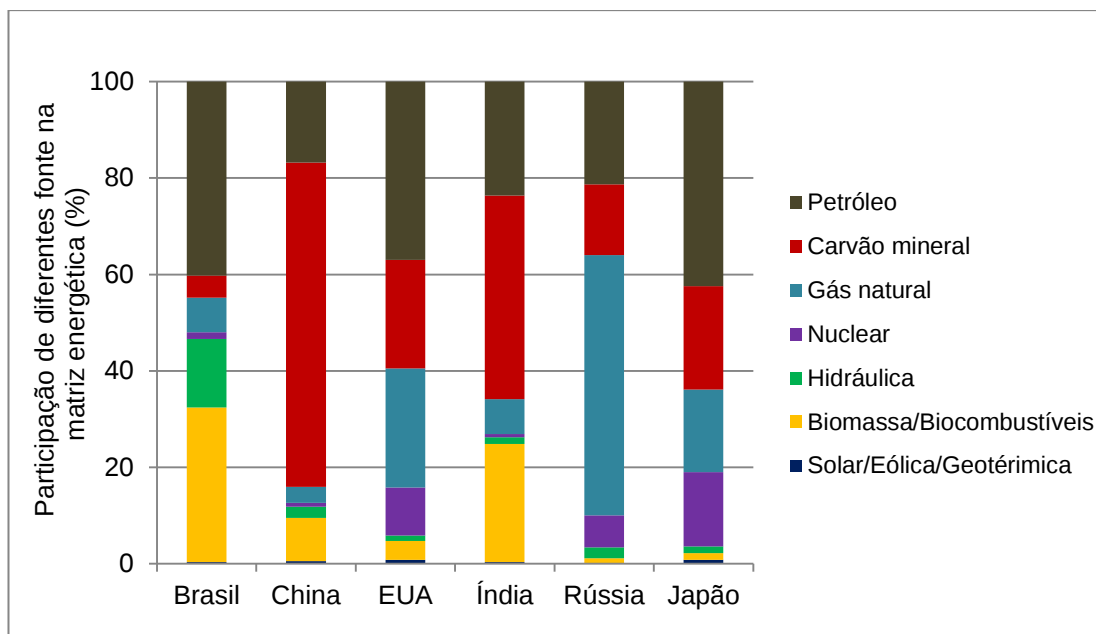


Figura 6.3: Matriz energética de diversos países para o ano de 2009.
Fonte: (EIA, 2012).

6.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.3.1 Emissões de gases de efeito estufa pela residência típica brasileira

As emissões de gases de efeito estufa evitadas pela substituição de chuveiro elétrico por aquecedor solar com apoio elétrico, para diferentes condições de conforto de banho e níveis de eficiência energética pela certificação brasileira de edifícios residenciais, são apresentadas no Quadro 6.3, assim como dos sistemas dimensionados conforme a metodologia apresentada na NBR 15569.

Quadro 6.3: Emissões de GEE evitadas pelo uso de aquecedor solar de água em uma residência típica brasileira, em kgCO₂equivalente/ano

Classificação/Conforto	Reduzido	Regular	Bom
NBR 15569	63,4	99,6	159,1
Nível A	58,1	95,2	150,0
Nível C	52,7	84,2	130,8
Nível D	45,1	69,4	112,2

As emissões de gases de efeito estufa evitadas pelos sistemas de aquecimento solar dimensionados pela NBR 15569 foram superiores aos dimensionados nos limites dos níveis de eficiência energética A, C e D. Isto ocorre devido à maior fração solar anual dos aquecedores dimensionados pela norma, os quais possuem menor demanda de energia elétrica auxiliar e, por consequência, emitem menores quantidades de GEE. Como apresentado no Capítulo 4, os sistemas dimensionados de acordo com as recomendações da NBR 15569 apresentam fração solar anual média de 77%, enquanto os aquecedores solares no limite da condição de eficiência energética nível A, possuem uma fração solar média de 70%.

Os valores médios das emissões de gases de efeito estufa evitadas pela substituição de chuveiro elétrico por aquecedor solar foram de 52 kgCO₂equivalente/ano, 83 kgCO₂equivalente/ano e 131 kgCO₂equivalente/ano para as condições de conforto reduzido, regular e bom, respectivamente. Analisando as emissões por nível de eficiência energética, foram obtidos os valores médios de 76 kgCO₂equivalente/ano, 89 kgCO₂equivalente/ano e 103 kgCO₂equivalente/ano, para os níveis D, C e A, respectivamente. A variação das emissões de GEE em função da condição de conforto de banho e do nível de eficiência energética pode ser vista mais claramente na Figura 6.4.

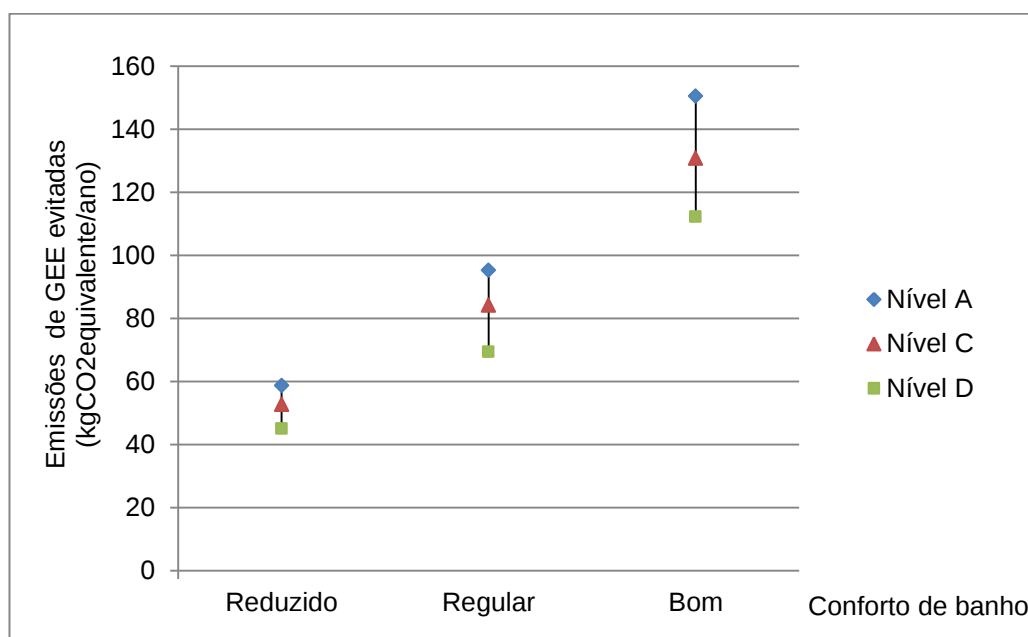


Figura 6.4: Emissões de GEE evitadas para diferentes condições de conforto de banho e nível de eficiência energética.

Houve maior variação das emissões de gases de efeito estufa evitadas em função do nível de eficiência energética (linha vertical marcada na Figura 6.4) para melhores condições de conforto de banho. A razão está ligada à demanda de água quente para atender a cada condição de conforto, o aumento da fração solar para sistemas com grandes vazões evita que maior quantidade de GEE seja emitida à atmosfera, comparativamente ao aquecimento elétrico.

O consumo de água é outra questão muito discutida no atual contexto ambiental. De acordo com a Organização Mundial da Saúde (OMS), cada pessoa necessita de 50 a 100 litros de água potável por dia para atender às necessidades básicas de consumo e higiene (WHO, 2012). As condições de conforto de banho reduzido, regular e bom geram um consumo correspondente a 30%, 50% e 80%, respectivamente, do consumo de água máximo recomendado pela OMS.

O sistema dimensionado para atender à condição de conforto foi simulado para atender frações solares anuais de 0 a 100%, em intervalos de 10%. Os valores obtidos, em dióxido de carbono equivalente ao ano, para as frações solares com suas respectivas áreas de coletor solar, são apresentados na Figura 6.5.

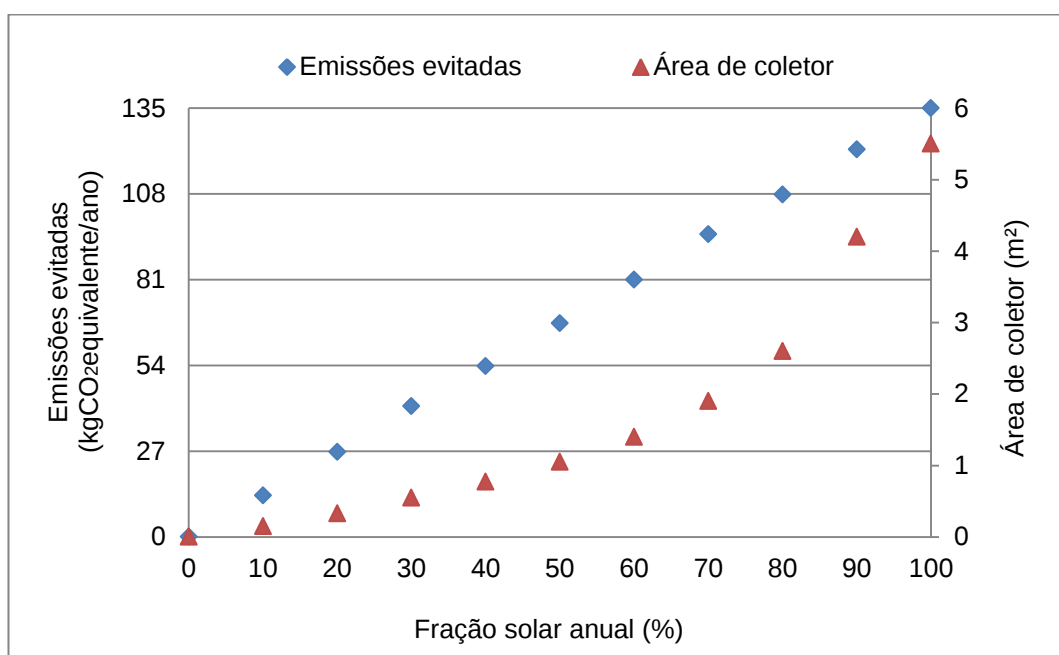


Figura 6.5: Emissões de GEE evitadas pelo uso de aquecedor solar para diferentes frações solares para as condições climáticas de Viçosa-MG, com suas respectivas áreas de captação solar.

O aumento da fração solar anual do sistema provocou um acréscimo linear nas emissões evitadas de dióxido de carbono. Já a área de coletor solar necessária para atender estas frações variou de forma exponencial. As emissões de GEE evitadas também podem ser analisadas exclusivamente por metro quadrado (m^2) de coletor. Para isso, é necessário investigar o aquecedor quando este atende a fração solar anual de 100%, pois neste caso não há emissões geradas pelo sistema de energia elétrica auxiliar. Analisando tal situação, foi verificado que um metro quadrado do coletor empregado nesta pesquisa sobre as condições climáticas de Viçosa - MG evita a emissão de 24,5 kgCO₂equivalente/ano.

O sistema de aquecimento solar dimensionado para atender à condição de conforto regular e nível de eficiência energética A também foi utilizado para analisar as emissões de GEE comparativamente ao uso de aquecedor a gás. A substituição de chuveiro elétrico por aquecedor solar com apoio elétrico evita a emissão de 95,2 kgCO₂equivalente/ano, e a substituição do aquecedor a gás por solar com apoio elétrico evita a emissão de 256,2 kgCO₂equivalente/ano. Portanto, o sistema de aquecimento a gás gera quase o triplo de emissões de GEE comparado ao chuveiro elétrico. Isto se deve ao maior fator de emissões do gás natural (0,179 tCO₂equivalente/MWh) comparado ao fator de emissões da energia elétrica pelo sistema elétrico nacional (0,082 tCO₂equivalente/MWh).

6.3.2 Emissões de gases de efeito estufa pelo setor residencial brasileiro

A partir do cálculo das emissões de gases de efeito estufa evitadas pelo uso de aquecedores solares de água para atender à residência típica brasileira, foi possível estimar o potencial de redução de GEE pelo setor residencial brasileiro. O sistema solar dimensionado para atender à condição de conforto regular e nível de eficiência energética A foi utilizado para calcular as emissões atualmente evitadas e o potencial total de redução de emissões pelo setor residencial, representado pela substituição de chuveiros elétricos e de aquecedores a gás por aquecedores solar. Os valores obtidos,

em milhões de toneladas de dióxido de carbono equivalente por ano, são apresentados na Figura 6.6.

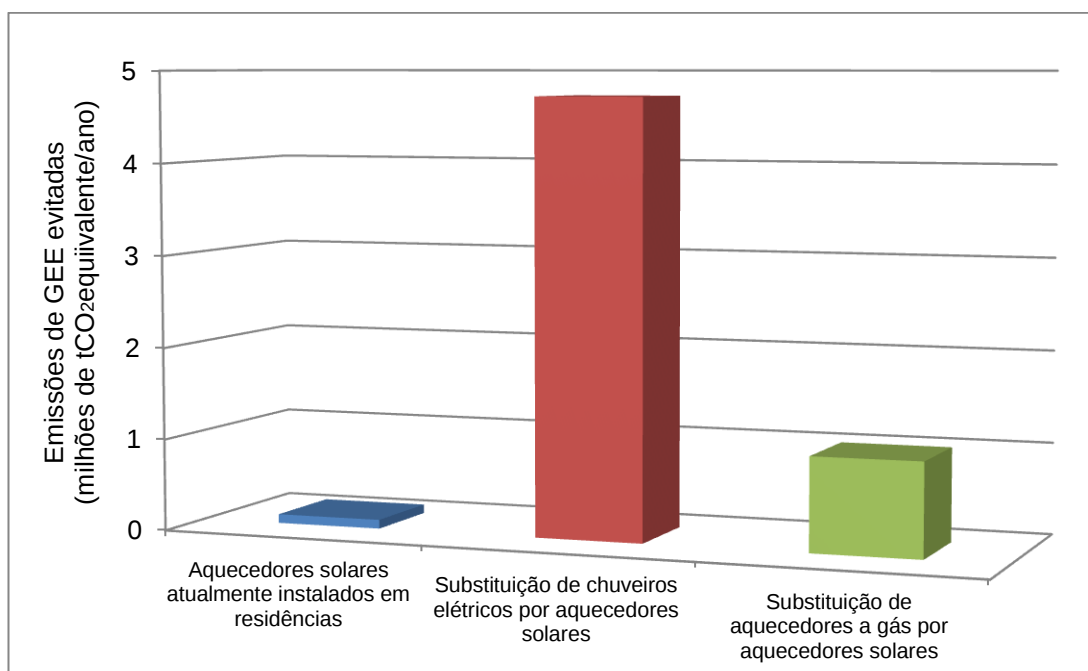


Figura 6.6: Emissões de GEE evitadas por aquecedores solares de água em instalados atualmente em residências brasileiras e por substituição de aquecimento elétrico e a gás por solar.

Como apresentado na Figura 6.6, as emissões de gases de efeito estufa atualmente evitadas pelo uso de aquecedor solar de água em residências brasileiras foram estimadas em aproximadamente 96.511 kgCO₂equivalente/ano (0,09 tCO₂equivalente/ano). A substituição de chuveiros elétricos e aquecedores a gás por aquecedores solares evitariam a emissão de 4.729.046 (4,73 tCO₂equivalente/ano) 1.021.093 kgCO₂equivalente/ano (1,02 tCO₂equivalente/ano), respectivamente. Portanto, o Brasil emite atualmente, aproximadamente, 5,75 milhões de toneladas de dióxido de carbono por ano proveniente de sistemas de aquecimento de água em residências. Tal valor tende a aumentar futuramente caso não haja aumento na participação de energias renováveis na oferta interna de energia elétrica e/ou uso de alternativas energéticas descentralizadas, como a energia solar térmica.

Comparando o potencial de redução de emissões de gases de efeito estufa pelo uso de aquecedores solares em residências encontrados neste trabalho com dados nacionais de emissões de GEE e de consumo de

energia elétrica, é possível realizar observações interessantes. No Quadro 6.4 é apresentada a estimativa da participação de emissões proveniente de sistemas de aquecimento de água convencional (chuveiros elétricos e aquecedores a gás) nas emissões totais do setor residencial brasileiro. No Quadro 6.5 é apresentada a estimativa da participação de emissões de GEE proveniente de chuveiros elétricos nas emissões totais do setor residencial brasileiro.

Quadro 6.4: Participação de emissões de GEE por chuveiros elétricos e aquecedores a gás em residências brasileiras

Emissões brasileiras de GEE (tCO ₂ equivalente/ano) ¹	420,0
Porcentagem de emissões de GEE provenientes de edifícios residenciais e comerciais (%) ²	8,0
Porcentagem de emissões de GEE provenientes de edifícios residenciais (%) ³	4,0
Emissões de GEE provenientes de residências brasileiras (tCO ₂ equivalente/ano) ⁴	16,80
Emissões de GEE geradas pelo uso de chuveiros elétricos e aquecedores solares de água em residências brasileiras (tCO ₂ equivalente/ano) ⁵	5,8
Participação de chuveiros elétricos e aquecedores a gás de água nas emissões totais de GEE provenientes de residências brasileiras (%) ⁶	34,5

¹Fonte: (EIA, 2012); ²Fonte: (IPCC, 2007); ³Foi considerado que metade das emissões é proveniente de cada tipo de edificação; ⁴Linha 1 x Linha 3; ⁵Estimado nesta pesquisa; e ⁶Linha 5 / Linha 4.

Quadro 6.5: Participação de emissões de GEE por chuveiros elétricos em residências brasileiras

Emissões brasileiras de GEE (tCO ₂ equivalente/ano) ¹	420,0
Porcentagem de emissões de GEE provenientes de edifícios residenciais e comerciais (%) ²	8,0
Porcentagem de emissões de GEE provenientes de edifícios residenciais (%) ³	4,0
Emissões de GEE provenientes de residências brasileiras (tCO ₂ equivalente/ano) ⁴	16,8
Emissões de GEE geradas pelo uso de chuveiros elétricos em residências brasileiras (tCO ₂ equivalente/ano) ⁵	4,7
Participação de chuveiros elétricos nas emissões totais de GEE provenientes de residências brasileiras (%) ⁶	27,9
Participação de chuveiros elétricos no consumo de energia elétrica em residências brasileiras (%) ⁷	24,0

¹Fonte: (EIA, 2012); ²Fonte: (IPCC, 2007); ³Foi considerado que metade das emissões é proveniente de cada tipo de edificação; ⁴Linha 1 x Linha 3; ⁵Estimado nesta pesquisa; ⁶Linha 5 / Linha 4; e ⁷Fonte: (ELETROBRAS, 2007).

Conforme o cálculo apresentado no Quadro 6.4, estima-se que as emissões provenientes de sistemas de aquecimento convencional de água (elétrico e a gás) representam, aproximadamente, 34,5% do total das emissões do setor residencial brasileiro. Refazendo o mesmo cálculo considerando apenas os chuveiros elétricos (Quadro 6.5), observa-se que esta opção de aquecimento representa 27,9% do total das emissões do setor residencial brasileiro, valor este condizente com a participação do chuveiro elétrico no consumo de energia elétrica no setor residencial, igual a 24% (ELETROBRAS, 2007).

O programa *RETScreen International* possibilita a conversão das emissões de gases de efeito estufa em outras formas comparativas de uso de energia e medidas de mitigação. O programa possui uma série de fatores de conversão, calculados por comitês internacionais de mudanças climáticas (CTEC, 2005). No Quadro 6.6, são apresentadas as emissões atualmente evitadas por aquecimento de água em residências brasileiras e o potencial de redução do setor residencial, representado pela substituição de chuveiros elétricos e aquecedores a gás por aquecedores solares, convertidas em outras formas equivalentes.

Quadro 6.6: Medidas de mitigação de emissões de GEE equivalentes ao uso de aquecedores solares em residências brasileiras

Equivalências de emissões anuais evitadas	Aquecimento solar de água atual	Substituição de aquecimento elétrico por solar	Substituição de aquecimento a gás por solar
Barris de petróleo bruto não consumidos anualmente	224.444	10.997.812	2.374.637
Litros de gasolina não utilizados anualmente	41.468.090	2.031.945.024	438.735.671
Hectares de floresta absorvendo dióxido de carbono anualmente	8.877	434.951	93.914
Toneladas de lixo reciclado anualmente	33.280	1.630.710	352.101

Observa-se que as equivalências de emissões de GEE apresentadas no Quadro 6.6 são dependentes de certos parâmetros que pode variar bastante por país. Os equivalentes “petróleo” e “gasolina” dependem do tipo de matéria-prima e dos processos de transformação. Já os equivalentes

“área de floresta” e “lixo reciclado” dependem da diversidade da biomassa e da composição dos resíduos, respectivamente. Apesar de existir a possibilidade de não representarem com boa precisão a situação de um país específico, o cálculo destes equivalentes facilita compreender a extensão da poluição gerada por uma determinada atividade, neste caso, o uso de sistemas de aquecimento de água em residências.

6.3.3 Emissões de gases de efeito estufa para outros países

As emissões de gases de efeito estufa evitadas pela substituição de chuveiro elétrico por aquecedor solar para a residência unifamiliar estudada, para o Brasil e os cinco maiores emissores mundiais de GEE são apresentadas na Figura 6.7.

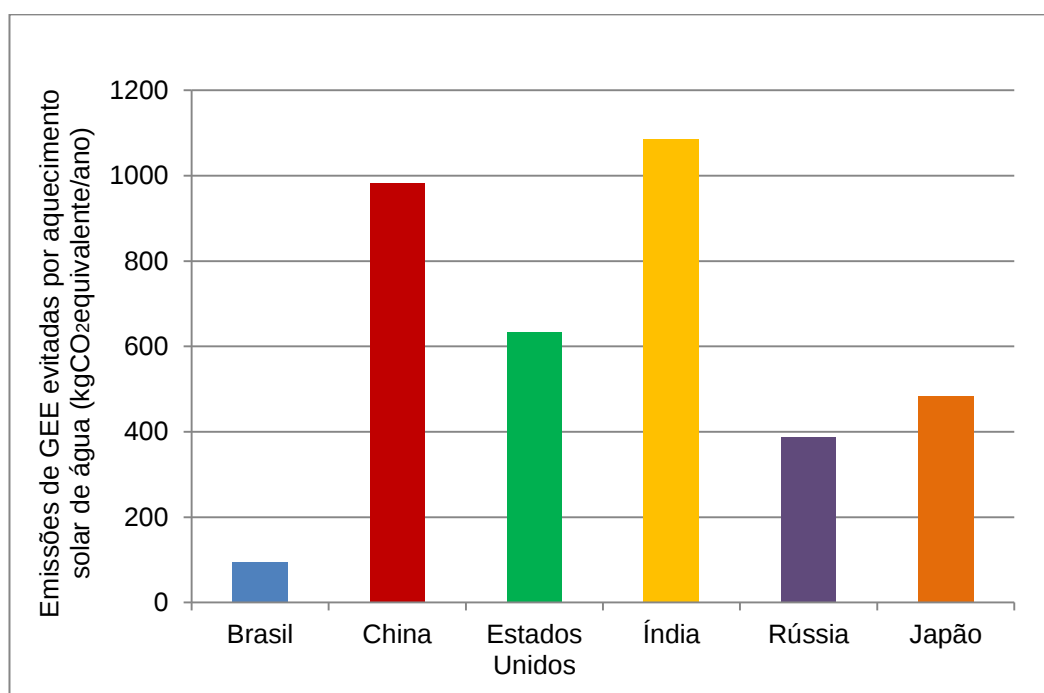


Figura 6.7: Emissões de GEE evitadas pela substituição de aquecimento elétrico por solar em uma residência unifamiliar em países selecionados.

A grande participação de fontes renováveis na matriz energética nacional faz com que o Brasil tenha um menor potencial de redução de gases de efeito estufa pela substituição de chuveiro elétrico por aquecedor solar, comparada aos demais países apresentados na Figura 6.7. Os valores

de emissões de GEE evitadas por uso de aquecedores solares de água em residências na China, Estados Unidos, Índia, Rússia e Japão foram equivalentes a cerca de 10, 7, 11, 4 e 5 vezes ao do Brasil, respectivamente.

Os maiores valores de dióxido de carbono emitidos pela Índia e China podem ser explicados pela maior participação de carvão mineral na matriz energética destes países (Figura 6.3). O carvão mineral possui fator de emissão de GEE maior que outras fontes não renováveis, como petróleo e gás natural.

Portanto, o valor das emissões de gases de efeito estufa provenientes de sistemas de aquecimento de água em residências brasileiras, estimadas em 5,75 milhões tCO₂equivalente/ano, poderia ser muito superior, caso o Brasil possuísse maior participação de combustíveis fósseis em sua matriz energética.

Apesar de o potencial de redução de emissões de gases de efeito estufa por substituição de sistemas de aquecimento de água convencionais por aquecedores solares em residências no Brasil ser menor comparado aos outros países analisados, deve-se ressaltar que a expansão do uso de tecnologias solares possui benefícios ambientais externos à redução de emissões de GEE. Em países fortemente dependentes de geração hidrelétrica, a popularização do uso de aquecedores solares de água em habitações pode reduzir o consumo de energia elétrica e o pico da curva de carga do setor residencial, retardando a necessidade de construção de novas usinas. Apesar de ser considerada uma fonte energética renovável, a hidroeletricidade gera impactos ambientais negativos, decorrentes do alagamento de grandes áreas e da modificação da hidrologia do curso d'água.

6.4 CONCLUSÃO

O uso de aquecedores solares de água em residências tem o potencial de contribuir para a redução das emissões de gases de efeito estufa, visto a importância das edificações nas emissões globais. Para a residência típica brasileira, o valor médio de emissões de GEE evitadas pela substituição de

chuveiro elétrico por aquecedor solar foi de 52 kgCO₂equivalente/ano, 83 kgCO₂equivalente/ano e 131 kgCO₂equivalente/ano para as condições de conforto reduzido, regular e bom, respectivamente. Analisando as emissões por nível de eficiência energética, foram obtidos os valores médios de 76 kgCO₂equivalente/ano, 89 e kgCO₂equivalente/ano 103 kgCO₂equivalente/ano para os níveis D, C e A, respectivamente.

As emissões atualmente evitadas pelo setor residencial brasileiro foram estimadas em 96.511 kgCO₂equivalente/ano e o potencial total de redução, representado pela substituição de chuveiros elétricos e aquecedores a gás por aquecedores solares, em 4.729.046 kgCO₂equivalente/ano e 1.021.093 tCO₂equivalente/ano, respectivamente. Portanto, o Brasil emite atualmente mais de cinco milhões de toneladas de dióxido de carbono ao ano por uso de sistemas de aquecimento de água em residências. Este valor tende a aumentar futuramente, caso não haja aumento na participação de energias renováveis na oferta interna de energia elétrica e, ou, no uso de alternativas energéticas descentralizadas, como a energia solar térmica.

Em países com matriz energética com grande participação de combustíveis fósseis, o potencial de redução de emissões de gases de efeito estufa por substituição de sistemas de aquecimento elétrico por solar pode chegar a 10 vezes ao caso brasileiro, como China e Índia. Todavia, do ponto de vista ambiental, é importante incentivar a popularização do uso de aquecedores solares no Brasil, não somente com foco na redução de emissões de GEE, mas também visando outros impactos positivos associados ao uso de fontes de energias renováveis.

6.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15569**: Sistema de Aquecimento Solar de Água em Circuito Elétrico Direto - Projeto e Instalação. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

ABRAVA - Associação Brasileira de Refrigeração, Ar Condicionado, Ventilação e Aquecimento. **Mercado brasileiro de aquecimento solar, ano de 2008**. Disponível em: <
<http://www.abrava.com.br/default.asp?Canal=8&OperId=1744&Channel=Tm90JiMyMzc7Y2lhcw==>>. Acesso em: 22 abr. 2012.

BRASIL. Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial. **Portaria 449, de 25 de novembro de 2010**. Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Residenciais. Rio de Janeiro: INMETRO, 2010.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional 2010**: Ano base 2009 - Relatório final. Rio de Janeiro: EPE, 2010b.

CASSARD, H.; DENHOLM, P.; ONG, S. Technical and economic performance of residential solar water heating in the United States. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Golden, v. 15, n. 8, p. 3789-3800, 2011.

CTEC - CANMET Energy Technology Centre. **Manual programa RETScreen International**. Varennes: CTEC, 2005. 108 p.

CETIN, M.; EGRICAN, N. Employment impacts of solar energy in Turkey. **Energy Policy**, Hastings, v. 39, n. 11, p. 7184-7190, 2011.

DHARUMAN, C.; ARAKERI, J. H.; SRINIVASAN, K. Performance evaluation of an integrated solar water heater as an option for building energy conservation. **Energy and Buildings**, Oxford, v. 38, n. 3, p. 214-219, 2006.

EIA - Energy Information Administration. **International Energy Statistics**. Disponível em: <<http://www.eia.gov/cfapps/ipdbproject/IEDIndex3.cfm?tid=90&pid=44&aid=>>> Acesso em: 25 jan. 2012.

ELETROBRAS - Centrais Elétricas Brasileiras S.A.. **Pesquisa de posse de equipamentos e hábitos de uso**: Ano base 2005 - Classe residencial. Relatório Brasil. Rio de Janeiro: ELETROBRAS/PROCEL, 2007.

HAN, J.; MOL, A.; LU, Y. Solar water heaters in China: A new day dawning. **Energy Policy**, Hastings, v. 38, n. 1, p. 383-391, 2011.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo 2010: Primeiros Dados**. Disponível em: <http://www.censo2010.ibge.gov.br/primeiros_dados_divulgados/index.php> Acesso em: 16 mar. 2012.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2007: Synthesis Report**. Genebra: IPCC, 2007.

JUNK, W. F.; MELLO, J. A. S. N. Impactos ecológicos das represas hidrelétricas na bacia amazônica brasileira. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 4, n. 8, p. 126-143, 1990.

KALOGIROU, S. Thermal performance, economic and environmental life cycle analysis of thermosiphon solar water heaters. **Solar Energy**, Tampa, v. 83, n. 1, p. 39-48, 2009.

MARTINS, F. R.; PEREIRA, E. B. Enhancing information for solar and wind energy technology deployment in Brazil. **Energy Policy**, Hastings, v. 39, n. 7, p. 4378-4390, 2011.

MCTI - Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovação. **Fatores de Emissão de CO₂ pela geração de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional do Brasil**. Disponível em: <<http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/74689.html>>. Acesso em: 10 fev. 2012.

OLIVEIRA, L. F. C.; FERREIRA, R. C.; ALMEIDA, R. A.; LOBATO, E. J. V.; MEDEIROS, A. M. M. Potencial de redução do consumo de energia elétrica pela utilização de aquecedores solares no estado de Goiás. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 28, n. 3, p. 406-416, 2008.

TSILINGIRIDIS, G.; MARTINOPOULOS, G. Thirty years of domestic solar hot water systems use in Greece - energy and environmental benefits - future perspectives. **Renewable Energy**, Brighton, v. 35, n. 2, p. 490-497, 2010.

UNEP - United Nations Environment Programme. **Keeping Track of Our Changing Environment: From Rio to Rio +20 (1992-2012)**. Nairobi: UNEP, 2011.

WHO - World Health Organization. **Water services for health**. Disponível em: <<http://www.who.int/globalchange/ecosystems/water/en/>>. Acesso em: 01 fev. 2012.

7. CONCLUSÃO GERAL E RECOMENDAÇÃO DE TRABALHOS FUTUROS

7.1 CONCLUSÃO GERAL

A certificação brasileira de eficiência energética de edificações tem o potencial de incentivar o uso de aquecedores solares de água em habitações, com consequente diminuição do consumo e da demanda de energia elétrica e das emissões de gases de efeito estufa pelo setor residencial brasileiro.

7.2 CONCLUSÕES ESPECÍFICAS

Esta dissertação apresentou uma série de estudos sobre análise técnico-econômica e ambiental sobre o uso de aquecedores solares de água em edificações residenciais nas seguintes áreas:

- i. Panorama da etiquetagem de edificações no Brasil e em países selecionados;
- ii. Ferramentas computacionais aplicadas à análise de aquecedores solares de água;
- iii. Análise técnica de aquecedores solares de água para fins residenciais;
- iv. Análise de viabilidade econômica da substituição de chuveiros elétricos por aquecedores solares; e
- v. Avaliação dos impactos ambientais do uso de aquecedores solares de água nas emissões de gases de efeito estufa.

7.2.1 Panorama da etiquetagem de edificações no Brasil e em países selecionados

Dentre os programas de etiquetagem analisados, destaca-se o português (SCE) em estágio consolidado, de caráter mandatório e engloba edifícios residenciais e de serviços. O programas brasileiro (PBE) e o estadunidense (bEQ) são voluntários; o primeiro é destinado a edifícios comerciais, públicos, de serviços e residenciais e o segundo, a edifícios comerciais. O PBE é baseado exclusivamente na determinação de eficiência energética dos edifícios, enquanto o SCE e o bEQ, além de quantificar a eficiência energética, também apontam possibilidades de melhoria de eficiência e quantificam emissões de gases de efeito estufa geradas pelo uso do edifício. Portanto, o PBE de edifícios ainda é bastante simplista comparado a programas internacionais de etiquetagem de eficiência energética.

7.2.2 Ferramentas computacionais aplicadas à análise de aquecedores solares de água

O uso de programas computacionais é uma ótima opção para analisar a inserção de medidas de eficiência energética e de fontes renováveis de energia em edifícios. Entre os principais programas destinados à análise de aquecedores solares de água empregados internacionalmente estão o *RETScreen International*, o *EnergyPlus*, o *TRNSYS*, o *SolDesigner*, o *T*SOL* e o *SolarPro*. O *EnergyPlus* possui um módulo de análise energética detalhado de aquecedores solares, enquanto o *RETScreen International* possui módulos de viabilidade econômica e de análise de emissões de gases de efeito estufa de fácil aplicação. Estes dois programas, de acesso livre, possuem diversas funcionalidades e atendem um público alvo diverso.

7.2.3 Análise técnica de aquecedores solares para fins residenciais

A substituição do chuveiro elétrico por aquecedor solar com apoio elétrico para a residência típica brasileira considerada provocou uma redução média de 70% no consumo de energia elétrica destinada ao aquecimento de água e 36% no consumo total de energia da residência. Além de reduzir os custos para o consumidor residencial, a expansão do uso de aquecedores solares em habitações pode diminuir o consumo e a demanda de energia elétrica pelo setor residencial, com consequente melhora da confiabilidade do sistema elétrico nacional.

Foi verificado que a atual metodologia de classificação do sistema de aquecimento solar do PBE de edifícios residenciais se limita a exigir uma eficiência energética já prevista na norma técnica de referência, a NBR 15669. Além disso, não é possível a obtenção direta do nível de eficiência energética B para aquecedores solares com auxílio elétrico, somente por rebaixamento de nível A para B, devido ao não entendimento de pré-requisitos do nível A.

7.2.4 Análise de viabilidade econômica da substituição de chuveiros elétricos por aquecedores solares

A substituição de chuveiro elétrico por aquecedor solar com apoio elétrico para a residência típica brasileira apresentou taxa interna de retorno, tempo de retorno de capital, valor presente líquido e custo da energia conservada com valores médios de 26% a.a., 4,5 anos, R\$ 5.047,00 e R\$ 0,28/kWh, respectivamente. Foi verificado, ainda, que o aquecedor solar apresenta máxima viabilidade econômica para valores de fração solar anual próximo a 80%. A análise de sensibilidade para diferentes cenários técnico-financeiros apontou que o uso de aquecedores solares de água é atualmente economicamente viável no Brasil e continuará a ser, mesmo que fatores determinantes desta condição sofram modificações futuras.

7.2.5 Avaliação dos impactos ambientais do uso de aquecedores solares de água nas emissões de gases de efeito estufa

A substituição de sistemas de aquecimento elétrico e a gás de água por aquecimento solar, para a residência típica brasileira analisada, evitou a emissão de, aproximadamente, 95 e 256 kgCO₂equivalente/ano, respectivamente. Com base nestes valores, estimou-se que o Brasil emite atualmente mais de 5 milhões tCO₂equivalente/ano com aquecimento de água convencional em habitações. Este valor tende a crescer caso não haja aumento da participação de energias renováveis na oferta interna de energia elétrica e, ou, no maior uso de fontes energéticas descentralizadas para aquecimento de água, como a energia solar térmica. Além disso, o uso de energia solar apresenta impactos externos à redução de emissões de gases de efeito estufa, advindos da instalação e da operação de grandes usinas de geração de energia elétrica.

7.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Possíveis trabalhos a serem realizados futuramente fruto desta dissertação:

- i. Investigar a aplicação do método da Carta-F modificado para calcular a fração solar de aquecedores solares com circulação natural de água (efeito termossifão) nas condições climáticas brasileiras e comparar seu desvio em relação ao método da Carta-F original;
- ii. Realizar uma análise técnico-econômica comparativa do uso de aquecedores solares com sistema de energia auxiliar do tipo elétrico de passagem (chuveiro elétrico com menores potências) e do tipo acumulação (resistência no interior do reservatório térmico);
- iii. Investigar o efeito de diferentes fontes energéticas auxiliares ao sistema de aquecimento solar de água, como energia elétrica, gás natural e gás

liquefeito de petróleo, sobre os indicadores de viabilidade econômica e nas emissões evitadas de gases de efeito estufa;

- iv. Realizar um levantamento de residências que foram certificadas pelo programa brasileiro de etiquetagem de edificações, investigando seu impacto no emprego de energia solar no país;
- v. Fazer uma projeção de economia energética nacional caso as residências brasileiras adotassem sistemas de aquecimento solar de água classificados como nível de eficiência energética A pelo PBE de edifícios; e
- vi. Contribuir para elaboração de um regulamento de certificação de eficiência energética destinado a agroindústrias, já que estas representam o tipo de edificação com maior consumo energético na cadeia do agronegócio.