

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ – UNIOESTE
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

UTILIZAÇÃO DA ENERGIA SOLAR EM SISTEMAS DE AQUECIMENTO DE
ÁGUA RESIDENCIAL

LUIZ HENRIQUE BASSO

CASCADEL – PARANÁ
JUNHO - 2008

LUIZ HENRIQUE BASSO

**UTILIZAÇÃO DA ENERGIA SOLAR EM SISTEMAS DE
AQUECIMENTO DE ÁGUA RESIDENCIAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola, área de concentração em **Engenharia de Sistemas Agroindustriais**.

Orientador: Prof. Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza

**CASCADEL - PARANÁ - BRASIL
JUNHO – 2008**

Ficha catalográfica

Elaborada pela Biblioteca Central do Campus de Cascavel - Unioeste

B322u Basso, Luiz Henrique
Utilização da energia solar em sistemas de aquecimento de água
residencial / Luiz Henrique Basso — Cascavel, PR: UNIOESTE, 2008.
105 f. ; 30 cm

Orientador: Prof. Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza
Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual do Oeste do
Paraná.

Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia
Agrícola, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas.
Bibliografia.

1. Fontes energéticas renováveis e não-renováveis. 2. Energia solar.
3. Sistema de aquecimento de águas residenciais. 4. Aquecimento solar.
I. Souza, Samuel Nelson Melegari de. II. Universidade Estadual do Oeste
do Paraná. III. Título.

CDD 21ed. 621.042

Bibliotecária: Jeanine da Silva Barros CRB 9/1362

LUIZ HENRIQUE BASSO

**UTILIZAÇÃO DA ENERGIA SOLAR EM SISTEMAS DE AQUECIMENTO DE
ÁGUA RESIDENCIAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola, área de concentração Engenharia de Sistemas Agroindustriais, **aprovada** pela seguinte banca examinadora:

Orientador: Prof. Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, UNIOESTE

Prof. Dr. Rubens Siqueira
Instituto Agronômico do Paraná, IAPAR LONDRINA

Prof. Dr. Antônio Gabriel Filho
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, UNIOESTE

Prof. Dr. Suedêmio de Lima Silva
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, UNIOESTE

Cascavel, 27 de junho de 2008.

AGRADECIMENTOS

A Nara, pelo apoio incondicional.

Ao Pedro Henrique por permitir que eu usasse o seu computador de brincar e jogar para ficar escrevendo um monte de “letrinhas”.

A todos os integrantes do Programa de Pós Graduação em Engenharia Agrícola.

A Vera, sempre pronta a ajudar com questões burocráticas.

Aos professores do programa com os quais tive aula e me aturaram.

Aos funcionários, diretores e professores da Faculdade Assis Gurgacz.

Ao Leonardo e ao Cleuton da Transen Aquecedor Solar, pela doação do equipamento de aquecimento e informações técnicas e ao João Bosco pelo auxílio.

Aos amigos que ajudaram na montagem do protótipo.

Ao meu pai, que trabalhou de carpinteiro no protótipo.

A minha mãe, para que não fique com ciúmes.

Aos colegas de mestrado pela amizade.

Ao Suedêmio pela impagável ajuda com termorresistências, sensores, piranômetros, transdutores, *loggers* e outras modernidades custosas de se manusear, para quem é do tempo da régua T.

Ao Samuel, pela confiança, amizade, coleguismo, conhecimento, paciência,..., enfim, pela orientação.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	ix
LISTA DE FIGURAS	xi
RESUMO	xiii
ABSTRACT	xiv
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1 Energia.....	3
2.2 Fontes de Energia.....	3
2.2.1 Fontes de energia não renováveis.....	3
2.2.2 Fontes de energia renováveis.....	4
2.2.2.1 Energia hidroelétrica	5
2.2.2.1.1 Energia elétrica no Brasil	6
2.3 Energia Solar	8
2.3.1 Radiação solar	8
2.3.2 Utilização da energia solar	10
2.3.2.1 Geração de eletricidade	10
2.3.2.2 Aquecimento de ambientes.....	11
2.3.2.3 Refrigeração	12
2.3.2.4 Estufas	13
2.3.2.5 Secadores.....	13
2.3.2.6 Fogões	14
2.3.2.7 Dessalinização de água.....	14
2.3.2.8 Aquecimento da água de piscinas	15
2.3.2.9 Aquecimento de água potável residencial.....	16
2.4 Sistema de Aquecimento de Água por Energia Solar	17
2.4.1 Captação.....	18
2.4.1.1 O coletor solar com efeito de estufa	19
2.4.1.2 Montagem dos coletores.....	23
2.4.1.3 Tipos de coletores.....	24
2.4.1.4 Direcionamento e inclinação dos coletores.....	24

2.4.1.5	Sistema contra congelamento.....	25
2.4.2	Armazenagem de água quente.....	26
2.4.2.1	Alimentação do <i>boiler</i> , com água fria, por baixa pressão.....	27
2.4.2.2	Alimentação do <i>boiler</i> , com água fria, por alta pressão	28
2.4.2.3	<i>Boiler</i> com sistema auxiliar de aquecimento	28
2.4.3	Distribuição de água quente	29
2.4.4	Funcionamento do sistema de aquecimento de água por energia solar	30
2.4.4.1	Circulação natural	30
2.4.4.2	Circulação forçada	33
2.4.5	Dimensionamento do sistema de aquecimento de água por energia solar	34
2.4.5.1	Dimensionamento conforme Transen (2004).....	35
2.4.5.2	Dimensionamento conforme Creder (2006).....	36
2.4.5.3	Dimensionamento conforme Melo & Azevedo Netto (1988)	37
2.5	Energia Solar como Fonte Alternativa no Brasil.....	38
2.6	Programa Brasileiro de Etiquetagem	42
2.7	Sustentabilidade	44
2.8	Dados Climáticos	45
2.9	Equipamentos de Manobra Hidráulica e Coleta de Informações .	46
2.9.1	Registro de gaveta.....	46
2.9.2	Válvula solenóide.....	47
2.9.3	Sensores.....	47
2.9.3.1	Termorresistências	48
2.9.4	Avaliação de sistemas operando por temossifão.....	49
2.9.5	Energia elétrica economizada.....	49
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	50
3.2	Projeto do Protótipo	50
3.1	Protótipo.....	51
3.2.1	Composição do protótipo	53
3.2.1.1	Reservatório térmico ou <i>boiler</i>	53
3.2.1.2	Coletor solar.....	54
3.2.1.3	Reservatório para água fria.....	55
3.2.1.4	Tubulação para água quente	55

3.2.1.5	Isolamento térmico.....	56
3.2.1.6	Registros de manobra.....	56
3.2.1.7	Válvula solenóide.....	57
3.2.1.8	Temporizador.....	57
3.2.1.9	Controle de temperatura	58
3.2.1.10	Registrador eletrônico de dados	58
3.3	Procedimento Experimental	59
3.3.1	Aquisição de dados.....	59
3.3.1.1	Aquisição de dados sem a drenagem.....	59
3.3.1.2	Aquisição de dados com a drenagem.....	60
3.3.1.2.1	Simulação do consumo de água quente	60
3.3.1.3	Período da coleta de dados	61
3.3.1.4	Dados adquiridos	61
3.3.2	Manutenção do protótipo	62
3.3.3	Avaliação de dados.....	62
3.3.3.1	Avaliação técnica	62
3.3.3.1.1	No inverno.....	63
3.3.3.1.2	No verão	63
3.3.3.2	Avaliação econômica	64
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	66
4.1	Avaliação Técnica.....	66
4.1.1	Sistema sem drenagem do <i>boiler</i>	66
4.1.1.1	Eficiência do <i>boiler</i> quanto à manutenção da energia calorífica ..	66
4.1.1.2	Irradiação diária pela temperatura final do <i>boiler</i>	72
4.1.2	Sistema com drenagem do <i>boiler</i>	74
4.1.2.1	Influência da velocidade do vento	74
4.1.2.2	Eficiência da coleta de energia e energia coletada por litro de água armazenada.....	76
4.1.2.3	Produção específica de energia (PEE) e eficiência térmica diária relacionada à PEE.	81
4.2	Avaliação Econômica.....	88
5	CONCLUSÕES.....	90
	REFERÊNCIAS.....	91
	ANEXOS	101

ANEXO A - ORÇAMENTO DE UM COLETOR SOLAR DE 1,00 X 1,71M, CATEGORIA A E UM <i>BOILER</i> EM AÇO INOX, COM CAPACIDADE DE 100 LITROS.....	102
ANEXO B - CONTA DE ENERGIA ELÉTRICA RESIDENCIAL DO MÊS DE MARÇO DE 2008.....	103
ANEXO C - INFLAÇÃO PARA O ANO DE 2007, INDEXADA PELO INPC (ÍNDICE NACIONAL DE PREÇOS AO CONSUMIDOR), FORNECIDA PELO IBGE (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA).....	104
ANEXO D - TAXA DE JUROS PARA FINANCIAMENTOS DE EQUIPAMENTOS, TJLP (TAXA DE JUROS DE LONGO PRAZO) PARA O ANO DE 2007, FORNECIDA PELO BNDES (BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO SOCIAL).....	105

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Composição da irradiação solar no solo	9
Tabela 2 -	Temperaturas inicial e final no <i>boiler</i> , velocidade do vento, temperatura média ambiente à noite, perda de energia calorífica e percentual no <i>boiler</i> à noite e eficiência do <i>boiler</i> no mês de julho de 2007	67
Tabela 3 -	Temperaturas inicial e final no <i>boiler</i> , velocidade do vento, temperatura média ambiente à noite, perda de energia calorífica e percentual no <i>boiler</i> à noite e eficiência do <i>boiler</i> no mês de agosto de 2007	68
Tabela 4 -	Temperaturas inicial e final no <i>boiler</i> , velocidade do vento, temperatura média ambiente à noite, perda de energia calorífica e percentual no <i>boiler</i> à noite e eficiência do <i>boiler</i> no mês de setembro de 2007	69
Tabela 5 -	Dados coletados: temperaturas inicial e final no <i>boiler</i> , temperaturas médias dia e noite e irradiação nos meses de julho e agosto	72
Tabela 6 -	Dados coletados: temperaturas inicial e final no <i>boiler</i> , temperaturas médias dia e noite e irradiação no mês de setembro	73
Tabela 7 -	Temperaturas inicial e final no <i>boiler</i> , radiação diária, radiação diária no plano da placa, ganho térmico no <i>boiler</i> , energia calorífica absorvida, eficiência da coleta e energia coletada por litro, no mês de dezembro de 2007	76
Tabela 8 -	Temperaturas inicial e final no <i>boiler</i> , radiação diária, radiação diária no plano da placa, ganho térmico no <i>boiler</i> , energia calorífica absorvida, eficiência da coleta e energia coletada por litro, no mês de janeiro de 2008	77
Tabela 9 -	Temperaturas inicial e final no <i>boiler</i> , radiação diária, radiação diária no plano da placa, ganho térmico no <i>boiler</i> , energia	

	calorífica absorvida, eficiência da coleta e energia coletada por litro, no mês de fevereiro de 2008.....	78
Tabela 10	- Temperaturas inicial e final no <i>boiler</i> , radiação diária, radiação diária no plano da placa, ganho térmico no <i>boiler</i> , energia calorífica absorvida, eficiência da coleta e energia coletada por litro, no mês de março de 2008.....	79
Tabela 11	- Temperaturas inicial e final no <i>boiler</i> , radiação diária, radiação diária no plano da placa, ganho térmico no <i>boiler</i> , energia calorífica absorvida, Produção específica de energia (PEE) e eficiências térmicas diárias no mês de dezembro de 2007, relacionadas à PEE	82
Tabela 12	- Temperaturas inicial e final no <i>boiler</i> , radiação diária, radiação diária no plano da placa, ganho térmico no <i>boiler</i> , energia calorífica absorvida, Produção específica de energia (PEE) e eficiências térmicas diárias no mês de janeiro de 2008, relacionadas à PEE	82
Tabela 13	- Temperaturas inicial e final no <i>boiler</i> , radiação diária, radiação diária no plano da placa, ganho térmico no <i>boiler</i> , energia calorífica absorvida, produção específica de energia (PEE) e eficiências térmicas diárias no mês de fevereiro de 2008, relacionadas à PEE	83
Tabela 14	- Temperaturas inicial e final no <i>boiler</i> , radiação diária, radiação diária no plano da placa, ganho térmico no <i>boiler</i> , energia calorífica absorvida, Produção específica de energia (PEE) e eficiências térmicas diárias no mês de março de 2008, relacionadas à PEE	84

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Consumo de diferentes fontes de energia, no setor residencial. ..7
Figura 2 -	Esquema de ligação de um sistema de aquecimento de água, por energia solar, para funcionar por termossifão..... 31
Figura 3 -	Etiqueta PROCEL do coletor solar utilizado no protótipo..... 44
Figura 4 -	Planta baixa do protótipo, ao nível do solo. 50
Figura 5 -	Planta baixa do protótipo, ao nível do reservatório térmico. 50
Figura 6 -	Vista seccionada longitudinal do protótipo. 51
Figura 7 -	Vista lateral do protótipo – posição da fotografia: leste – oeste. No primeiro plano a estação meteorológica. 52
Figura 8 -	Vista frontal do coletor – posição da fotografia: norte – sul. Lados esquerdo inferior e direito superior, os sensores de temperatura. Lado direito inferior, registro de manobra para drenagem do coletor. 52
Figura 9 -	Protótipo do sistema de aquecimento de água por energia solar, para funcionar por termossifão, antes da instalação..... 53
Figura 10 -	Reservatório térmico..... 54
Figura 11 -	Coletor solar..... 54
Figura 12 -	Reservatório de água fria na parte superior. Na parte inferior, vista de parte do reservatório térmico. 55
Figura 13 -	Isolamento térmico em polietileno expandido, recobrando o tubo de cobre..... 56
Figura 14 -	Válvula solenóide..... 57
Figura 15 -	Temporizador digital..... 57
Figura 16 -	Termorresistência PT 100..... 58
Figura 17 -	Registrador eletrônico..... 58
Figura 18 -	Temperatura final da água no <i>boiler</i> em relação à velocidade do vento. 70
Figura 19 -	Relação entre as temperaturas da água na entrada e saída da placa, da água do <i>boiler</i> e da velocidade do vento, no período de 24 horas. 71

Figura 20 - Temperatura ambiente média durante à noite e perda da energia térmica no <i>boiler</i> , durante à noite.....	71
Figura 21 - Temperatura final da água no <i>boiler</i> em relação à radiação total diária no inverno.	73
Figura 22 - Velocidade do vento e temperatura final da água no <i>boiler</i> no verão.....	74
Figura 23 - Velocidade do vento, temperatura de entrada na placa e temperatura de saída da placa no dia 21/12/2007.....	75
Figura 24 - Velocidade do vento e temperatura de entrada na placa e temperatura de saída da placa no dia 27/01/2008.....	75
Figura 25 - Velocidade do vento e temperatura de entrada na placa e temperatura de saída da placa no dia 05/03/2008.....	75
Figura 26 - Radiação diária e energia calorífica absorvida.	80
Figura 27 - Radiação diária e energia coletada por litro de água depositada no <i>boiler</i>	81
Figura 28 - Relação entre a radiação diária e a temperatura final da água no <i>boiler</i>	85
Figura 29 - Relação entre a radiação diária e a produção específica de energia.....	85
Figura 30 - Rendimento do sistema relativamente à PEE.....	86
Figura 31 - Rendimento η^* do sistema relativamente à radiação diária.	86

RESUMO

A conscientização da importância do meio ambiente tem incentivado o estudo de novas fontes energéticas renováveis e menos poluentes. Dentre essas fontes, a energia solar se destaca por ser perene e limpa. A utilização da energia solar em sistemas de aquecimento de água residenciais, pela substituição do chuveiro elétrico, pode colaborar com a economia de energia elétrica, base da matriz energética brasileira. Conhecer todos os fatores que influenciam a operação de um sistema de aquecimento de água por energia solar é importante na determinação de suas viabilidades técnica e econômica, visando sua difusão em residências urbanas e rurais. Para avaliar um equipamento de aquecimento de água por energia solar na região oeste do Paraná, construiu-se um protótipo com características similares a um equipamento utilizado em residências para dois habitantes, para funcionar com circulação natural ou termossifão e sem auxílio de sistema de aquecimento complementar. A temperatura ambiente e a velocidade do vento também foram avaliadas, verificando-se sua influência no sistema de aquecimento. O equipamento mostrou-se viável tecnicamente, alcançando a temperatura mínima de 35°C para banho, sempre que a radiação solar foi superior a 3500 W.m⁻², o que aconteceu para a maioria dos dias estudados. O sistema operou sem interrupções e não necessitou de manutenção, exceto pela limpeza mensal do vidro. Constatou-se a viabilidade econômica, já que a vida útil do equipamento é superior ao período de retorno do investimento.

Palavras-chave: água quente, termossolar, circulação natural.

ABSTRACT

THE SOLAR ENERGY USES IN HOME WATER HEATER SYSTEMS

The awareness of the importance of the environment has stimulated the study of new energy sources renewed and less pollutant. Amongst these sources, solar energy stands alone for being perennial and clean. The use of solar energy in systems of residential water heating, instead of the electric shower, can compliment the economy of electric energy, based of the Brazilian energy matrix. To know all the factors that influence the operation of a system of water heating by solar energy is important in the determination of its economic viabilities, techniques and, distribution targeting in urban and agricultural residences. To evaluate equipment of water heating for solar energy in the region west of the Paraná, an archetype with similar characteristics to equipment used in residences for two inhabitants was built, to function with natural circulation or thermosiphon and without help of a complementary heating system. The room temperature and the speed of the wind were also evaluated, verifying its influence in the heating system. The equipment revealed technical viability, reaching the minimum temperature of 35°C for shower, whenever the solar radiation was above the 3500 W.m⁻², for the majority of the studied days. The system operated without interruptions and it did not need maintenance, except for the monthly glass cleaning. Economic viability was clearly demonstrated since the useful life of the equipment exceeded the period of use to gain its investment.

Keywords: hot water, thermosolar, natural circulation.

1 INTRODUÇÃO

A matriz energética mundial, de forma ampla, é formada pelo petróleo e pela eletricidade.

O petróleo, além de contribuir para o aquecimento global, não é renovável.

A eletricidade pode ser gerada pela queima de óleo combustível, de carvão mineral e de gás natural – combustíveis que são poluentes e não renováveis; pela queima do carvão vegetal e de biomassa, que são combustíveis renováveis, porém poluentes; pela energia nuclear, que não é poluente, mas perigosa e geradora de resíduos tóxicos. A energia elétrica é gerada, também, por aproveitamento hidráulico que tem a vantagem de ser uma fonte renovável de energia e não contribuir para a mudança global do clima. A hidroeletricidade, apesar das grandes vantagens, para ser implantada, causa impactos ambientais e sociais e necessita de constantes investimentos no sistema de distribuição.

No Brasil, a energia elétrica é muito importante, sob diversos pontos de vista e a sua correta utilização traz vantagens financeiras, ambientais, sociais e de sustentabilidade. Sua economia, na cidade e no campo, mesmo que em pequenas parcelas, tem grande importância para o uso racional da energia elétrica.

Segundo RISPOLDI (2001), o chuveiro elétrico, com cerca de 95% de eficiência na transformação de energia elétrica em calor transferido à água de banho, pode ser considerado como um grande invento. Porém, essa eficiência é utilizada em curtos intervalos de tempo, concentrados num mesmo horário, conhecido como horário de pico ou de ponta.

A utilização da energia solar como fonte de aquecimento da água de uso residencial, pode contribuir favoravelmente para a economia de energia elétrica, principalmente, pela substituição dos chuveiros elétricos.

Os sistemas de aquecimento de água que funcionam por circulação natural ou termossifão, se bem dimensionados e instalados corretamente,

proporcionam satisfação ao usuário, não necessitam de manutenção, são tecnicamente viáveis e têm um período de retorno do investimento atrativo.

São objetivos deste trabalho avaliar técnica e economicamente um sistema de aquecimento de água, utilizando a energia solar em situação real, com simulação do consumo médio *per capita* de uma residência, levantando os dados climáticos e às condições ambientais da região oeste do Paraná; auxiliar a comunidade técnica no dimensionamento de sistemas semelhantes e contribuir com a difusão da implantação de sistemas de aquecimento de água residencial por energia solar e a conseqüente economia de energia elétrica em residências do campo e da cidade.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Energia

Pode-se definir energia como a propriedade de um sistema que lhe permite realizar trabalho (FERREIRA, 1986) ou a capacidade que um corpo, uma substância ou um sistema físico têm de realizar trabalho (HOUAISS, VILLAR & FRANCO, 2001).

De acordo com MONTANARI (2003) e CARRON & GUIMARÃES (2006), a energia é classificada como: mecânica, elétrica, química, radiante, térmica, nuclear e sonora.

2.2 Fontes de Energia

Os materiais que, sob determinadas condições, têm a capacidade de realizar trabalho, são fontes de energia e são classificadas em: não renováveis e renováveis.

2.2.1 Fontes de energia não renováveis

As fontes de energia não renováveis são aquelas que não podem ser repostas, como: o petróleo, o gás natural, o urânio, o carvão mineral e o xisto betuminoso. São também conhecidas como fontes convencionais de energia. Segundo HINRICHS & KLEINBACH (2003), aproximadamente, 90% das fontes comerciais de energia utilizadas no mundo são oriundas dos combustíveis fósseis. Para MENEZES (2002), as principais fontes de energia do mundo são o petróleo, o carvão e o gás, responsáveis por 90% do consumo total de energia primária.

2.2.2 Fontes de energia renováveis

As fontes de energia renováveis são aquelas que não se esgotam, como os vegetais, os restos orgânicos ou biomassa, o vento, o hidrogênio, águas fluviais e marítimas e a radiação solar. Segundo ALMEIDA & RIGOLIN (2002), as fontes de energia renováveis são consideradas também fontes alternativas de energia, porque contribuem para diminuir a dependência de fontes de energia não renováveis e, de acordo com TOLMASQUIM (2003), terão uma participação cada vez mais relevante na matriz energética global nas próximas décadas, podendo chegar a 10% em 2020. Os recursos energéticos renováveis oferecem muitas vantagens, pois podem ser usados de muitas maneiras, gerando poucos problemas ambientais e podem ser controlados com tecnologias já disponíveis.

De acordo com HINRICHS & KLEINBACH (2003), as fontes renováveis de energia fornecem, aproximadamente, 9% da energia mundial, aumentando para 22%, se incluídos todos os usos da biomassa. A energia eólica é o recurso energético cuja utilização tem aumentado mais rapidamente. Em seguida vem a energia fotovoltaica, com 24% de crescimento por ano. Para esses autores, há indicações de que as fontes renováveis devem aumentar sua participação para 30% a 40% do total em 2050, pressupondo os esforços globais em termos de políticas públicas voltadas para as questões ambientais, especialmente as relacionadas com o clima.

Razões econômicas (já que o custo de geração das energias renováveis, comparado com o dos combustíveis comerciais, ainda é alto) e técnicas, como a dificuldade de armazenagem e geração (já que dependem, muitas vezes, do tempo e do clima), e políticas (pela falta de estratégias governamentais) têm sido empecilhos para o emprego em larga escala das energias renováveis.

Por outro lado, as energias renováveis continuarão disponíveis e seu potencial de utilização é imenso, caso da energia solar. Segundo HINRICHS & KLEINBACH (2003), uma área de 140 x 140 milhas no Arizona, coberta com células solares, poderia satisfazer todas as demandas de energia norte-americanas. Ainda segundo esse autor, em um ano, a quantidade de energia solar que cai sobre todo o território norte-americano é,

aproximadamente, 2000 vezes maior do que a energia gerada pela produção atual de carvão do país. No mesmo sentido, PINGUELLI-ROSA *et al.* (2002) afirmam que a energia que é irradiada do sol para a superfície da Terra é maior que 14000 vezes o consumo global atual no planeta. Ou seja, o consumo de energia de toda a humanidade em um ano é enviado do Sol para a Terra no intervalo de meia hora.

2.2.2.1 Energia hidroelétrica

De acordo com HINRICHS & KLEINBACH (2003), a energia hidráulica tem sido utilizada para que a água gere trabalho útil, como moer grãos, serrar madeira e fornecer energia para outras tarefas. A força das águas é transferida para uma série de máquinas de movimento rotatório por meio de eixos, hastes, roldanas, polias, cabos e engrenagens. Os gregos já utilizavam rodas d'água de eixo vertical em 85 a.C. e, de eixo horizontal, por volta de 15 a.C. Além do vento, a força das águas foi a única fonte de energia mecânica disponível até o desenvolvimento do motor a vapor no século XIX. Para BRANCO (2004), muito antes de conseguir utilizar a energia calorífica, o homem controlou e utilizou a energia das águas, que têm caminho certo e mais ou menos invariável. Esta alternativa de obtenção de energia foi resolvida com a construção de barragens. O represamento da água em barragens e seu uso na movimentação de rodas para moinhos datam da Idade Média. Moinhos já existiam em 60 a.C. A primeira barragem com a finalidade de regularizar vazões para uma série de moinhos industriais foi construída no século XII, no rio Garonne, no sul da França. De acordo com LINSLEY *et al.* (1992), a primeira hidroelétrica dos Estados Unidos foi colocada em operação em 1882, em Appleton, Wisconsin.

Para PALZ (2002), a hidroeletricidade é, talvez, a forma mais atraente de energia atualmente disponível. Não gera poluição e é bem adequada ao armazenamento de eletricidade. As usinas hidroelétricas são limpas, precisam de pouca manutenção e, freqüentemente, promovem o valor recreativo da área que ocupam.

Segundo TOLMASQUIM (2005), a energia hidroelétrica, que fornece 19% da energia consumida no planeta, tem-se mostrado a mais atrativa, pois,

apesar do inconveniente dos danos ambientais e sociais e dos custos de implantação e de distribuição, após o início da operação, pode ter a geração adequada ao consumo de maneira rápida e eficiente. Também é considerada limpa, pois não emite poluentes nos processos de geração e de distribuição. A energia hidroelétrica ainda tem muito a ser explorada, já que o desenvolvimento de apenas metade do potencial hidráulico, economicamente viável no mundo, poderia reduzir a emissão de gases de efeito estufa em cerca de 13%, por evitar a construção de usinas de geração de energia elétrica a partir de combustíveis fósseis.

Segundo LINSLEY *et al.* (1992), os sítios mais favoráveis para o desenvolvimento de hidroelétricas nos Estados Unidos já foram utilizados, enquanto que o potencial para o desenvolvimento da energia hidroelétrica em outras partes do mundo, especialmente na África, na Ásia e na América do Sul, ainda é imenso.

2.2.2.1.1 Energia elétrica no Brasil

Para ZANIN *et al.* (2002), a energia elétrica encontra-se em destaque em todos os setores da economia mundial e é um importante insumo básico para o desenvolvimento de qualquer país. Sua conservação, em cadeias produtivas, diminui o custo de produção. De acordo com os autores acima, o planejamento inadequado da produção e do consumo energético leva a impactos ambientais que podem comprometer o desenvolvimento. No Brasil, esses aspectos ficaram visíveis, quando a escassez de chuvas provocou uma crise por falta de energia, ou seja, por falta de combustível, que é a água, comprometendo o fornecimento de energia elétrica, em razão do sistema de geração que é predominantemente hídrico.

Para SOUZA, MAUAD & LEME (2003), só a partir de 1883, com a implantação da usina hidroelétrica do Ribeirão do Inferno, na bacia do Jequitinhonha, município de Diamantina, então província de Minas Gerais, é que teve início a geração de energia elétrica no Brasil, a partir de recursos hídricos. Esse aproveitamento pioneiro constituiu-se em um dos maiores do mundo na época, com um desnível de 5 m, construindo-se a mais longa linha de transmissão para a época: 2 km.

TIAGO FILHO *et al.* (2003) afirmam que, de acordo com dados da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), no Brasil, somam-se um total de 2837,77 MW para aprovação e um total de 4478,37 MW aprovados, totalizando 7316,14 MW para a construção de novos projetos de pequenas centrais hidroelétricas, mostrando, desta forma, um mercado promissor para novos investimentos.

Por outro lado, há ainda, no Brasil, uma grande exclusão elétrica que, segundo GOMES & COHEN (2006), é um fenômeno essencialmente regional e rural, sendo que 63,9% dos domicílios sem acesso à energia elétrica situam-se na região Nordeste e 81,6% dos domicílios sem acesso à energia elétrica estão na zona rural. Mais de 60% dos domicílios sem acesso à energia elétrica apresentam renda *per capita* inferior a meio salário mínimo.

A eletricidade provê grande parte da energia residencial no Brasil, como se observa no gráfico da Figura 1, que tem no eixo das abscissas o período de tempo e no eixo das ordenadas, o consumo de diversas fontes de energia residenciais, em 10^6 toneladas equivalentes de petróleo (tep).

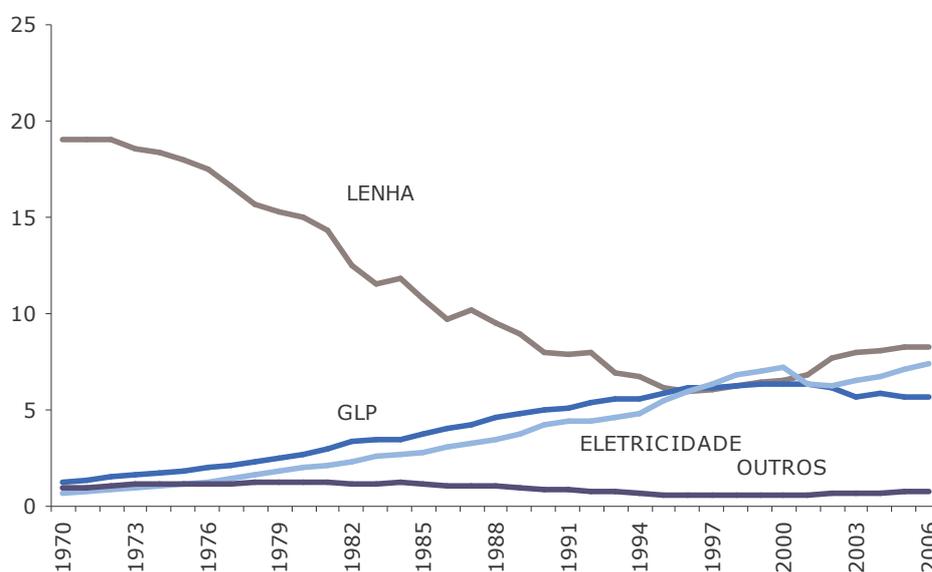


Figura 1- Consumo de diferentes fontes de energia, no setor residencial.

Fonte: MME (2008).

2.3 Energia Solar

De acordo com FERRARO *et al.* (2001), energia solar é a energia captada diretamente das radiações recebidas do Sol.

2.3.1 Radiação solar

Segundo BRINKWORTH (1982), da radiação solar que penetra na Terra e proporciona o aquecimento do ar, do mar e do solo, deriva a energia necessária para manter o movimento da atmosfera e dos oceanos e para evaporação da água, que voltará em forma de chuva.

FROTA & SCHIFFER (2003) explicam que a radiação solar é uma energia eletromagnética de onda curta, que atinge a Terra após ser parcialmente absorvida pela atmosfera.

Para VALIATI & RICIERI (2005), a radiação solar, ao se propagar na atmosfera, até atingir a superfície da Terra, passa pelos processos de espalhamento e de absorção. Em consequência do espalhamento, observa-se, além da componente direta, a irradiação solar difusa. A soma dessas duas componentes é denominada irradiação solar global.

De acordo com ARRUDA (2004), a radiação total a que um corpo na superfície terrestre está sujeito é a soma da radiação direta, difusa e refletida pelo entorno. Segundo OLIVEIRA (2007), a radiação solar direta é a radiação solar interceptada por uma superfície que não sofre mudança de direção ou espalhamento na atmosfera e irradiância solar é a taxa com que a energia solar radiante incide sobre uma superfície unitária ($W.m^{-2}$). Irradiação solar é a energia solar incidente sobre uma área ($Wh.m^{-2}$).

Para DIAS (2003), a porcentagem de energia solar que chega à superfície é de cerca de 47% daquela que atinge a camada superior à atmosfera, dependendo das condições climáticas e da latitude local.

Nem todo calor enviado pelo Sol atinge a superfície da Terra, somente cerca de metade daquele que chega na estratosfera. O restante é absorvido pela atmosfera ou é absorvido e refletido pelas nuvens. Em uma superfície de $1 m^2$, situada logo acima da atmosfera e disposta perpendicularmente aos raios

do Sol, chegam, a cada segundo, 1350 J de energia ou, pode-se dizer, que a intensidade da radiação solar nesta região é de 1350 W.m^{-2} , a esse valor dá-se o nome de Constante Solar. A quantidade de energia que chega na Terra a cada segundo é igual ao produto da constante solar pela área de um disco de raio igual ao da Terra ($6370 \text{ km} = 6,37 \times 10^6 \text{ m}$): $1350 \text{ W.m}^{-2} \cdot \pi \cdot (6,37 \times 10^6 \text{ m})^2 = 170 \times 10^9 \text{ MW}$ - 170 bilhões de megawatts ou 170 bilhões de megajoules por segundo (AMALDI, 1997).

A composição da irradiação solar no solo, segundo CABIROL, PELISSOU & ROUX (1980), é demonstrada na Tabela 1.

Tabela 1 - Composição da irradiação solar no solo

COMPRIMENTO DE ONDA (micras)	PERCENTAGEM DA ENERGIA TOTAL	NATUREZA DA IRRADIAÇÃO
0,25 a 0,40	1 a 3	ultravioleta
0,40 a 0,75	40 a 42	visível
0,75 a 2,50	55 a 59	infravermelho

Fonte: CABIROL, PELISSOU & ROUX (1980).

A variação da energia recebida é função da duração da irradiação solar, da massa de atmosfera atravessada, da inclinação dos raios e da nebulosidade. Esses fatores são determinados pela estação do ano, pela hora, pela latitude e pelo estado do céu.

Segundo ARRUDA (2004), o comportamento de uma superfície submetida à radiação direta depende, além de suas propriedades, da intensidade, da duração e da orientação dos raios solares. A orientação, em relação a um ponto sobre a superfície terrestre, é obtida por meio de três ângulos básicos: a latitude, que é a localização norte ou sul em relação ao Equador; a declinação, que é a posição angular do sol ao meio-dia em relação ao plano do Equador; e o ângulo horário, que é a posição angular do sol a leste ou a oeste do meridiano local, devido à rotação da terra em seu próprio eixo.

A radiação solar global pode ser medida, de acordo com GRIGOLETO (2001), com o actinógrafo ou piranômetro e pode ser considerada o combustível dos sistemas de aquecimento de água por energia solar.

2.3.2 Utilização da energia solar

A energia solar pode ser utilizada para geração de eletricidade, para aquecimento de ambientes, refrigeração, em estufas, em secadores, em fogões, para dessanilização de água, aquecimento da água de piscinas e aquecimento de água.

2.3.2.1 Geração de eletricidade

Segundo NASCIMENTO *et al.* (2003), a energia solar é a forma de energia primária mais abundante na Terra, mas é também uma das mais dispersas e intermitentes quanto a sua utilização. É uma alternativa importante para geração de eletricidade que oferece vantagens econômicas e ecológicas, dentro de determinadas condições. Entre essas vantagens estão as seguintes características: ser inesgotável, permitir uma geração de eletricidade renovável e livre de emissão de gases poluentes e reduzir os níveis de poluição a valores aceitáveis, quando combustíveis de *backup* são usados em sistemas híbridos.

Para TRIGOSO (2000), uma das principais aplicações da energia solar fotovoltaica é a energização rural de residências de baixa renda, isoladas e distantes da rede de distribuição de energia elétrica. De acordo com MICHELS (2007), o uso dos sistemas fotovoltaicos para o bombeamento de água para uso humano e animal evita a geração de poluição sonora e ambiental, pois constitui fonte limpa, sem ruídos e sem peças móveis de manutenção.

Conforme HINRICHS & KLEINBACH (2003), a geração fotovoltaica, conversão de luz solar diretamente em eletricidade, tem sido e continuará sendo uma das mais fascinantes tecnologias no campo da energia. Essa tecnologia foi iniciada muitos anos atrás e recebeu um grande impulso na década de 1950 por causa do programa espacial norte-americano. De acordo com ASIMOV (1993), já em 1887 o físico alemão Heinrich Rudolph Hertz havia descoberto que o selênio poderia conduzir uma corrente elétrica com muito mais facilidade na luz do que no escuro (efeito fotoelétrico). Posteriormente percebeu-se que a energia solar soltava os elétrons dos átomos de selênio e que eram esses elétrons que levavam a corrente.

Para CARRON & GUIMARÃES (2003), o efeito fotoelétrico consiste no fato de que metais, quando banhados por energia radiante, emitem elétrons. As células fotoelétricas são amplamente utilizadas no controle de portas de elevador, em aparatos de segurança, na cronometragem, etc. Para RAMALHO JÚNIOR, FERRARO & SOARES (2007), o efeito fotoelétrico não ficou suficientemente explicado na Física Clássica até que Einstein, em 1905, propôs que, no efeito fotoelétrico, um fóton da radiação incidente, ao atingir o metal, é completamente absorvido por um único elétron, cedendo-lhe sua energia. Essa interação ocorre instantaneamente, de modo semelhante à colisão de duas partículas, ficando então o elétron do metal com uma energia adicional. A teoria de Einstein sugere, então, que a luz ou outra forma de energia radiante é composta de “partículas”: os fótons, e que estes podem ser absorvidos pelo metal apenas um de cada vez, não existindo frações de um fóton.

FRAIDENRAICH *et al.* (2003) afirmam que o progresso realizado ao longo dos anos tem sido surpreendente pela melhoria substancial da eficiência do processo de conversão de energia solar em energia elétrica, crescimento da produção e vendas, abertura de mercados no âmbito internacional e aumento de oportunidades para a aplicação da tecnologia. Porém, segundo OLIVEIRA (2007), ocorre que, apesar da significativa evolução da tecnologia fotovoltaica, ao longo das últimas décadas, o custo da energia produzida por esses sistemas continua sendo elevado, quando comparado à energia produzida por sistemas convencionais.

2.3.2.2 Aquecimento de ambientes

Os sistemas solares para aquecimento de ambientes, segundo HINRICHS & KLEINBACH (2003), são divididos em passivos e ativos. Para o aquecimento solar passivo de ambientes, a própria edificação pode funcionar como coletor solar e estrutura de armazenamento de calor. O fluxo da energia térmica ocorre por meios naturais, nenhum tipo de equipamento mecânico como bombas e ventoinhas é utilizado. O sistema passivo faz uso do fato de que a quantidade de energia solar transmitida através das janelas durante um dia claro é maior que o calor perdido através delas durante um período de 24

horas. Para se reduzir os efeitos de superaquecimento e armazenar a energia solar que entra, os sistemas passivos fazem uso do material da própria construção. Alguns objetos têm a capacidade de absorver grandes quantidades de energia térmica. Estes objetos são feitos de materiais como o concreto, água e pedras e são chamados de massa térmica. Os elementos essenciais de um sistema solar passivo são: um excelente isolamento térmico, a coleta de energia solar e estruturas de armazenamento térmico.

Para FERRARO *et al.* (2001), a captação passiva é o processo mais antigo e rudimentar de uso da energia solar de que se tem conhecimento. Quando faz suas habitações, estrategicamente situadas para ter uma boa insolação, ao posicionar janelas e telhados de modo a receber uma maior quantidade de radiação do Sol, ao se preocupar em construir estufas para o cultivo de plantas, o homem está cuidando de melhorar o rendimento da captação passiva da energia solar. Essa captação vem sendo aprimorada ao longo do tempo e, atualmente, existem muitos projetos arquitetônicos, visando otimizar esse aproveitamento energético.

Os sistemas ativos de aquecimento de ambientes são aqueles em que o calor é fornecido a partir de um tanque de armazenamento, com a utilização de radiadores de rodapé. Na captação da energia solar podem ser utilizados coletores de placas planas ou concentradores parabólicos. Porém, os custos econômicos têm impedido sua popularização (HINRICHS & KLEINBACH, 2003).

2.3.2.3 Refrigeração

De acordo com PALZ (2002), do ponto de vista técnico, a utilização da energia solar é ainda mais adaptada à refrigeração do que ao aquecimento. Em relação à refrigeração, a demanda ocorre no momento em que a energia solar é abundante. Não há necessidade de armazenamento térmico e os sistemas de climatização podem ser auto-suficientes, sem que seja preciso recorrer a uma fonte auxiliar de calor. Segundo DANIELS (1982), de todos os usos possíveis da energia solar, aquele recebido com mais entusiasmo em todo o mundo é o resfriamento de ambientes. A refrigeração solar de edifícios tem a

vantagem de que é, usualmente, mais necessária quando a radiação solar é mais intensa. Nesse sentido, para COMETTA (1982), a refrigeração pela energia solar tem a vantagem de apresentar carga máxima, isto é, exige a máxima potência refrigerante justamente quando é máxima a radiação solar.

2.3.2.4 Estufas

PALZ (2002) afirma que as casas de vidro ou plástico permitem acumular energia por efeito de estufa e, assim, cultivar plantas com bom rendimento. Nos climas muito frios é necessário auxiliar o aquecimento com outros combustíveis. As estufas de plástico são muito utilizadas também em países quentes, porque, estima-se, a produtividade pode ser multiplicada por um fator de até cinco, em comparação com as culturas convencionais. O uso de estufas também permite, nos países quentes, uma economia substancial de água. Já há desenvolvimento tecnológico para aliviar dois problemas que ainda persistem nas estufas: aquecimento excessivo no meio do dia no verão e resfriamento durante a noite. São exemplos dessa tecnologia: a utilização de plásticos de transmissão espectral mais apropriada para filtrar a radiação e a utilização de uma camada de água circulando sobre o vidro da estufa.

2.3.2.5 Secadores

PALZ (2002) explica que dois princípios básicos podem ser empregados para secagem de produtos agrícolas. No primeiro, um coletor solar orientado para o norte está ligado a um recipiente fechado no qual se colocam as substâncias que devem ser secadas. A extremidade inferior do coletor solar é aberta e recebe ar fresco pelo efeito de termossifão, que pode ser reforçado por uma convecção forçada. O ar é aquecido no coletor e atravessa o recipiente. A temperatura do ar no recipiente pode ser controlada pela variação do fluxo de ar, com ajuda de um ventilador. Assim, é possível escolher a melhor temperatura para cada tipo de produto. No segundo método, o aquecimento do ar se efetua no interior do espaço reservado à secagem. Os

produtos, especialmente madeira e tijolos, são envoltos por material plástico, com aberturas para a circulação de ar. Ocorre então o efeito de estufa e aquecimento do ar nos espaços livres.

2.3.2.6 Fogões

Segundo PALZ (2002), uma caixa com tampa de vidro, de frente para o Sol, pode servir de fogão solar. Para acompanhar o movimento do Sol é necessário proceder a uma orientação a cada quinze minutos. As temperaturas de cozer e assar podem ser atingidas dentro da caixa. Todavia, os fogões solares não são de manuseio prático. É preciso deslocar o forno continuamente e o tempo de cocção é longo. De acordo com HINRICHS & KLEINBACH (2003), o uso da energia solar para cozinhar remonta, pelo menos, à metade do século XVIII. Em 1767, o cientista suíço H. B. de Saussure obteve temperaturas altas o suficiente para cozinhar em uma caixa isolada com várias camadas de vidro. Mouchot aprimorou esse processo na década de 1860, utilizando um refletor parabólico para focalizar a radiação solar em um recipiente de cobre escurecido, que continha a comida, que foi inserido em um recipiente de vidro.

2.3.2.7 Dessalinização de água

BRANCO (2003) chama de dessalinização o processo destinado a transformar a água do mar em água potável, porém alerta que alguns especialistas preferem o termo dessalgamento, pois este processo não se destina a remover toda a salinidade marinha, mas somente o excesso de sais da água, tornando-a potável.

Um método antigo de dessalinização da água do mar consiste em construir um reservatório longo e contínuo, com telhado de vidro em declividade. Quando a radiação solar atravessa o telhado, a água se aquece e evapora, enquanto o sal se cristaliza e se sedimenta no fundo do reservatório. A água não consegue passar pelo telhado, fica retida e escorre para as

beiradas, gotejando em calhas laterais, por onde escoam. Esse processo é lento e de baixo rendimento, porque nas calhas laterais também há evaporação da água (STRAZZACAPPA & MONTANARI, 2003).

Segundo PALZ (2002), a água potável contém cerca de 0,05% de sólidos dissolvidos, sendo tolerado até 0,15%. A água do mar contém uma concentração salina de 3,44%. Os destiladores solares conseguem um baixo rendimento, da ordem de 0,1%. Um maior rendimento para o sistema pode ser obtido aumentando-se a temperatura da salmoura, usando uma quantidade mínima de água por área exposta, por concentração de luz solar ou outros meios. O rendimento pode ser também aumentado por um resfriamento artificial da chapa de vidro do condensador.

2.3.2.8 Aquecimento da água de piscinas

De acordo com HINRICHS & KLEINBACH (2003), os coletores para piscinas são do tipo placa plana e operam em temperaturas inferiores a 45°C. Segundo PALZ (2002), a água da piscina é enviada ao coletor por uma bomba, podendo ser a mesma bomba do filtro. Normalmente, utiliza-se uma superfície de dimensões aproximadamente iguais às da piscina.

Piscinas residenciais operam em temperaturas entre 25°C e 28°C. Em academias de natação pode-se chegar aos 30°C. Os coletores solares para piscinas são de dois tipos: abertos e fechados. O coletor aberto não possui vidro e isolamento térmico e pode ser feito com tubulação de cobre coberta por aletas ou por uma serpentina constituída de tubulação em termoplástico, usualmente polipropileno. Os coletores fechados são mais utilizados em piscinas de regiões muito frias ou com muita incidência de ventos. Para a circulação da água entre a piscina e os coletores, utiliza-se uma motobomba que pode ser acionada manualmente ou por um controlador eletrônico. Neste caso, existem sensores que medem a temperatura da água nos coletores e na piscina. Quando a água nos coletores está com uma temperatura, aproximadamente, 4°C maior do que na piscina, o controlador aciona a bomba que realiza a circulação da água. Com a circulação da água pelos coletores e/ou uma queda no índice de radiação solar, a diferença passa a ser muito

pequena e o controlador desliga a bomba. O controlador da bomba possui, também, função anticongelamento. Quando a temperatura nos coletores fica muito baixa, próxima aos 6°C, ele aciona a motobomba circulando a água da piscina, mais quente, para os coletores. É recomendada a utilização de capa térmica em plástico bolha no período noturno ou em dias chuvosos para a redução das perdas de calor pela superfície, que são as perdas mais importantes no caso de piscinas (SOLETROL, 2001).

2.3.2.9 Aquecimento de água potável residencial

Segundo RODRIGUEZ (1991), a água não é boa absorvente direta da energia solar, salvo em certas profundidades e contendo salinidade ou outros elementos que colaborem para o processo de absorção. Por isso, em geral, os aquecedores de água por energia solar utilizam a capacidade de absorção de outras superfícies, muitas vezes metálicas que, em seguida, transferem seu calor para a água.

De acordo com CABIROL, PELISSOU & ROUX (1980), entre todas as utilizações possíveis da energia solar, uma das mais imediatas e mais simples é o aquecimento de água para uso doméstico. Seu principal inconveniente é a impossibilidade de se obter água quente constante e em quantidade ilimitada como, por exemplo, em um aquecedor elétrico. Para BRINKWORTH (1982), um dos métodos diretos mais interessantes para a utilização da energia solar é a calefação de edifícios situados em locais de climas frios ou a produção de água quente para residências, colégios, fábricas, hospitais, etc.

LAMBERTS, DUTRA & PEREIRA (1997) afirmam que o aquecimento de água pode representar uma grande fatia do consumo de eletricidade em edificações. Os sistemas mais comuns são o chuveiro elétrico, o aquecedor elétrico de passagem, o aquecedor elétrico de acumulação, o aquecedor a gás de passagem, o aquecedor a gás de acumulação e o aquecedor solar de acumulação com *backup* elétrico.

BRAZIL (2006) explica que uma grande virtude do aquecimento de água com energia solar é a redução do consumo de energia no horário de pico, ou seja, entre 19 e 21 horas nas residências, quando há um grande aumento

de demanda de energia em decorrência do hábito das pessoas de tomarem banho em chuveiro elétrico.

Segundo PEREIRA *et al.* (2003), no Brasil, a geração de energia elétrica é de origem essencialmente hidráulica e a forma de aquecimento de água adotada na grande maioria das residências é o aquecedor elétrico de passagem. Para as concessionárias de energia um problema decorre do uso do chuveiro elétrico: sua utilização no horário de ponta de consumo de energia, compreendido entre as 17 e 21 horas. Neste horário, pode-se atingir até cinco vezes a demanda média de potência requerida, sendo que a participação dos chuveiros elétricos na demanda em horário de ponta varia em torno de 25%, chegando a atingir, em algumas concessionárias brasileiras, valores de até 50%. O potencial brasileiro de conservação de energia no aquecimento de água é bastante significativo, apontando-se a aplicação, em larga escala, dos aquecedores de água por energia solar como uma saída extremamente viável e competitiva.

Para BROWN & DE KAY (2004), os sistemas de aquecimento solar de água apresentam muitos benefícios: reduzem o consumo de energia elétrica ou outro combustível usado, diminuem a poluição e são economicamente atraentes. Segundo SANTOS & NASCIMENTO FILHO (2002), na área rural, a disponibilidade de energia convencional, eletricidade ou gás, é ausente ou cara, dada a dispersão da população e sua distância dos recursos energéticos tradicionais. Assim, a energia solar pode substituir ou economizar as fontes convencionais de energia.

2.4 Sistema de Aquecimento de Água por Energia Solar

Para TRANSEN (2004), os aquecedores solares são, ao mesmo tempo, captadores e armazenadores de uma energia gratuita. Constituem uma microssistema capaz de produzir energia, sob a forma de aquecimento de água, no mesmo local em que será utilizada. Compõe-se de um conjunto de coletores solares, um reservatório térmico, um sistema de circulação de água e um sistema auxiliar de aquecimento elétrico.

De acordo com CHANG, SHEN & HUANG (2002), o desempenho de um aquecedor solar de água é afetado por parâmetros de desenho, por condições climáticas e pela capacidade do aquecedor solar de água.

Segundo CABIROL, PELISSOU & ROUX (1980), um sistema de aquecimento de água por energia solar compõe-se, geralmente, de três partes: captação, armazenagem e distribuição. Estas partes podem estar separadas em sistemas próprios, que são os conjuntos mais comuns utilizados no Brasil ou integradas, com a própria placa servindo de condutor do fluido ou com a utilização de tubos. De acordo com BUDIHARDJO, MORRISON & BEHNIA (2007), os primeiros são chamados de *flat-plate collectors* e os últimos *evacuated tube collectors*, sendo estes de melhor desempenho em temperaturas altas, pela redução das perdas de calor por convecção para o ambiente. Ambos são denominados aquecedores *water-in-glass*. Para HUSSEIN (2003), comparado com sistemas integrados, o sistema com duas fases separadas (captação e armazenagem) tem as vantagens de, por exemplo: maior resistência à corrosão, maior facilidade de proteção contra congelamento, necessitar de capacidades menores de armazenagem e resposta rápida às mudanças de intensidade de radiação solar, o que confere ao sistema um aumento diário de eficiência nos dias nublados. Segundo FAIMAN, HAZAN & LAUFER (2001), há maior perda de energia térmica durante à noite nos sistemas integrados de coleta e armazenagem porque, por sua configuração, estas partes ficam expostas ao ambiente.

Conforme FANTINELLI, PEREIRA & PEREIRA (2006), a eficiência energética média dos coletores brasileiros para banho varia de 40% a 59,9%.

2.4.1 Captação

Para CABIROL, PELISSOU & ROUX (1980), a captação da irradiação solar para aquecimento da água de uso doméstico utiliza quase sempre as propriedades do corpo negro e o efeito de estufa.

2.4.1.1 O coletor solar com efeito de estufa

Segundo PEREIRA *et al.* (2003), o coletor solar é um equipamento simples do ponto de vista da engenharia de processo de fabricação, sendo responsável pela absorção e pela transferência da radiação solar para o fluido de trabalho, normalmente água, sob a forma de energia térmica.

O coletor solar é composto de vidro, chapa enegrecida de alumínio ou de cobre, serpentina de tubos de cobre, isolante térmico e uma caixa de alumínio. É o elemento ativo do aquecedor solar. O aquecimento da água ocorre quando a radiação solar atravessa o vidro, atingindo a placa enegrecida de alumínio ou de cobre que a absorve e a transforma em calor, conduzindo-a até os tubos de cobre da serpentina, nos quais a água circula, retira o calor e o carrega para o reservatório térmico. A base da placa é a caixa de alumínio, enquanto que sua parte superior é o vidro. A vedação destes elementos é feita com borracha de silicone. O que ocorre dentro do coletor solar é definido como efeito estufa (TRANSEN, 2004).

O coletor solar capta, por meio de uma superfície plana e fixa, as irradiações, diretas e difusas, que são imediatamente absorvidas e transformadas em calor. Quando se expõe a água diretamente ao sol, verifica-se que há um aumento de alguns graus em sua temperatura e, em seguida, uma estabilização. Nesta posição de equilíbrio, a água, conforme recebe energia também a perde, na mesma proporção, por evaporação, por emissão para o espaço de irradiação infravermelha, por convecção do ar ambiente e por condução para os materiais que constituem o recipiente de água. Para aumentar a temperatura de equilíbrio atingida pela água, é necessário diminuir as perdas e isso é obtido colocando-se um vidro por cima da água e isolando, o melhor possível, o recipiente das perdas de calor. Assim, na maior parte das vezes, um coletor será constituído de uma superfície absorvente, um isolamento térmico lateral e posterior, uma cobertura transparente diante da superfície absorvente, mais um circuito de fluido situado por baixo da superfície absorvente e destinado a conduzir o vapor ou a água aquecida para o local de acumulação ou de utilização e, na parte posterior,

uma caixa para manter rígido o sistema (CABIROL, PELISSOU & ROUX, 1980).

a) Superfície absorvente

Para CABIROL, PELISSOU & ROUX (1980), é a superfície absorvente que capta a irradiação. Pode ser de plástico, de cobre, de alumínio ou de aço. Normalmente é revestida por uma fina camada de pintura baça, para evitar reflexão, e escura, para uma boa absorção. Esta tinta deve resistir a temperaturas próximas a 100°C e ser o mais fina possível, já que as tintas, em geral, são más condutoras de calor.

Segundo PEREIRA *et al.* (2003), a placa absorvente, também chamada de aleta, é fabricada em cobre ou em alumínio e é responsável pela absorção e pela transferência da energia solar para o fluido de trabalho. São, normalmente, pintadas de preto fosco, para uma melhor absorção da energia solar. No mercado internacional, há preponderância de superfícies seletivas, enquanto no mercado brasileiro empregam-se tintas comerciais.

b) Isolamento térmico

De acordo com CABIROL, PELISSOU & ROUX (1980), o isolamento em torno da célula de captação deverá ser muito bom. Geralmente, o isolamento térmico é constituído por 5 a 10 cm de lã de vidro, situada por trás da superfície absorvente, mas pode ser utilizada a espuma de poliuretano. PEREIRA *et al.* (2003) informam que os materiais isolantes mais utilizados na indústria brasileira são lã de vidro ou de rocha e espuma de poliuretano, colocados na base e nas laterais do coletor, e sua função é minimizar as perdas de calor para o meio.

c) Cobertura transparente

Segundo PEREIRA *et al.* (2003), a cobertura transparente é, geralmente, de vidro, policarbonato ou acrílico.

O vidro impede que entre no coletor água de chuva, materiais sólidos, poeiras, etc., e tem como finalidade principal provocar um efeito estufa, ou seja, a luz do sol, incidindo diretamente nessa superfície, faz que parte dela penetre no interior do coletor, refletindo outra parcela de luz; na reflexão, a luz,

composta basicamente de raios infravermelhos que não conseguem ultrapassar a camada de vidro, provoca um aquecimento interno que ajudará no aquecimento da água que está circulando na tubulação de cobre (PANESI, 2006).

Se não houver cobertura, o ar exterior encosta na superfície absorvente e não lhe permite aquecer muito. O vidro limita as perdas por convecção. O espaço ideal entre o vidro e a superfície absorvente é de 28 mm. A cobertura transparente deve produzir o efeito de estufa, ou seja, deve deixar passar a irradiação solar e recuperar o mais possível a irradiação emitida pela superfície absorvente. A irradiação solar chega à cobertura transparente e, se esta for de vidro, irá atravessá-la quase integralmente, atingindo a superfície absorvente. Pintada de maneira a se aproximar o mais possível de um corpo negro, ela absorve o máximo de irradiação e aquece. A superfície absorvente irá irradiar em um comprimento de onda entre 4 e 70 micras, diferente, portanto, daquela recebida do Sol, de 0,25 e 2,5 micras. A irradiação emitida pela superfície absorvente será absorvida pelo vidro, que irá aquecer e irradiar para as duas faces, para o meio ambiente e para o interior do captador solar. A superfície absorvente recebe, portanto, a irradiação solar aumentada de metade da irradiação do vidro, que é o efeito de estufa. O vidro não é totalmente transparente e reflete 7,5% da irradiação incidente. Aumentando-se o número de vidros, para recuperar parte das perdas, ocorrerá, também, uma diminuição da transparência global e o que se precisa observar é se, ao acrescentar vidros, a perda de transparência é ou não superada pelo calor recuperado. O que se observa na prática é que, para água entre 20°C e 30°C, não é necessário usar vidro; para água entre 30°C e 55°C, é preferível um vidro e para água entre 55°C e 100°C, dois vidros. Verifica-se, também, que um vidro atende à maioria dos casos; com dois vidros, o coletor será menos sensível ao vento, porém, a diferença, será muito pequena e terá como inconvenientes: folgas de dilatação, redução de transparência, dificuldades de montagem e aumento no preço. O material mais utilizado na cobertura transparente é o vidro liso de quatro milímetros. O vidro martelado com cinco milímetros, o vidro aramado e o temperado também podem ser utilizados, além das películas plásticas, pois são leves e baratas, porém envelhecem sob a ação dos raios ultravioletas e devem ser substituídas periodicamente. Algumas

películas, como o polietileno, entretanto, não podem ser utilizadas, porque são transparentes aos raios infravermelhos e deixam passar toda a irradiação do elemento absorvente, não ocorrendo, portanto, o efeito de estufa (CABIROL, PELISSOU & ROUX, 1980).

A cobertura transparente do coletor solar deve ser instalada de forma a proporcionar estanqueidade, isto porque a água que penetrar na caixa (água de chuva e umidade do ar) diminuirá seu rendimento de três maneiras. A primeira: durante o funcionamento do captador para baixa temperatura (no início e final de operação ou arranque e paragem); a umidade do ar no captador vai se condensar na face interna do vidro, tornando-o menos transparente, ou seja, um coletor solar cujo ar esteja úmido arrancará mais tarde e parará mais cedo do que o mesmo sistema com ar seco. A segunda: se o coletor não for estanque, poeira e outras sujeiras poderão entrar, depositando-se sobre a superfície absorvente, tornando-a menos absorvente e sobre a face interna do vidro, tornando-o menos transparente. A terceira: o risco de molhar o isolante térmico, pois, se ele for de lã de vidro, por exemplo, essa lã molhada se torna um bom condutor e deixa de ser um isolante térmico (CABIROL, PELISSOU & ROUX, 1980).

d) Circuito termotransportador

O circuito termotransportador é o sistema de tubos que permite que a água flua dentro do captador e, deste, até o depósito de água quente ou *boiler*.

Segundo PEREIRA *et al.* (2003), os tubos no interior do coletor, também chamados de flauta, pelos quais o fluido escoar, geralmente são feitos de cobre, devido a sua alta condutividade térmica e resistência à corrosão.

O circuito termotransportador deve permitir a recuperação do calor obtido na superfície absorvente tendo com ela, portanto, o melhor contato. Para isso, pode-se utilizar a água passando em película, como uma grande canalização das dimensões da superfície absorvente ou tubos, que podem ter perfil retangular ou circular. Neste caso, ou seja, com a utilização de tubos, o calor tem mais dificuldade em passar da placa absorvente para a água. Soluciona-se este problema, deformando-se a placa absorvente para que tenha um maior contato com o tubo ou soldam-se os tubos em todo o seu comprimento (CABIROL, PELISSOU & ROUX, 1980).

e) Caixa exterior

A função da caixa é manter rígido o conjunto e garantir a impermeabilidade. Como os esforços mecânicos são pequenos, não necessita de grande resistência. Pode ser metálica, de fibra, de material plástico e até de madeira. Em geral tem 5 a 10 cm para o isolamento, 2 a 3 cm para o elemento absorvente e 2 a 3 cm para a camada de ar, ou seja, entre 10 e 16 cm de altura (CABIROL, PELISSOU & ROUX, 1980).

Segundo PEREIRA *et al.* (2003), a caixa externa é fabricada, geralmente, em perfil de alumínio, com chapa metálica dobrada ou material plástico.

2.4.1.2 Montagem dos coletores

Para CABIROL, PELISSOU & ROUX (1980), a montagem pode ser feita em série ou em paralelo. Quando os coletores são montados em série, é a mesma água que atravessará todos os coletores, um após o outro, e aquecerá cada vez mais em cada um deles. Aqui se verifica que os coletores vão funcionar a temperaturas diversas e crescentes, desde a entrada até a saída. Quanto maior for a temperatura de funcionamento do coletor, menor será seu rendimento. Portanto, deve-se cuidar, especialmente, o último coletor, com um bom isolamento e, eventualmente, com vidro duplo. Como a água deverá passar pelos coletores, uns a seguir dos outros, a resistência à sua passagem será elevada e essa montagem não permitirá o funcionamento em termossifão, necessitando de circulação forçada. Concordam KUMAR & KUMAR (1997), afirmando que o sistema forçado é o preferido quando os coletores são ligados em série.

Quando os coletores são montados em paralelo, cada um deles elevará a temperatura da água de uma só vez. Eles funcionam todos da mesma maneira, elevando cada um deles a temperatura da água que o atravessa na mesma quantidade. Portanto, em paralelo, a resistência a vencer pela água será menor e o termossifão é possível.

2.4.1.3 Tipos de coletores

Os coletores podem ser verticais, quando a serpentina em cobre com tubos de elevação fica no sentido longitudinal do captador; e horizontais, quando os tubos de elevação da serpentina ficam posicionados no sentido transversal. Nos dois casos, os tubos de elevação são instalados verticalmente, para permitir a operação por termossifão (TRANSEN, 2004).

FAN, SHAH & FURBO (2007) apresentam um coletor com os tubos instalados horizontalmente, com aspecto externo semelhante ao horizontal citado acima, porém, no caso deles, o sistema deve ser forçado.

2.4.1.4 Direcionamento e inclinação dos coletores

O coletor solar capta seu máximo de energia quando está perpendicular aos raios solares. A inclinação dos raios varia durante o dia e conforme as estações do ano. Como os coletores são fixos, devem ser orientados para o norte, para aproveitar ao máximo os raios durante o dia e inclinados com relação à horizontal, com um ângulo igual à latitude do lugar, com mais cerca de 10°. Pode-se fazer uma regulagem sazonal, com o coletor mais inclinado no inverno e menos no verão, porém, para isto, há necessidade de ligação elástica entre o coletor solar e o tubo termotransportador (CABIROL, PELISSOU & ROUX, 1980).

Segundo CREDER (2006), para maior eficiência do sistema, o coletor solar deverá estar instalado, relativamente ao plano horizontal, em um ângulo correspondente à latitude do local, acrescida de 5 ou 10° e, em relação à direção, deverá estar orientado para o norte geográfico, ou seja, o norte magnético mais uma declinação de 10° para o nordeste.

CABIROL, PELISSOU & ROUX (1980) explicam que, como se quer água quente durante todo o ano, deve-se colocar o captador orientado para o norte e inclinado na horizontal de forma a ficar perpendicular aos raios do Sol durante a maior parte do ano, ou seja, com um ângulo igual à latitude do lugar mais cerca de 10°.

De acordo com ARRUDA (2004), para os coletores planos e fixos sem rastreamento do movimento aparente do sol, a condição ao longo do ano que resulta em maior tempo de exposição é obtida quando a inclinação é igual à latitude local e que, no inverno, a inclinação deve ser maior para compensar a desfavorável declinação do sol. SANTOS & ROSA (2002) afirmam que o posicionamento deve favorecer a situação mais crítica, no caso o inverno, época em que normalmente se consome mais água quente e que a melhor inclinação para um melhor aproveitamento solar é aquela em que é igual à latitude do local mais dez graus. De acordo com a NBR 12269/92, o ângulo de inclinação com a horizontal deve ser igual ao da latitude do local acrescido de 10° (ABNT, 1992).

Para a instalação do coletor solar deve-se considerar o fato de que, tomando-se a Terra como referência, o Sol traça trajetórias diárias paralelas e seqüenciais, extremado-se para o sul no dia 21 de dezembro e para o norte no dia 21 de junho (entrada do inverno no hemisfério sul), quando atinge a inclinação ao meio-dia real do local em questão, de latitude acrescida de $23,5^\circ$, em relação à linha vertical imaginária deste local. Como se necessita da água mais quente quando a temperatura ambiente é mais fria e, nesta época, a densidade de fluxo de radiação solar é a menor do ano, por causa da reflexão e difração dos raios solares na entrada da atmosfera e pelo fato de não atingir a superfície do local perpendicularmente, deve-se posicionar o plano dos coletores de tal forma que receba a maior insolação possível no inverno e no horário em que a insolação é máxima durante o dia, ou seja, ao meio-dia real. Isto se consegue, no hemisfério sul, direcionando-se o plano dos coletores para o Norte Verdadeiro, com um ângulo de inclinação ao plano horizontal igual à latitude, acrescida de 15 graus (TRANSEN, 2004).

2.4.1.5 Sistema contra congelamento

Como todos os circuitos de fluidos ao ar livre, é necessário prever uma proteção contra congelamento, para evitar a ruptura do coletor solar no inverno. São soluções possíveis: esvaziar o circuito durante os períodos em que a geada pode acontecer, utilizar para o circuito um material que suporte as

dilatações que ocorrem devido ao congelamento ou misturar no circuito um anticongelante, o que tira a potabilidade da água. Esta última solução apresentada pode ser resolvida com a utilização de um trocador de calor: faz-se a água com fluido anticongelante circular no coletor num circuito fechado, passando por uma serpentina instalada no depósito de água quente. Pode-se, também, utilizar líquidos de baixo ponto de solidificação (CABIROL, PELISSOU & ROUX, 1980).

De acordo com TRANSEN (2004), em local muito frio e com possibilidade de ocorrência de geadas, é aconselhável a colocação de válvula contra congelamento, para diminuir o risco de os tubos de cobre estourarem dentro dos coletores solares. Deve ser usada uma válvula para cada cinco coletores. A válvula deve ser colocada entre o tubo de alimentação do coletor e o registro de drenagem, sempre na posição vertical, com o sensor de cobre voltado para baixo e dentro da conexão.

Segundo RISPOLDI (2001), a válvula contra congelamento consiste, essencialmente, numa válvula solenóide de baixa potência elétrica, que regula um dispositivo de abertura e de fechamento de um minirregistro, cuja função específica é esvaziar os coletores na presença de água a 4 °C.

Para DANIELS (1982), a ruptura dos condutores metálicos por causa das geadas é um problema sério. Não é conveniente, nem seguro, esvaziar o sistema nas noites frias. Em alguns locais, recomenda-se um sistema duplo, com um coletor que utilize uma solução contra congelamento, etileno, por exemplo. Internamente ao depósito de água quente existe uma serpentina por onde a solução passa e transfere seu calor para a água.

2.4.2 Armazenagem de água quente

Para TRANSEN (2004), o aquecedor de água por energia solar é um aquecedor central de acumulação. A água é aquecida durante as várias horas do dia para ser utilizada em alguns momentos, principalmente à noite e nas primeiras horas da manhã. Assim, o reservatório tem a função de armazenar e de manter a água quente dia e noite.

ARRUDA (2004) explica que o aquecimento de água com energia solar configura-se como um sistema central de acumulação. A água aquecida gradativamente durante o dia é armazenada para a utilização nos momentos de consumo, inclusive durante a noite.

Segundo LYLE (1994), devido à diferença entre a hora de incidência de radiação solar e a hora de utilização de água quente, o sistema de aquecimento de água por energia solar requer um tanque para depósito de água quente.

PEREIRA *et al.* (2003) afirmam que os reservatórios térmicos, também chamados *boilers*, são tanques utilizados para armazenar a água quente proveniente do coletor solar, de modo a atender à demanda diária, mesmo fora dos horários de incidência solar. São constituídos por um corpo interno cilíndrico, geralmente em aço inoxidável ou cobre, termicamente isolado, para minimizar as perdas de calor para o ambiente.

Para RODRIGUEZ (1991), a água no depósito se estratifica, de mais fria para mais quente de baixo para cima, podendo esta diferença ser, por exemplo, de 2°C. Por esse motivo, a tubulação para o uso da água quente deverá estar localizada na parte superior e a entrada, vinda do coletor, deve estar na parte inferior.

De acordo com TRANSEN (2004), o reservatório térmico fechado pode ser instalado de duas maneiras: alimentado por baixa pressão ou por alta pressão.

2.4.2.1 Alimentação do *boiler*, com água fria, por baixa pressão

Com uma ou mais caixas de água, que não precisam ser exclusivas e que devem estar com seus fundos, no mínimo, a 20 cm acima do nível superior do reservatório térmico e este, no mínimo, a 10 cm acima do lado superior dos coletores. A altura das caixas de água não deverá exceder à pressão máxima de trabalho do reservatório térmico, que é de 5 mca. A tubulação de alimentação deve ser exclusiva, ter registro de gaveta e fazer um sifão de, no mínimo, 50 cm acima de sua parte mais baixa e próxima ao reservatório térmico, com o objetivo de evitar o retorno de água quente para a tubulação de

alimentação. A tubulação de alimentação dos coletores deve ter registro de gaveta e uma queda mínima de 3%. A partir deste ponto, a tubulação deverá estar sempre subindo com inclinação mínima de 3%.

2.4.2.2 Alimentação do *boiler*, com água fria, por alta pressão

A pressão máxima de trabalho para estes reservatórios é de 40 mca. Deve possuir o sifão de 50 cm, como no reservatório alimentado por baixa pressão. Antes do sifão, deve-se fazer um cavalete passando, no mínimo, 30 cm acima do nível superior do reservatório térmico, em que haverá uma conexão em tê com sua boca central virada para cima. Nesta conexão são ligadas uma válvula ventosa, uma válvula de retenção vertical ou uma válvula quebra-vácuo e uma válvula de alívio de pressão, jogando as descargas para fora do telhado. Antes do cavalete, deve-se colocar registro de gaveta. A saída para o consumo deverá ter respiro, como no sistema de baixa pressão e válvula ventosa, válvula de retenção vertical ou válvula quebra-vácuo e registro de gaveta para entrada de ar, durante a drenagem do equipamento.

2.4.2.3 *Boiler* com sistema auxiliar de aquecimento

PEREIRA *et al.* (2003) afirmam que, por ser a incidência de radiação solar intermitente, alternando dias e noites, além da ocorrência de períodos nublados e chuvosos, o sistema de aquecimento de água por energia solar deve sempre prever uma forma de aquecimento auxiliar, elétrica ou a gás.

Segundo PRAPAS (1995), na Grécia são comumente utilizados aquecedores elétricos com capacidade de 80 a 100 litros, instalados sobre os banheiros com a função de aquecimento complementar ao solar e podem estar ligados em série ou em paralelo com o sistema de aquecimento de água por energia solar.

Para SHARIAH & LÖF (1997), um sistema de aquecimento de água por energia solar, normalmente, provê de 50 a 80% do consumo de água quente. O restante deve ser provido pela adição de um sistema auxiliar de aquecimento.

De acordo com MORRISON, ANDERSON & BEHNIA (2004), os sistemas de aquecimento de água por energia solar necessitam de um sistema auxiliar de aquecimento durante os períodos de baixa radiação solar. Segundo DANIELS (1982), na maior parte dos climas é necessária a calefação auxiliar. A maneira mais conveniente e barata é com uma resistência elétrica de imersão colocada no depósito e governada por um termostato, que a liga quando a temperatura estiver abaixo de um nível pré-determinado.

O sistema auxiliar elétrico é composto de resistência elétrica de imersão blindada e termostato de encosto. A resistência elétrica é responsável pelo aquecimento da água no caso de falta de insolação ou de excesso de consumo de água quente e seu acionamento é comandado automaticamente pelo termostato de encosto. Em residências, é aconselhável manter o disjuntor normalmente desligado e só acionado pelo usuário quando for necessário, para garantir que não haja consumo desnecessário de energia elétrica durante a noite, depois que todos já utilizaram o sistema (TRANSEN, 2004).

2.4.3 Distribuição de água quente

A tubulação que leva água quente dos coletores para o reservatório deve ter registro de gaveta, ser isolada termicamente e, a partir dos coletores, deverá também estar sempre subindo com inclinação mínima de 3%, até o reservatório térmico. A saída para o consumo deve ser isolada termicamente e antes do registro de gaveta deve ser feito o respiro que deverá passar, no mínimo, 30 cm acima do nível máximo das caixas de água, o que evitará pressões positivas ou negativas, em relação à pressão atmosférica (TRANSEN, 2004).

A NBR 12269 sugere a instalação de meios para limitar a pressão do reservatório térmico a valores que não excedam os limites de pressão especificados pelo fabricante e um dispositivo de alívio de pressão deve ser utilizado para este propósito: respiro, válvula de alívio ou válvula quebra-vácuo. No caso de respiro, a tubulação deve ser livre, desobstruída e aberta à atmosfera o tempo todo (ABNT, 1992).

2.4.4 Funcionamento do sistema de aquecimento de água por energia solar

De acordo com CABIROL, PELISSOU & ROUX (1980), a água aquecida no coletor e enviada para o depósito é substituída por água fria, que, por sua vez, é aquecida e vai para o *boiler* e, assim, sucessivamente. Em seu percurso do captador ao depósito, a água pode circular por si só, em circulação natural ou ser impulsionada por uma bomba, em uma circulação forçada.

A água fria circula entre o reservatório e os coletores, pelos tubos de cobre. Os coletores solares captam o calor da energia solar e o transferem para a água que circula em seu interior. A água aquecida retorna ao reservatório térmico, onde ficará armazenada até seu consumo. A sua circulação pelos coletores se dá de duas maneiras: forçada ou bombeada e natural ou termossifão (SOLETROL, 2001).

2.4.4.1 Circulação natural

A água colocada em uma chaleira ao fogo adquire um movimento convectivo, que permite levar o calor para todo o líquido. Esta convecção é um movimento cíclico. Retirando a chaleira do fogo, ao final da convecção, ocorre uma estratificação da água, com as camadas mais frias abaixo. Por sua vez, a água aquecida no coletor sobe por convecção ao depósito, entrando por sua parte superior. É um fluxo lento. Como o circuito é fechado, a água da parte inferior do depósito, que está mais fria que o restante, desce pela tubulação, estabelecendo um sentido de circulação da água (RODRIGUEZ, 1991).

De acordo com PRAPAS (1995), o sistema por termossifão é de fácil operação e de custo inferior, quando comparado com sistemas forçados.

Para BELESSIOTIS & MATHIOULAKIS (2002), a eficiência combinada com a simplicidade de construção, autonomia na operação, ausência de partes móveis e conseqüente baixa manutenção, fazem dos sistemas por termossifão uma alternativa interessante para sistemas forçados de aquecimento solar.

A Figura 2 representa, esquematicamente, como deve ser montado um sistema de aquecimento de água por energia solar em termossifão. A

configuração: reservatório de água fria acima do *boiler*, e este acima da parte superior do coletor, garantem a circulação natural.

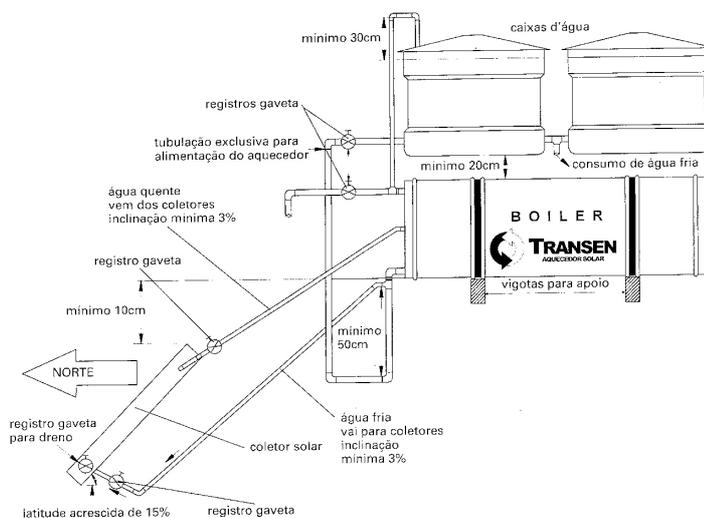


Figura 2 - Esquema de ligação de um sistema de aquecimento de água, por energia solar, para funcionar por termostifão.

Fonte: TRANSEN (2004).

A circulação ocorre devido à diferença de densidade entre a água fria e a água quente, realizando a movimentação. É um sistema simples de pouca manutenção e muito confiável. Sua aplicação é indicada para instalações residenciais e pequenas instalações comerciais e industriais. Suas vantagens são: não consumir energia para promover a circulação da água, e dispensar, quase que totalmente, qualquer tipo de manutenção, que fica mais restrita à limpeza dos vidros (SOLETROL, 2001).

De acordo com CABIROL, PELISSOU & ROUX (1980), a água é aquecida no captador e diminui de densidade. É, então, forçada a subir para o *boiler* pela ação de uma água mais fria e mais densa, que será, por sua vez, aquecida e, assim, sucessivamente. A essa circulação natural, e bastante lenta (com picos de $0,4L \cdot min^{-1}$), dá-se o nome de termostifão.

PALZ (2002) explica que o efeito de termostifão, provocado pela convecção por gravidade, pode, em pequenas instalações, garantir a circulação da água. Havendo sol, o fluido aquecido no coletor se desloca para cima, pois sua densidade é inferior a do fluido não aquecido. O circuito estando fechado, o fluido quente é substituído pelo frio que, por sua vez, é aquecido no coletor e se desloca para cima. A circulação continuará enquanto o coletor continuar sob

a ação da radiação solar. A velocidade de circulação aumenta com a intensidade da insolação. De acordo com ZERROUKI, BOUMÉDIEN & BOUHADEF (2002), em sistemas por termossifão, a velocidade de circulação pode ser aumentada pela elevação da altura entre o coletor e o *boiler*, contudo, a eficiência não é aumentada. Para isso, é necessária a redução das resistências à circulação natural.

Existe uma resistência à passagem da água em tubulações causada pelas paredes do tubo e por suas conexões (cotovelos, registros, etc.) e que se chama perda de carga, se for muito elevada (tubulação demasiado longa, muito fina ou com muitas conexões) a água pode até não circular naturalmente. Neste caso, o sistema deverá possuir uma compensação para que sejam vencidas as perdas de carga, a essa compensação denomina-se carga, que é medida, normalmente, em metros de coluna de água e depende de dois fatores: uma diferença de temperatura da água na entrada e na saída do coletor (que garantem a diferença de densidade) e um desnível entre o *boiler* e o coletor solar. Quanto maior for a carga, ou seja, quanto maior for a diferença de temperatura entre a entrada e a saída do coletor e a altura entre o reservatório de água quente e o coletor, mais fácil será a circulação de água (CABIROL, PELISSOU & ROUX, 1980).

A água quente deve sempre subir para o depósito e a água fria descer para o coletor solar, por outro lado, se as perdas de carga forem demasiado elevadas, o termossifão não arrancará. Não se pode, portanto, colocar o depósito por baixo do coletor e as tubulações horizontais devem ter uma ligeira inclinação de 3 mm por metro na direção dos pontos mais altos.

PARKER (1991) apresenta as seguintes desvantagens associadas com o sistema de circulação natural, para aquecimento de água por energia solar: a) os coletores precisarão de proteção contra congelamento, em determinadas regiões geográficas; b) poderá haver problemas estéticos com a colocação do depósito de água quente em local mais alto que os coletores; e c) a baixa velocidade de fluxo da água, poderá ocasionar deposição de sais minerais, diminuindo a seção dos tubos com conseqüente diminuição da eficiência do sistema e, eventualmente, até do depósito de água quente.

2.4.4.2 Circulação forçada

Num sistema de circulação forçada, uma bomba dá a ele uma carga muito maior do que aquela no termossifão. A velocidade da água é, portanto, maior, o que permite a utilização de diâmetros menores. Nestas instalações, a bomba funcionará por energia elétrica e têm como vantagens, especialmente: o depósito pode ser colocado em qualquer lugar; não é obrigatório que as tubulações tenham declividade e as placas podem estar a distâncias maiores do depósito. As desvantagens são: o sistema é mais caro, tanto na instalação (utilização de bomba) quanto na operação (pois consome energia elétrica), não opera sem o funcionamento da bomba, ou seja, sem energia elétrica não haverá água quente e a regulação do sistema é mais sensível (CABIROL, PELISSOU & ROUX, 1980).

De acordo com PEREIRA *et al.* (2003), para instalações de aquecimento de água por energia solar com capacidade superior a 1500 litros, é recomendada a utilização de um sistema de bombeamento para a circulação de água entre a bateria de coletores e o reservatório térmico.

A circulação forçada ocorre por meio de uma motobomba hidráulica, colocada entre o *boiler* e os coletores. É um sistema indicado para médias e grandes instalações (acima de 15 placas e depósito de 1500L), sendo necessária uma manutenção periódica em função dos sistemas elétricos e do desgaste de peças, pelo movimento constante. Sua vantagem é a flexibilidade na localização dos coletores, em relação ao reservatório térmico, pois a existência da bomba garante a circulação da água (SOLETROL, 2001).

De acordo com TRANSEN (2004), a circulação forçada é indicada para sistemas de médio e grande porte (acima de dez coletores). O bombeamento é controlado por um controlador diferencial de temperatura que aciona a bomba sempre que o nível de insolação for suficiente para elevar a temperatura da água nos coletores.

Segundo RODRIGUEZ (1991), para forçar a circulação de água usa-se uma pequena bomba elétrica. Isto acarreta novas instalações a serem agregadas ao conjunto, mais os controladores elétricos e sensores para a

interrupção do fluxo, caso contrário a água continua circulando pelo coletor à noite, esfriando-se.

2.4.5 Dimensionamento do sistema de aquecimento de água por energia solar

O dimensionamento criterioso de uma instalação solar é fator decisivo para sua qualidade. Um bom equipamento, instalado corretamente, mas subdimensionado para as necessidades reais de utilização de água quente, pode trazer diversos transtornos ao usuário, inclusive gerando alto grau de insatisfação com o equipamento solar. Do mesmo modo, um equipamento superdimensionado pode não trazer o retorno de investimento dentro de prazos aceitáveis (TRANSEN, 2004).

A temperatura máxima da água, para uso residencial, é de 60°C e o consumo em banheiro (ducha e lavatório) é de 50 litros por pessoa por dia (ABNT, 1993).

MACINTYRE (1982) e CREDER (2006), estimam o consumo de água quente em residências em 45 litros por pessoa por dia.

COELHO (1982) e CREDER (2006) apresentam as temperaturas da água em função do fins a que se destinam:

- uso pessoal em banhos e higiene: 35 a 50 °C;
- em cozinhas: 60°C a 70 °C;
- em lavanderias: 75°C a 85 °C;
- em finalidades médicas: 100°C.

DHARUMAN, ARAKERI & SRINIVASAN (2006) afirmam que residências, empresas comerciais e industriais, usualmente, requerem água quente com temperaturas inferiores a 60°C. Nas residências, para banho, lavanderia e limpezas, a temperatura requerida é por volta de 50°C.

Segundo BATISTA & LARA (2003), a temperatura da água para uso humano não deve exceder 40°C nos pontos de utilização, sendo obrigatório misturar água quente e fria, por meio de misturadores.

LIMA (2003) considera normal, em Porto Alegre, 1 m² de área de coletor por pessoa, quando o consumo é de 50 litros por pessoa ao dia. O

volume do reservatório deve estar entre 50 e 100 litros por m² de coletor. Assim, uma residência com duas pessoas, corresponderia a 2 m² de coletores e um reservatório de 200 litros de água, sendo usual ajustar a temperatura do reservatório para 60°C.

O dimensionamento de um sistema de aquecimento de água, por energia solar, para uma residência com duas pessoas, é apresentado a seguir, de acordo com as prescrições técnicas de TRANSEN (2004), CREDER (2006) e MELO & AZEVEDO NETTO (1988).

2.4.5.1 Dimensionamento conforme Transen (2004)

Para determinar o número de coletores solares a serem utilizados em uma residência com duas pessoas, deve-se considerar que o consumo é de 100 litros de água, e que para aquecê-la de 25°C a 60°C, todos os dias, são necessários, aproximadamente, 122 kWh.(mês)⁻¹:

$$Q = m.c.\Delta T$$

Em que:

$$m = \text{massa de água} \rightarrow m = 100 \text{ kg};$$

$$c = \text{calor específico da água} \rightarrow c = 4186 \text{ J.kg}^{-1} . ^\circ\text{C}^{-1};$$

$$\Delta T = \text{variação de temperatura} \rightarrow \Delta T = 60^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C} \rightarrow \Delta T = 35^\circ\text{C}.$$

Logo:

$$Q = 14651 \text{ kJ.}$$

Como 1 kJ = 2,77 x 10⁻⁴ kWh, tem-se:

$$Q = 4,06 \text{ kWh.}$$

Em 30 dias:

$$Q = 121,8 \text{ kWh.}$$

Utilizando-se um coletor que produz 133,7 kWh.(mês)⁻¹, classificado como A pelo INMETRO (Figura 3), de dimensões 1,00 x 1,71 m, tem-se que um coletor supre as necessidades de água quente de duas pessoas em uma residência.

2.4.5.2 Dimensionamento conforme Creder (2006)

Dimensiona-se a área necessária de coletores para aquecer a água, com a utilização da expressão:

$$S = Q \cdot I^{-1} \cdot \eta^{-1}$$

Em que:

$$S = \text{área em m}^2;$$

$$I = \text{intensidade de radiação solar em kWh} \cdot (\text{m}^2 \text{dia})^{-1} \text{ ou kcalh} \cdot (\text{m}^2 \text{dia})^{-1}$$

Neste dimensionamento adotado como $3500 \text{ Wh} \cdot \text{m}^{-2}$ ou $3011,75 \text{ kcal} \cdot \text{m}^{-2}$;

η = rendimento do aproveitamento da energia solar, estimado para fins práticos em 50%. Neste dimensionamento, foram utilizados 56,9%, que é o rendimento do coletor do protótipo (Figura 3).

$$\text{e, } Q = m \cdot c \cdot \Delta T$$

Em que:

$$m = \text{massa de água} \rightarrow m = 100 \text{ quilos};$$

$$C = \text{calor específico da água} \rightarrow c = 1 \text{ kcal} \times \text{kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1};$$

$$\Delta T = \text{variação de temperatura} \rightarrow \Delta T = 60^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C} \rightarrow \Delta T = 35^\circ\text{C}.$$

Logo:

$$Q = 100 \text{ kg} \cdot 1 \text{ kcal} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \cdot 35^\circ\text{C};$$

$$Q = 3500 \text{ kcal};$$

$$S = 3500 \text{ kcal} \cdot (3500 \text{ kcal} \cdot \text{m}^{-2})^{-1} \cdot 0,569^{-1};$$

$$S = 2,04 \text{ m}^2.$$

Um coletor de dimensões comerciais de $1,00 \times 1,71 \text{ m}$ é admissível, tendo-se em conta as variáveis que foram adotadas (intensidade de radiação e rendimento do aproveitamento da energia solar).

2.4.5.3 Dimensionamento conforme Melo & Azevedo Netto (1988)

A área de coletores necessária para aquecer um determinado volume de água é dada pela expressão:

$$A = V.(t_f - t_m).[176,6.(I + 0,219t_m + 0,634)]^{-1}$$

Em que:

A = área de coletores em m²;

V = volume consumido em L.dia⁻¹;

I = insolação em h.dia⁻¹;

t_m = temperatura média do ar em °C;

t_f = temperatura que se deseja a água.

Admitindo-se:

V = 100 litros;

I = 7 horas diárias de insolação (média);

t_m = 20 °C (média);

t_f = 60 °C.

Tem-se:

$$A = 100.(60 - 20).[176,6.(7 + 0,219.20 + 0,634)]^{-1};$$

$$A = 1,89 \text{ m}^2.$$

Como nos dois casos anteriores, tem-se que um coletor de 1,00 x 1,71 m é suficiente. O “subdimensionamento” (1,71 m² utilizado para 1,89 m² calculado) é admitido porque o número de horas de insolação e a temperatura ambiente foram adotados.

Segundo KULKARNI, KEDARE & BANDYOPADHYAY (2007), na Índia, num sistema típico doméstico de aquecimento de água por energia solar, um coletor de 2 m² supre, diariamente, com 125 litros de água quente e temperatura da água na ordem de 60 °C.

2.5 Energia Solar como Fonte Alternativa no Brasil

O governo brasileiro poderia incentivar o uso da energia solar para aquecimento e refrigeração de ambientes, ativos ou passivos, aquecimento doméstico de água e piscinas e geração de energia elétrica, esta com o uso de células fotovoltaicas e, desse modo, poderia propiciar sensível economia de energia elétrica, pois é esta uma das principais fontes energéticas residenciais do país.

Conforme BRAZIL (2006), os incentivos ao uso do aquecimento solar são de três formas: a) através de linhas de crédito direto ao consumidor, com a isenção dos impostos; b) concedido pelos governos estadual (ICMS) e federal (IPI); c) através de programas públicos de eficiência energética para a substituição de chuveiros elétricos.

PEREIRA *et al.* (2003) afirma que, no Brasil, a aplicação da energia solar térmica para o aquecimento de água defrontou-se com uma série de barreiras (governamentais, técnicas e econômicas) e fatores condicionantes, que não permitiram alcançar, até agora, todo seu potencial. Países com menores níveis de insolação já atingiram, de forma integrada, maturidade tecnológica, política e mercadológica para a intensiva utilização da energia solar térmica.

Ainda de acordo com PEREIRA *et al.* (2003):

A primeira grande barreira identificada para o desenvolvimento da tecnologia solar térmica decorre da falta de entendimento, por parte do governo e de seus técnicos, de que o aquecimento solar em substituição ao chuveiro elétrico proporciona medidas eficazes de conservação de energia, inclusive com atenuação e deslocamento do horário de ponta das concessionárias de energia. Desta forma, sua utilização intensiva pode ser interpretada como uma forma alternativa de geração descentralizada de energia elétrica, podendo ser incluída em leis de incentivo às energias renováveis.

A segunda barreira trata do custo do equipamento solar para o aquecimento de água. Os chuveiros elétricos têm uma ampla variação de preços e potências, podendo, nos modelos mais simples e de menor potência (4400W), custar cerca de R\$ 20,00 e, nos modelos mais sofisticados e com alta potência (8000W), chegar a R\$ 350,00. Além disso, a maioria dos códigos de

construção civis, ao exigirem apenas a instalação de tubulações de água fria nas residências, não deixam opção de escolha ao consumidor final para promover o aquecimento de água. Como o uso do chuveiro elétrico faz parte da cultura do brasileiro e sua substituição pelo aquecimento de água por energia solar exige adaptações e obras civis, normalmente indesejáveis, a situação tende a se perpetuar. Em Israel, por exemplo, o elevado nível de penetração do aquecimento solar foi atingido apenas com a exigência de inclusão da tubulação de água quente nas obras para a obtenção do *habite-se*, mesmo que o aquecedor solar não esteja instalado.

Outra barreira para o desenvolvimento da energia solar no Brasil é técnica e inerente ao próprio aquecimento solar, que não pode obedecer aos critérios genéricos de funcionamento como geladeiras ou televisores. Para que a instalação solar forneça a economia de energia pretendida, seu dimensionamento e projeto devem contemplar: 1) hábitos reais de consumo de água quente nas residências, definidos pelos pontos de consumo, vazão e temperatura da água quente nos diversos equipamentos; 2) as condições climáticas locais: radiação solar incidente, temperatura ambiente, regime de chuvas e velocidade do vento; 3) as condições de instalação na obra: inclinação e orientação de telhados ou suporte para os coletores.

Para KOLLING *et al.* (2004), uma das maneiras de suprir com energia as comunidades rurais isoladas seria a implantação de sistemas energéticos baseados em fontes alternativas de energia e, dentre elas, a energia solar é uma das mais promissoras, podendo ser utilizada no aquecimento de água por meio de coletores termossolares e geração de eletricidade por meio de painéis fotovoltaicos para iluminação e bombeamento de água. Segundo BENTACURT (2002), os coletores solares térmicos são praticamente inexistentes no meio rural brasileiro, tanto para uso residencial, como para os casos úteis à produção em pequena escala para pasteurização de leite, fabricação de queijo, aquecimento de ambientes, secagem de produtos agrícolas. Também, segundo o autor, são praticamente inexistentes os equipamentos de uso agroindustrial de grande escala como o aquecimento de água para processos industriais de óleos vegetais, ovos e carnes, desinfecção de frutas para exportação, etc.

Além do incentivo ao uso de células fotovoltaicas para a geração de energia elétrica, poderiam ser criados programas de financiamento para

adoção de aquecedores de água por energia solar, em substituição aos chuveiros elétricos em residências urbanas e rurais. PEREIRA *et al.* (2003), afirmam: com efeito, o aproveitamento de energia solar térmica em instalações de aquecimento solar de pequeno, médio e grande portes, tem se mostrado como uma solução técnica e economicamente viável para os problemas de redução do consumo de energia elétrica no setor residencial brasileiro, além de propiciar a modulação da curva de carga das concessionárias de energia. Nesse sentido, sua utilização intensiva em substituição aos chuveiros elétricos, largamente utilizados no país, pode ser entendida como *geração virtual de energia elétrica*.

Esta falta de incentivo não é exclusividade brasileira e tem uma razão de ser. É que outras fontes de energia têm se mostrado atrativas sob diversos aspectos, que vão desde a facilidade de obtenção, até tecnologias altamente desenvolvidas e eficientes para sua utilização. Para Vazques (*apud* RISPOLDI, 2001), contrariando o aproveitamento racional da fonte solar, o homem, no curso da história, decidiu explorar abusivamente outros recursos energéticos que lhe proporcionaram maior desempenho no cumprimento das finalidades propostas, mas que hoje apresentam as conseqüências colaterais, cujas soluções se encontram em estágio inicial.

A perspectiva do fim do petróleo daqui a poucas décadas e os problemas causados ao meio ambiente com a utilização de fontes de energia que provocam a emissão de gases poluentes, têm feito surgir uma forte corrente de defensores da utilização de energias renováveis e, entre elas, a solar. Se ainda não é valorizada pelos órgãos governamentais em todo o mundo, ao menos no meio acadêmico a energia solar começa a ser estudada e tratada com a importância que merece. Segundo CREDER (2006), esta fonte de energia, além da grande vantagem de ser inesgotável, alia outras razões insofismáveis, pelas quais seu emprego vai se difundindo em todo o mundo: não ser poluidora do ar, ser auto-suficiente, ser completamente silenciosa e ser fonte alternativa de energia. A afirmação do autor quanto à auto-suficiência é para regiões de clima tropical. Nas regiões da denominada zona temperada, em função de épocas extremamente frias ou de longos períodos sem insolação, é necessária a utilização de sistema auxiliar de aquecimento, que pode ser elétrico, gás ou outro combustível.

Apesar da preocupação, ainda não unânime, algumas nações buscam, por suas legislações, minimizar a emissão de gases causadores do efeito estufa. É o caso do Brasil. Depreende-se, do artigo 225 da Constituição da República Federativa do Brasil (BRASIL, 1999), que todos têm o direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida, impondo-se ao Poder Público e à coletividade o dever de defendê-lo e de preservá-lo para a presente e para as futuras gerações. Pode-se citar, ainda, o exemplo da cidade brasileira de Birigui, localizada no estado de São Paulo, que, pelo artigo 1º da Lei Municipal n.º 4.507, de 30 de março de 2005, impõe o uso de sistema de aquecimento de água por energia solar em moradias de conjuntos habitacionais. Na cidade de São Paulo, a Lei Municipal 14459/2007 também obriga a adoção de sistema de aquecimento de água por energia solar:

Art. 2º É obrigatória a instalação de sistema de aquecimento de água por meio do aproveitamento da energia solar, nas novas edificações do Município de São Paulo, destinadas às categorias de uso residencial e não-residencial, na conformidade do disposto nesta lei e no item 9.3.5 da Seção 9.3 - Instalações Prediais do Anexo I da Lei nº 11.228, de 25 de junho de 1992 (Código de Obras e edificações).

Art. 3º A obrigatoriedade estabelecida no art. 2º desta lei aplica-se, na categoria de uso não-residencial, às seguintes atividades de comércio, de prestação de serviços públicos e privados, e industriais:

I - hotéis, motéis e similares;

II - clubes esportivos, casas de banho e sauna, academias de ginástica e lutas marciais, escolas de esportes, estabelecimentos de locação de quadras esportivas;

III - clínicas de estética, institutos de beleza, cabeleireiros e similares;

IV - hospitais, unidades de saúde com leitos, casas de repouso;

V - escolas, creches, abrigos, asilos e albergues;

VI - quartéis;

VII - indústrias, se a atividade setorial específica demandar água aquecida no processo de industrialização ou, ainda, quando disponibilizar vestiários para seus funcionários;

VIII - lavanderias industriais, de prestação de serviço ou coletivas, em edificações de qualquer uso, que utilizem em seu processo água aquecida.

Art. 7º A emissão do Certificado de Conclusão ou Auto de Regularização previstos na Lei nº 11.228, de 1992, fica condicionada ao cumprimento do disposto nesta lei.

Art. 8º Os sistemas de instalações hidráulicas e os equipamentos de aquecimento de água por energia solar de que trata esta lei deverão ser dimensionados para atender, no mínimo, 40% (quarenta por cento) de toda a demanda anual de energia necessária para o aquecimento de água sanitária e água de piscinas, de acordo com a Metodologia de Avaliação da Contribuição Solar estabelecida no Anexo Único integrante desta lei.

Parágrafo único. Os equipamentos mencionados no "caput" deste artigo deverão ter sua eficiência comprovada por órgão técnico, credenciado pelo Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial - INMETRO.

(SÃO PAULO, 2007, não pag.)

Segundo PEREIRA *et al.* (2003), outro destaque é o denominado *caso de Israel*, onde 80% das residências contam com aquecimento de água por energia solar e tem como meta atingir a totalidade até 2010. Os Estados Unidos, por sua vez, possuem a maior área instalada de coletores solares do mundo, com cerca de 8,9 milhões de metros quadrados, seguidos pelo Japão, com 6,5 milhões de metros quadrados. Segundo WALLACE & WANG (2006), a China é o maior mercado para sistemas de aquecimento de água por energia solar, com 13 milhões de metros quadrados de área de coletores, de novos sistemas, no ano de 2004.

2.6 Programa Brasileiro de Etiquetagem

Segundo PEREIRA *et al.* (2003), o Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial - INMETRO tem implantado, no Brasil, o programa de etiquetagem para coletores solares planos, reservatórios térmicos e sistemas acoplados, cuja adesão pelos fabricantes é voluntária.

O INMETRO, com o apoio do Programa de Combate ao Desperdício de Energia Elétrica (PROCEL), possui o Programa Brasileiro de Etiquetagem - (PBE), que tem como finalidade testar equipamentos que consomem energia elétrica. Seu objetivo é informar ao consumidor a qualidade e a eficiência dos produtos. No caso dos coletores solares, a etiqueta INMETRO/PROCEL de eficiência energética informa dados dos testes de pressão, de exposição a seco, de estanqueidade, de choque térmico, de eficiência térmica e de análise de produção mensal média de energia, informações que visam garantir qualidade mínima aos aparelhos, de maneira que eles promovam economia de energia ao usuário. A letra A indica um produto mais eficiente e a letra G um produto menos eficiente.

Segundo BRAZIL (2006), o selo PROCEL de eficiência energética possibilita a inclusão dos equipamentos nos programas públicos de eficiência energética, operados pelas concessionárias de distribuição de energia elétrica. O selo PROCEL e a etiqueta do INMETRO identificam a qualidade dos equipamentos, para que os consumidores possam fazer comparações entre marcas e modelos de equipamento e de suas eficiências energéticas. A inclusão dos equipamentos para aquecimento de água com energia solar no programa de etiquetagem, desde 1997, permitiu que os equipamentos solares tenham sua eficiência comparada com a de outros equipamentos para o aquecimento de água. Isso possibilita que os equipamentos considerados eficientes possam ser comprados com recursos dos programas de eficiência energética públicos ou financiamento de bancos oficiais.

Segundo FANTINELLI, PEREIRA & PEREIRA (2006), a participação e a integração aos programas governamentais de incentivo à eficiência energética é ainda pequena, pois havia somente 27 indústrias registradas no INMETRO até março de 2006, abrangendo, aproximadamente, 80% do mercado nacional, composto de 86 milhões de domicílios e de 7,5 milhões de moradias em conjuntos habitacionais brasileiros.

Segundo PEREIRA *et al.* (2003), para o aquecimento solar a etiqueta contém informações sobre a produção mensal de energia. O ensaio é feito com referência ao mês de setembro na cidade de Belo Horizonte, com inclinação dos coletores de 25°.

A Figura 3 apresenta a etiqueta PROCEL do coletor solar utilizado no protótipo construído para este estudo. Pode-se observar a classificação A e a produção de energia do coletor de 133,7 kWh por mês.



Figura 3 - Etiqueta PROCEL do coletor solar utilizado no protótipo.

2.7 Sustentabilidade

Segundo HOUAISS, VILLAR & FRANCO (2001) e FERREIRA (1986), sustentabilidade é a característica ou a condição do que é sustentável, ou seja, o que se pode sustentar, o que é passível de conservação, de manutenção.

As diversas definições incluem conceitos relacionados com a sustentabilidade ecológica, econômica e social. A sustentabilidade ecológica implica a manutenção, no tempo, das características fundamentais do ecossistema sob uso, quanto a seus componentes e a suas interações; a sustentabilidade econômica se traduz por uma rentabilidade estável no tempo e a sustentabilidade social está associada à idéia de que o manejo e a organização do sistema são compatíveis com os valores culturais e éticos do grupo envolvido e da sociedade, o que o torna aceitável por essas comunidades ou organizações, dando continuidade ao sistema ao longo do tempo. O desenvolvimento sustentável, em seu conceito mais amplo, não será alcançado enquanto prevalecer a lógica de mercado em vez da lógica das necessidades, pois os padrões de consumo e de acumulação da sociedade contrastam com a finitude dos recursos naturais não renováveis e com os limites de assimilação e de suporte impostos pela natureza. O desenvolvimento sustentável, nos planos econômico, social e ecológico, pode ser atingido pela

incorporação de tecnologias adequadas às diferentes condições locais, pela agregação de bens e serviços mais duráveis, eqüanamente distribuídos, e, principalmente, por uma nova visão de uso dos recursos, do aporte de energia ao sistema e da valoração do conhecimento local (MARQUES, SKORUPA & FERRAZ, 2003).

Segundo FUENTES & THOMAS (2006), a sustentabilidade ecológica de um sistema solar de aquecimento de água advém de que os sistemas domésticos de aquecimento de água são responsáveis por de 6% a 8% das emissões totais de CO₂ em países desenvolvidos. Se cada casa tivesse um sistema solar de aquecimento de água, que pudesse produzir a metade das necessidades anuais de energia para o aquecimento de água, usando energia solar limpa e gratuita, seria possível economizar cerca de 3% de todas as emissões de gases-estufa, pela simples adoção de uma política obrigatória de aquecimento solar de água.

2.8 Dados Climáticos

Paralelamente à avaliação do sistema de aquecimento de água por energia solar, é necessário o conhecimento do clima no local, pois sua influência é direta sobre o sistema. Segundo GNOATTO (2003), na otimização de projetos de aproveitamento de energia solar é importante o conhecimento das variações anuais, sazonais e diárias da radiação solar. Uma avaliação da potencialidade desse recurso exige a realização de um levantamento abrangente dos níveis de radiação solar, por medições com instrumentos solarimétricos e a utilização de modelos matemáticos para extrapolação dos valores medidos para áreas desprovidas de dados. O clima, de acordo com ADAM (2001), resulta das naturezas astronômicas e da morfologia da Terra e as variações climáticas ocorrem à medida que se alteram o afastamento solar, a distribuição de terras e mares, os relevos do solo, seu revestimento, a latitude e a longitude, a altitude e precipitações atmosféricas. Sobre a influência da latitude, afirmam FROTA & SCHIFFER (2003): a latitude de uma região, associada à época do ano, vai determinar o ângulo de incidência dos raios de sol com relação ao plano do horizonte do lugar. São todos fatores que, por

serem determinantes ou na insolação ou na temperatura do meio ambiente, influenciam na operação do sistema de aquecimento.

Para BRAZIL (2006), quanto aos parâmetros climáticos, o mais importante no dimensionamento de um sistema térmico solar é, sem dúvida, a intensidade de radiação solar. O conhecimento do quanto se pode dispor de irradiação é que irá determinar quais dimensões deverá ter o sistema e qual será o desempenho esperado para ele.

De acordo com PEREIRA *et al.* (2003), a economia real a ser obtida por um determinado sistema de aquecimento de água por energia solar depende da inclinação e da orientação efetiva da bateria de coletores solares e das condições climáticas locais, como o número de horas de insolação, a temperatura ambiente e a velocidade do vento.

O sistema de aquecimento deve ser avaliado, também, quanto ao custo de implantação e, para isso, além do projeto gráfico, específico para cada residência, do levantamento dos custos dos materiais e da mão-de-obra para a instalação, é necessário que se conheça o comportamento dos materiais utilizados em condições reais e, assim, seja possível estimar o custo de manutenção do sistema. Segundo PEDROSO (1988), a obtenção e o tratamento de dados climáticos para a elaboração de projetos e pesquisa na construção civil representam um vasto campo a ser explorado porque envolvem, junto com as demais preocupações ambientais, os cuidados em garantir uma adequação mais completa possível de materiais, componentes e sistemas construtivos, do ponto de vista de sua durabilidade, face às intempéries e a outros eventos naturais.

2.9 Equipamentos de Manobra Hidráulica e Coleta de Informações

2.9.1 Registro de gaveta

Para AZEVEDO NETTO *et al.* (1998), a válvula de gaveta é uma cunha que, quando fechada, atravessa a tubulação e, quando aberta, recolhe-se a

uma campânula. Quando aberta dá passagem total ao fluxo e a perda de carga é muito pequena. Trata-se de válvula comum para baixas pressões e quando não se requer estanqueidade.

2.9.2 Válvula solenóide

Segundo THOMAZINI & ALBUQUERQUE (2005), as solenóides são atuadores, ou seja, são dispositivos que modificam uma variável controlada. Recebem um sinal proveniente do controlador e agem sobre o sistema controlado. MACINTYRE (1997) informa que existem válvulas que devem ser comandadas por instrumentos ou equipamentos de controle automático. Este controle pode ser por solenóide, que age sob a ação de um eletroímã que provoca o deslocamento da haste da válvula.

2.9.3 Sensores

FIALHO (2003) explica que os sensores elétricos são dispositivos eletrônicos ou eletromecânicos destinados a monitorar variáveis do processo, fornecendo informações por meio de impulsos elétricos ou por meio de variações de intensidade de um sinal.

Segundo SILVEIRA & SANTOS (1998), sensor é definido como um dispositivo sensível a um fenômeno físico, tal como: temperatura, umidade, luz, pressão, entre outros. Por meio desta sensibilidade, os sensores enviam um sinal, que pode ser um simples abrir ou fechar de contatos, para os dispositivos de controle. A partir de um fenômeno físico qualquer, envolvendo grandezas físicas que não sejam de natureza elétrica, tem-se, conceitualmente, a necessidade de usar um transdutor, que se caracteriza por um dispositivo capaz de responder ao fenômeno físico ou estímulo, de forma a converter sua magnitude em um sinal elétrico conhecido, proporcional à amplitude deste estímulo. Os transdutores são também conhecidos como conversores de sinais.

Sensor é um dispositivo sensível a alguma forma de energia do ambiente, que pode ser luminosa, térmica, cinética, relacionando informações sobre uma grandeza que precisa ser medida, como temperatura, pressão, velocidade, corrente, aceleração, posição, etc. O sensor nem sempre tem as características elétricas necessárias para ser utilizado em um sistema de controle. Normalmente, um sinal de saída deve ser manipulado antes de sua leitura no sistema de controle. Isso, geralmente, é realizado com um circuito de interface para a produção de um sinal que possa ser lido pelo controlador. Supondo que a saída de um sensor, ao ser sensibilizado por uma energia externa, é dada por um nível de tensão muito baixo, torna-se necessária sua amplificação. Essa interface seria então um amplificador capaz de elevar o nível do sinal para sua efetiva utilização (THOMAZINI & ALBUQUERQUE, 2005).

Os sensores podem ser analógicos e digitais. O sensor analógico pode assumir qualquer valor em seu sinal de saída ao longo do tempo, desde que esteja dentro de sua faixa de operação. Algumas das grandezas físicas que podem assumir qualquer valor ao longo do tempo são: a pressão, a temperatura, a velocidade, a umidade, a vazão, a força, o ângulo, a distância, o torque e a luminosidade. Essas variáveis são mensuradas por elementos sensíveis com circuitos eletrônicos que não utilizam microcontroladores. O sensor digital pode assumir apenas dois valores em seu sinal de saída, ao longo do tempo, que podem ser interpretados como zero ou um. Não existem, naturalmente, grandezas físicas que assumam esses valores, mas eles são assim mostrados ao sistema de controle, após serem convertidos pelo circuito eletrônico do transdutor. É utilizado, por exemplo, em detecção de passagem de objetos, *encoders* na determinação de distância ou velocidade, etc. (THOMAZINI & ALBUQUERQUE, 2005).

2.9.3.1 Termorresistências

Segundo THOMAZINI & ALBUQUERQUE (2005), as termorresistências têm por princípio de funcionamento um filamento bastante delgado de um metal como a platina ou níquel, cuja resistência varia com a

temperatura. Convencionou-se chamar de PT-100 porque é feita com fios de platina com 100Ω a 0°C . São, segundo FIALHO (2002), as mais utilizadas industrialmente, devido a sua grande estabilidade, larga faixa de utilização, alta precisão e a capacidade de ser repetitiva, o que lhe dá confiabilidade. Podem ser utilizadas em faixas de temperatura de -270°C até 660°C .

2.9.4 Avaliação de sistemas operando por termossifão

Segundo CHANG *et al.* (2004), usualmente se avaliam sistemas de aquecimento de água funcionando por termossifão, considerando-se a performance durante a fase de coleta de energia e a perda térmica na fase de armazenagem de energia.

2.9.5 Energia elétrica economizada

Para WOELZ (2002), o consumo de água típico do chuveiro elétrico é de 3,5 litros por minuto, a duração média do banho nacional de 8 a 9 minutos, a potência do chuveiro elétrico de 4 kW e a temperatura da água ao chegar ao corpo humano varia de 36 a 41°C . Segundo BENTACURT (2002), os custos energéticos evitados com o sistema de aquecimento solar correspondem ao aquecimento elétrico evitado. De acordo com SANTOS & ROSA (2002), o tempo de banho fica em torno de cinco minutos com o uso de chuveiro elétrico, podendo atingir até 15 minutos quando o aquecimento é central e a vazão de água aquecida por volta de 7,5 litros por minuto em ambos os casos.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.2 Projeto do Protótipo

Foi elaborado um projeto, composto de desenhos gráficos das plantas, cortes e detalhes, para implantação de um protótipo de sistema de aquecimento de água por energia solar. As figuras 4, 5 e 6 apresentam os desenhos gráficos do protótipo.

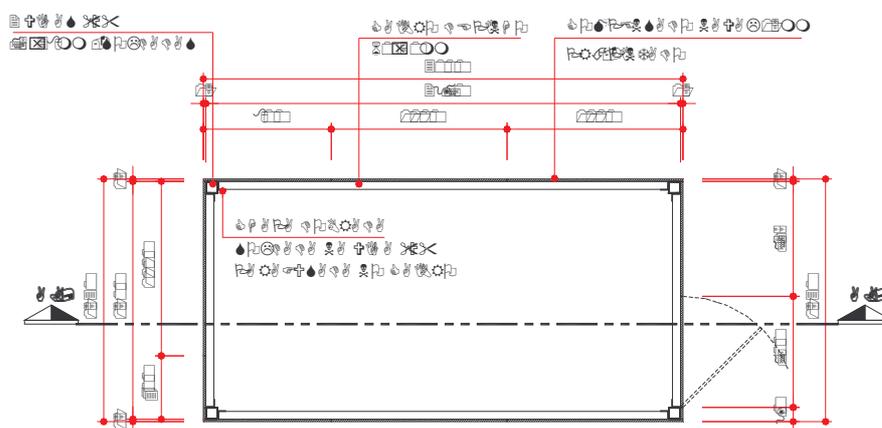


Figura 4 - Planta baixa do protótipo, ao nível do solo.

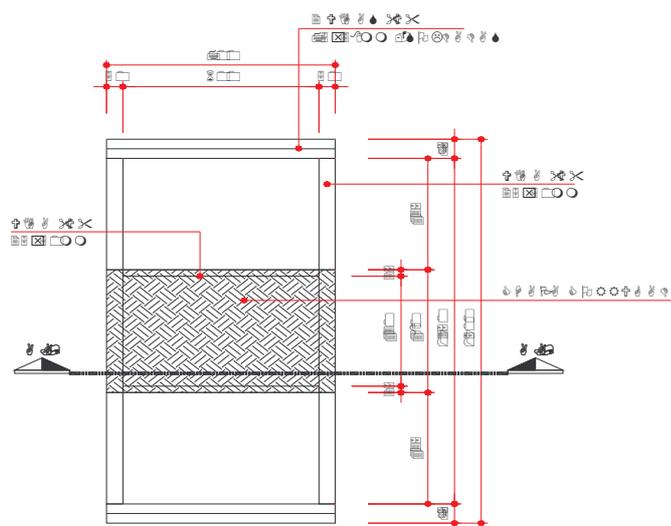


Figura 5 - Planta baixa do protótipo, ao nível do reservatório térmico.

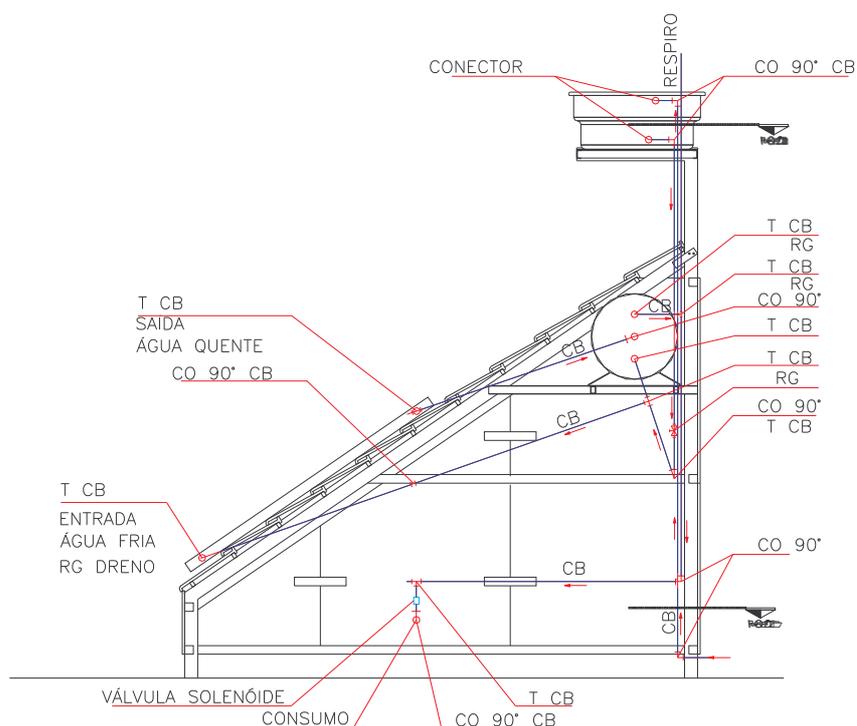


Figura 6 - Vista seccionada longitudinal do protótipo.

3.1 Protótipo

O protótipo foi montado, a partir do projeto, no campus da Faculdade Assis Gurgacz - FAG, na cidade de Cascavel, estado do Paraná, que está localizada na latitude de 24°56' sul e longitude de 53°30' oeste, com altitude de 630 m. O protótipo está localizado próximo à estação meteorológica da FAG, onde não há possibilidade de sombreamento no coletor, conforme estabelecido na NBR 12269 (ANBT, 1992): os coletores devem ser instalados de forma a evitar locais sujeitos à sombra, tais como vegetação, edificação vizinha, outros coletores solares, reservatórios, elementos arquitetônicos, etc.

Optou-se por adotar instalações hidráulicas nas quais a circulação de água entre o coletor solar e o reservatório térmico se dá por termossifão, porque, desta forma, não há necessidade de usar medidores de vazão, de alto

investimento e porque é o sistema mais popular e de maior aplicação no Brasil. Esta metodologia também foi utilizada por CARDOSO, SCALON & PADILHA (2007).

O protótipo instalado é mostrado nas figuras 7 e 8.



Figura 7 - Vista lateral do protótipo – posição da fotografia: leste – oeste. No primeiro plano a estação meteorológica.



Figura 8 - Vista frontal do coletor – posição da fotografia: norte – sul. Lados esquerdo inferior e direito superior, os sensores de temperatura. Lado direito inferior, registro de manobra para drenagem do coletor.

3.2.1 Composição do protótipo

O protótipo é composto de reservatório térmico, coletor solar, reservatório de água fria, tubos de cobre, revestimento térmico da tubulação, registros de manobra, válvula solenóide, temporizador digital, sensores de temperatura (PT100), registrador eletrônico e micro computador portátil.

Na Figura 9 é apresentado o protótipo, em fase de montagem.



Figura 9 - Protótipo do sistema de aquecimento de água por energia solar, para funcionar por termossifão, antes da instalação.

3.2.1.1 Reservatório térmico ou *boiler*

O reservatório térmico é da marca¹ Transen, em aço inoxidável AISI 304, capacidade de 100 litros, para baixa pressão (máximo de 5 mca). Isolado termicamente com poliuretano expandido e revestido com chapa de alumínio.

Na Figura 10 é apresentado o reservatório térmico utilizado no protótipo.

¹ As os produtos, marcas e fabricantes citados neste trabalho não constituem indicação comercial dos produtos, somente caracterização dos materiais utilizados no experimento.



Figura 10 - Reservatório térmico.

3.2.1.2 Coletor solar

Na Figura 11 é mostrado o coletor solar, na fase de montagem do protótipo.



Figura 11 - Coletor solar.

Para este estudo, foi utilizado um coletor solar vertical, com serpentina em cobre e tubos de elevação no sentido longitudinal. O coletor solar é de classe A, com eficiência média de 56,9%, com dimensões do vidro de cobertura de 1,00 m x 1,71 m; com tubos providos de revestimento interno de

silicone, para resistir ao congelamento em caso de baixas temperaturas, da marca Transen. A inclinação, relativamente à horizontal, foi de 35°, ou seja, a latitude de local, que é 24°56', mais 10° (aproximado para 35°).

3.2.1.3 Reservatório para água fria

O reservatório para água fria, em PVC, marca Bakof, capacidade de 100 litros, tem a função de manter o sistema completo com água. A água é proveniente de um reservatório central com capacidade de 100.000 litros e o volume é controlado por torneira de bóia de diâmetro 25mm. Na fotografia apresentada na Figura 12 é possível ver o reservatório elevado para água fria e sua posição relativa ao *boiler*.



Figura 12 - Reservatório de água fria na parte superior. Na parte inferior, vista de parte do reservatório térmico.

3.2.1.4 Tubulação para água quente

Trata-se de tubos de cobre para a condução de água quente rígidos e sem costura, fabricados por processo de extrusão e calibrados nos diâmetros comerciais por trefilação. As outras especificações são: marca Hidrolar, diâmetros externos de 22 mm e 28 mm, espessura da parede de 0,60 mm e

resistência a uma pressão de serviço de 45 kgf.cm^{-2} e 26 kgf.cm^{-2} , respectivamente (classe E).

3.2.1.5 Isolamento térmico

O isolamento térmico para as tubulações é de polietileno expandido, marca Epex, apropriado aos diâmetros da tubulação e com 5 mm de espessura. O isolamento tem a função de evitar perdas por condução e convecção, para o entorno. Na Figura 13 é possível visualizar o isolamento térmico utilizado no protótipo.



Figura 13 - Isolamento térmico em polietileno expandido, recobrindo o tubo de cobre.

3.2.1.6 Registros de manobra

Os registros de manobra são metálicos, marca Deca. Têm a função de permitir o estancamento do fluxo em caso de necessidade de manutenção no sistema. Os registros utilizados, também chamados de válvulas, são do tipo gaveta.

3.2.1.7 Válvula solenóide

A válvula solenóide utilizada é do tipo EVSI 15 – 50, para líquidos e gases, conforme Figura 14.



Figura 14 - Válvula solenóide.

3.2.1.8 Temporizador

O temporizador utilizado é digital da marca *Rockwell Automation*, com campo de temporização possível de ser regulado para energizar durante 25 minutos, de 24 em 24 horas, conforme Figura 15.



Figura 15 - Temporizador digital.

3.2.1.9 Controle de temperatura

Para o controle de temperatura foram utilizados termorresistências PT-100. Na Figura 16 é mostrada a termorresistência PT-100 utilizada.



Figura 16 - Termorresistência PT 100.

3.2.1.10 Registrador eletrônico de dados

Para a aquisição de dados foi utilizado um registrador eletrônico, marca Novus Produtos Eletrônicos Ltda., com oito canais de entrada, precisão para PT-100 de 0,2% da faixa máxima, corrente 4-20 mA e tensão 0-50 mV, medição para PT-100 com circuito de três fios com corrente de excitação de 170 μ A e compensação de resistência do cabo. Sua capacidade é de 128.000 registros. O registrador eletrônico de dados é mostrado na Figura 17.



Figura 17 - Registrador eletrônico.

3.3 Procedimento Experimental

Para a orientação do protótipo utilizou-se a metodologia estabelecida na NBR 12269 (ABNT, 1992), com auxílio de uma bússola. Após a marcação, em três locais distintos, do norte magnético, criou-se uma linha auxiliar. Desta, novamente com utilização da bússola, marcou-se 10° para a direita, ou seja, uma declinação de 10° para o nordeste, obtendo-se assim o norte geográfico. Com este alinhamento, fez-se um gabarito em madeira e fixou-se o protótipo em chumbadores metálicos, concretados ao solo.

O protótipo opera de forma passiva, por termossifão, sem nenhum controle da vazão, mesma metodologia utilizada por ARRUDA (2004), e está em conformidade com as recomendações do fabricante quanto aos materiais utilizados, isolamento térmico, inclinação das tubulações, níveis do reservatório de água fria e quente, orientação e inclinação do coletor solar.

3.3.1 Aquisição de dados

Foram utilizadas duas metodologias para a aquisição de dados: a primeira, no inverno, sem a drenagem do reservatório de água quente e a segunda, no verão, drenando-se diariamente o *boiler*:

3.3.1.1 Aquisição de dados sem a drenagem

No período de 22 de julho de 2007 a 16 de setembro de 2007 (inverno), adquiriram-se as temperaturas de forma contínua no *boiler*, para que fosse possível avaliar a capacidade de retenção térmica do reservatório de água quente de um dia às 19:30h ao dia seguinte às 6:00h.

3.3.1.2 Aquisição de dados com a drenagem

No período de 17 de dezembro de 2007 até 24 de março de 2008 (verão), adquiriram-se as temperaturas de forma contínua, na entrada do coletor, na saída do coletor e no *boiler*, drenando-o totalmente, todos os dias, para simular o consumo de água quente.

3.3.1.2.1 Simulação do consumo de água quente

Para simular o consumo de água quente de um chuveiro de uma moradia com duas pessoas, situação para a qual o sistema foi dimensionado, foi necessário retirar do sistema, diariamente, a quantidade de 100 litros de água quente. Para tanto, o temporizador foi regulado para energizar a válvula solenóide durante 25 minutos, de 24 em 24 horas, das 19:30 às 19:55h, simulando banhos de chuveiro com o consumo total da água quente, no horário de ponta. ANDERSON & MORRISON (2007) fizeram uso de válvula solenóide para estudar a performance de um sistema de aquecimento de água por energia solar, quanto à capacidade de uniformização da temperatura em um *boiler* vertical, com a utilização de motobomba; em razão da estratificação deste tipo de sistema. Após a uniformização, um termostato acionava a solenóide que drenava todo o sistema para um novo ciclo.

Em três dias diferentes, foi medida a vazão do sistema, utilizando-se um cronômetro e um recipiente com volume conhecido, encontrando-se uma vazão média de $0,15 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$. Então, em 25 minutos de funcionamento, tem-se um volume drenado do reservatório de água quente de 225 litros. A drenagem neste período foi feita para se ter certeza que toda a água quente havia sido drenada e a do dia seguinte fosse totalmente obtida com a radiação solar do dia.

3.3.1.3 Período da coleta de dados

Os dados foram coletados no inverno e no verão. BENTACURT (2002) desenvolveu estudos para os meses de janeiro (verão) e agosto (inverno), porque são, segundo ele, os meses de menor e de maior insolação em Brasília.

3.3.1.4 Dados adquiridos

Em ambos os casos, por opção, para se verificar apenas a parcela de contribuição da energia solar, foi mantido desligado o sistema de aquecimento auxiliar elétrico. Foram medidas as temperaturas da água do reservatório elevado (temperatura ambiente da água), na entrada e na saída do coletor solar (de acordo com a metodologia de BARCELLOS JÚNIOR, 2003), no ponto médio do depósito de água quente e no ponto de consumo, que simulou o chuveiro. PEREIRA & FANTINELLI (2002) utilizaram metodologia semelhante, medindo a temperatura da água em dois pontos de consumo: cozinha (13:00h) e chuveiro (18:00h), e em três pontos do reservatório de água quente: no topo, na parte intermediária e no fundo. CARDOSO, SCALON & PADILHA (2007) mediram a temperatura nas partes inferior e superior do reservatório térmico, alimentação e retorno dos coletores e temperatura ambiente.

As medidas e a conseqüente armazenagem foram realizadas em intervalos de dez minutos.

Optou-se em não se adotar o horário de verão. Como o horário de retirada da água quente foi das 19:30h às 19:55h, mesmo no horário efetivo de verão, 20:30h às 20:55h, continuaria sendo no horário de ponta.

Foi utilizado o *software* para *Windows Fielchart 8C*, marca Novus Produtos Eletrônicos Ltda., que permite a comunicação e o tratamento dos dados do registrador.

Paralelamente foram adquiridos os dados climáticos: temperatura ambiente, velocidade do vento e radiação solar, pela Estação Meteorológica. Da mesma forma, KHALIFA (1999) utilizou um protótipo para estudar um sistema por circulação natural e, para a radiação solar e temperatura ambiente,

serviu-se dos dados de uma estação meteorológica automática e próxima ao experimento.

Especificamente para o caso da radiação solar, como o piranômetro da estação está localizado na horizontal, foi necessário calcular a componente da radiação para uma inclinação do coletor de 35°, o que se fez dividindo-se a leitura obtida para a radiação solar, por cosseno de 35°.

3.3.2 Manutenção do protótipo

A única manutenção realizada no protótipo foi a limpeza do vidro do coletor, uma vez por mês, lavando-o com pano, água morna e sabão neutro, no final da tarde para se evitar choque térmico, conforme TRANSEN (2004), operação que demandou em torno de cinco minutos por limpeza. De acordo com a NBR 12269 (ABNT, 1992), em sistemas de aquecimento solar, onde as superfícies dos coletores solares não estejam protegidas contra a acumulação de poeira, devem ser tomadas medidas para permitir a limpeza destas superfícies, tão freqüentemente quanto necessário, para prevenir a redução do desempenho do coletor solar.

3.3.3 Avaliação de dados

As avaliações dos dados adquiridos foram de natureza técnica e econômica.

3.3.3.1 Avaliação técnica

A avaliação técnica foi feita em conformidade com a afirmação de CHANG *et al.* (2004) que, usualmente, se avaliam sistemas de aquecimento de água funcionando por termossifão, considerando-se a performance durante a fase de coleta de energia e a perda térmica na fase de armazenagem de energia.

3.3.3.1.1 No inverno

Foram avaliadas as temperaturas alcançadas, a influência da velocidade do vento no *boiler* e na placa e a influência da irradiação na temperatura final da água no *boiler*.

O rendimento do *boiler* para retenção da temperatura armazenada foi calculado segundo TIPLER & MOSCA (2006):

$$\eta = 1 - T_f \cdot (T_q)^{-1}$$

Em que:

η = rendimento;

T_f = temperatura da água no *boiler* na manhã do dia considerado;

T_q = temperatura da água no *boiler* na noite anterior ao dia considerado.

3.3.3.1.2 No verão

Foi avaliada a influência da velocidade do vento na temperatura final da água no *boiler*.

A eficiência do sistema (η) foi calculada segundo a metodologia de SMYTH, EAMES & NORTON (2003), dividindo-se a energia total coletada pela energia total incidente e a energia térmica coletada por litro de reserva no *boiler*, dividindo-se a energia total coletada pelo volume do *boiler*. A eficiência também foi calculada segundo a metodologia de KAPTAN & KILIC (1996), dividindo-se a energia total coletada pela irradiação total e pela metodologia de CARDOSO, SCALON & PADILHA (2007), com o cálculo da produção específica de energia:

$$PEE = \rho \cdot V \cdot C_p \cdot (T_f - T_i) \cdot 3600^{-1} \cdot A^{-1}$$

Em que:

PEE = produção específica de energia em kWh.m⁻².dia⁻¹;

ρ = massa específica da água em kg.m⁻³;

V = volume de água no reservatório térmico, em m^3 ;

C_p = calor específico da água à pressão constante ($4186 \text{ kJ.kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$);

T_f = Temperatura final da água no sistema de aquecimento solar, em $^\circ\text{C}$;

T_i = Temperatura inicial da água no sistema de aquecimento solar, em $^\circ\text{C}$;

A = área coletora transparente, em m^2 .

$$E, \eta = PEE \cdot (\int G dt)^{-1}$$

Em que:

η = rendimento térmico do sistema de aquecimento, adimensional;

PEE = produção específica de energia em $\text{kWh.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$;

G = radiação solar incidente no plano inclinado, expressa em W.m^{-2} ;

A eficiência η^* foi calculada dividindo-se a energia calorífica absorvida pela radiação diária no plano da placa.

3.3.3.2 Avaliação econômica

O tempo de retorno do investimento foi avaliado em função da eficiência do coletor na conversão da radiação solar em calor e do consumo evitado de energia elétrica, metodologia utilizada por RAIMO & FAGÁ (2006) e também segundo a metodologia de NAHAR (2002):

$$N = \{\log[(E-M)/(a-b)] - \log[(E-M)/(a-b)-C]\} / \{\log[(1+a)/(1+b)]\}$$

Em que:

N = período de retorno;

E = energia economizada por ano;

M = custo de manutenção por ano;

C = custo do aquecedor em reais;

a = taxa de juros ao ano em %;

b = inflação média ao ano em %.

O tempo de retorno do investimento foi calculado, desprezando-se o custo financeiro, pela divisão do valor do investimento pela energia anual economizada e, considerando o custo financeiro, com a utilização da tabela *price*, ou seja:

$$n = [\ln P - \ln(P - i \cdot VP)] \cdot [\ln(1 + i)]^{-1}$$

Em que:

n = período de retorno do investimento, em anos;

P = valor anual da energia economizada, em reais;

VP = valor presente do investimento, em reais;

i = taxa de juros mensal, em %.

Para o valor de investimento foi feita cotação dos equipamentos e materiais para a instalação de um sistema similar ao utilizado no protótipo (Anexo A). O preço da eletricidade utilizado para o cálculo é o residencial da cidade de Cascavel, vigente em março de 2008 (Anexo B). A vida útil considerada para o equipamento foi de 25 anos, dado fornecido pelo fabricante, que, inclusive, garante o equipamento por 10 anos (Anexo A). De acordo com WOELZ (2002), a durabilidade mínima esperada para coletores residenciais em PVC é de 15 anos.

Para o cálculo da energia elétrica economizada por ano, foi considerado um chuveiro elétrico de 4000 W.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Avaliação Técnica

O sistema de aquecimento de água por energia solar operou de maneira satisfatória em todo o período estudado, confirmando as afirmações de PRAPAS (1995) e BELESSIOTIS & MATHIOULAKIS (2002).

4.1.1 Sistema sem drenagem do *boiler*

Durante o inverno a coleta de dados foi feita sem a drenagem do *boiler*. Este procedimento permitiu sua avaliação quanto à manutenção da energia calorífica, de um dia para o outro.

4.1.1.1 Eficiência do *boiler* quanto à manutenção da energia calorífica

Nas tabelas 2, 3 e 4 são apresentadas as temperaturas coletadas, a velocidade média do vento, a temperatura ambiente à noite e o cálculo da perda térmica à noite, da perda térmica percentual e a eficiência do *boiler* na manutenção da energia calorífica. A perda térmica à noite é calculada subtraindo-se a temperatura final no *boiler* de um dia da temperatura inicial no *boiler* no dia subsequente. A perda percentual é calculada pela equação apresentada no item 3.3.3.1.1. A eficiência do *boiler* é calculada retirando-se de 100, a perda percentual.

Tabela 2 - Temperaturas inicial e final no *boiler*, velocidade do vento, temperatura média ambiente à noite, perda de energia calorífica e percentual no *boiler* à noite e eficiência do *boiler* no mês de julho de 2007

Data	T <i>boiler</i>		Vento média km.h ⁻¹	T Ambiente média noite °C	Perda		Eficiência <i>boiler</i> %
	início (6:00h) °C	final (19:30h) °C			<i>boiler</i> noite °C	%	
22/07/2007	41,80	38,10	7,63	18,32			
23/07/2007	33,80	47,30	8,58	13,84	4,30	11,29	88,71
24/07/2007	39,90	36,70	12,03	9,10	7,40	15,64	84,36
25/07/2007	32,40	50,60	13,49	9,91	4,30	11,72	88,28
26/07/2007	41,30	57,20	6,35	3,09	9,30	18,38	81,62
27/07/2007	47,30	61,70	5,98	6,67	9,90	17,31	82,69
28/07/2007	51,40	61,40	8,91	9,63	10,30	16,69	83,31
29/07/2007	50,50	56,60	19,38	8,04	10,90	17,75	82,25
30/07/2007	47,30	38,60	13,15	10,16	9,30	16,43	83,57
31/07/2007	33,80	57,70	7,44	11,39	4,80	12,44	87,56

Pela análise das tabelas 2, 3 e 4, depreende-se que, mesmo quando a temperatura média foi baixa, durante à noite, como por exemplo 3,09°C na noite de 26/7/2007, a eficiência foi de 81,62%, próxima a da média do período estudado. MADHLOPA, MGAWI & TAULO (2006) encontraram uma eficiência média na retenção em torno de 35%. Esta baixa eficiência na retenção, comparada com a alcançada neste experimento, deve-se à utilização, pelos autores, de equipamento integrado placa-*boiler*, em que o *boiler* fica exposto às intempéries.

WOELZ (2002), utilizando aquecedores de baixo custo, com *boilers* de 150 e 200 litros e coletores de 2 m², obteve temperaturas médias da água no final do dia, em dias ensolarados no inverno, para a cidade de São Paulo, de 44 a 47°C. A média no inverno da temperatura ao final do dia, neste experimento, ficou em 57,42°C. Esta diferença se explica pela utilização de equipamentos e de sistemas etiquetados pelo INMETRO, enquanto que o autor acima utilizou materiais alternativos e o sistema foi construído com o uso da bricolagem.

Tabela 3 - Temperaturas inicial e final no *boiler*, velocidade do vento, temperatura média ambiente à noite, perda de energia calorífica e percentual no *boiler* à noite e eficiência do *boiler* no mês de agosto de 2007

Data	T <i>boiler</i>		Vento média km.h ⁻¹	T ambiente média noite °C	Perda		Eficiência <i>boiler</i> %
	início (6:00h) °C	final (19:30h) °C			<i>boiler</i> noite °C	%	
01/08/2007	49,30	63,60	8,76	14,61	8,40	14,56	85,44
02/08/2007	55,00	54,70	9,18	19,75	8,60	13,52	86,48
03/08/2007	48,00	62,80	8,15	18,78	6,70	12,25	87,75
04/08/2007	53,00	45,60	7,54	12,53	9,80	15,61	84,39
05/08/2007	39,30	57,80	7,66	9,98	6,30	13,82	86,18
06/08/2007	49,60	55,30	15,15	16,11	8,20	14,19	85,81
07/08/2007	47,40	58,90	8,63	15,62	7,90	14,29	85,71
08/08/2007	49,30	61,50	10,77	11,07	9,60	16,30	83,70
09/08/2007	52,90	55,80	18,35	19,90	8,60	13,98	86,02
10/08/2007	48,60	46,40	12,66	19,77	7,20	12,90	87,10
11/08/2007	40,20	51,00	9,84	11,27	6,20	13,36	86,64
12/08/2007	44,70	58,30	18,20	17,28	6,30	12,35	87,65
13/08/2007	50,10	55,90	16,49	18,06	8,20	14,07	85,93
14/08/2007	48,70	56,50	21,10	19,64	7,20	12,88	87,12
15/08/2007	49,00	63,30	15,23	19,91	7,50	13,27	86,73
16/08/2007	54,40	68,40	8,44	19,97	8,90	14,06	85,94
17/08/2007	58,50	63,60	9,52	19,67	9,90	14,47	85,53
18/08/2007	53,50	65,20	3,86	12,43	10,10	15,88	84,12
19/08/2007	55,50	58,90	9,28	16,94	9,70	14,88	85,12
20/08/2007	48,70	59,60	10,64	9,15	10,20	17,32	82,68
21/08/2007	48,90	66,10	4,42	8,39	10,70	17,95	82,05
22/08/2007	56,60	64,60	11,95	17,62	9,50	14,37	85,63
23/08/2007	56,20	65,50	15,41	19,43	8,40	13,00	87,00
24/08/2007	56,20	65,30	12,76	20,54	9,30	14,20	85,80
25/08/2007	56,50	55,90	8,45	21,79	8,80	13,48	86,52
26/08/2007	49,50	41,20	10,73	20,84	6,40	11,45	88,55
27/08/2007	35,50	29,40	8,99	9,33	5,70	13,83	86,17
28/08/2007	26,00	22,60	4,82	6,99	3,40	11,56	88,44
29/08/2007	20,80	49,50	2,35	9,78	1,80	7,96	92,04
30/08/2007	43,40	37,30	7,24	16,03	6,10	12,32	87,68
31/08/2007	33,70	48,00	3,55	15,81	3,60	9,65	90,35

Tabela 4 - Temperaturas inicial e final no *boiler*, velocidade do vento, temperatura média ambiente à noite, perda de energia calorífica e percentual no *boiler* à noite e eficiência do *boiler* no mês de setembro de 2007

Data	T <i>boiler</i>		Vento média	T ambiente média noite	perda		eficiência <i>boiler</i>
	início (6:00h)	final (19:30h)			<i>boiler</i> noite	perda	
	°C	°C	km.h ⁻¹	°C	°C	%	%
01/09/2007	42,20	61,10	3,98	16,92	5,80	12,08	87,92
02/09/2007	53,30	68,90	6,47	20,89	7,80	12,77	87,23
03/09/2007	59,30	69,60	11,97	22,13	9,60	13,93	86,07
04/09/2007	59,70	67,30	18,40	22,38	9,90	14,22	85,78
05/09/2007	58,20	67,40	12,87	22,64	9,10	13,52	86,48
06/09/2007	58,30	71,30	9,89	22,52	9,10	13,50	86,50
07/09/2007	61,10	69,60	9,60	22,56	10,20	14,31	85,69
08/09/2007	60,00	70,10	14,56	21,79	9,60	13,79	86,21
09/09/2007	60,30	70,60	14,20	22,66	9,80	13,98	86,02
10/09/2007	60,60	70,10	14,15	22,21	10,00	14,16	85,84
11/09/2007	60,20	67,10	15,63	22,43	9,90	14,12	85,88
12/09/2007	58,00	57,00	14,39	22,36	9,10	13,56	86,44
13/09/2007	50,20	67,10	15,04	22,14	6,80	11,93	88,07
14/09/2007	57,90	35,10	12,42	22,36	9,20	13,71	86,29
15/09/2007	32,60	31,00	9,70	24,28	2,50	7,12	92,88
16/09/2007	29,50	57,60	4,94	19,68	1,50	4,84	95,16

A eficiência e as temperaturas alcançadas e apresentadas nas tabelas 2, 3 e 4, demonstram que os dimensionamentos sugeridos por TRANSEN (2004), CREDER (2006) e MELO & AZEVEDO NETTO (1988) estão corretos.

Na Figura 18 são plotadas a temperatura final da água no *boiler* (às 19:30h), em °C, e a velocidade média do vento, em km.h⁻¹. Não há relação entre a temperatura final da água no *boiler* e a velocidade do vento. Isto ocorre porque, apesar da placa estar exposta, o *boiler* está sob o telhado, não sofrendo ação direta das intempéries.

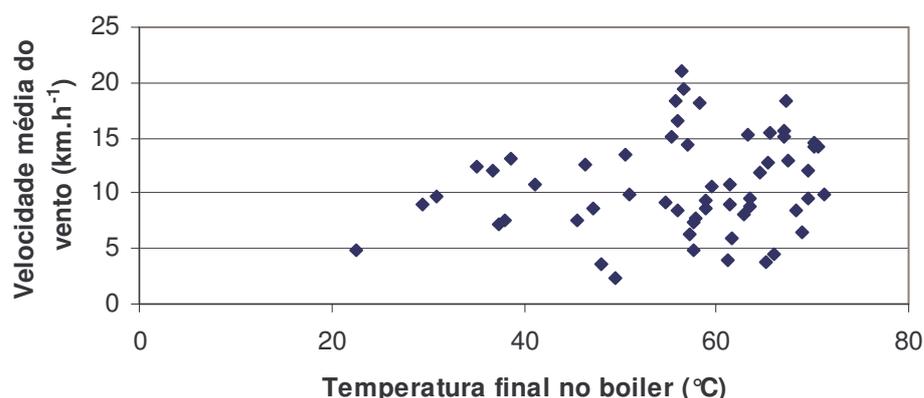


Figura 18 - Temperatura final da água no *boiler* em relação à velocidade do vento.

Na Figura 19 estão plotados os valores de temperatura da água na entrada da placa, na saída da placa, e no *boiler* e de velocidade do vento, do dia 28 de julho de 2007 às 17:32h até o dia 29 de julho de 2007 às 17:22h, quando ocorreu a maior média de velocidade do vento, $19,38\text{km.h}^{-1}$. No eixo das abcissas é apresentada a hora do dia, enquanto que no eixo das ordenadas são apresentadas, em valores absolutos, as temperaturas e as velocidades do vento. No período de maior velocidade do vento (próximo às 11:00h), são altas as temperaturas de entrada e saída da placa e também da água no *boiler*, confirmando que não há interferência do vento na temperatura da água. Observa-se o declínio da temperatura no *boiler* durante à noite, que corresponde à perda térmica, e o posterior aumento após às 11:00h, quando o aquecimento da água na placa permite o acréscimo de temperatura da água no *boiler*.

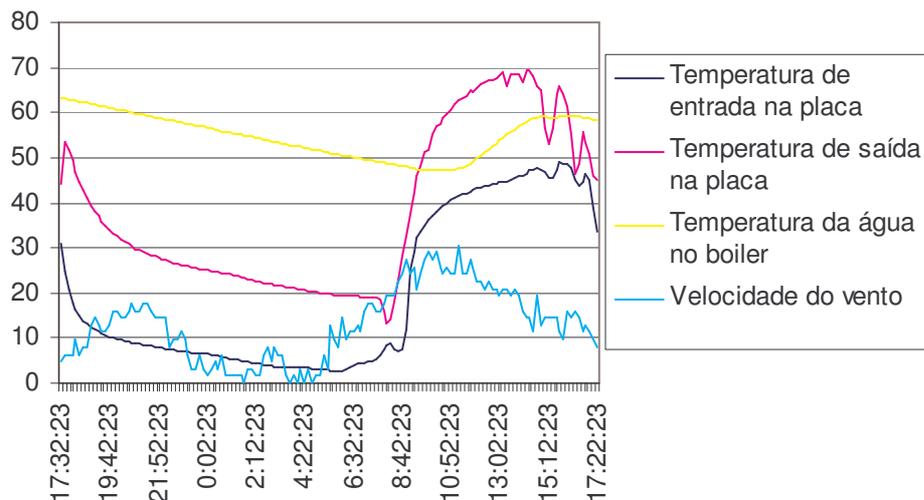


Figura 19 - Relação entre as temperaturas da água na entrada e saída da placa, da água do *boiler* e da velocidade do vento, no período de 24 horas.

Na Figura 20 são plotadas a temperatura ambiente média durante à noite e a perda térmica no *boiler* durante à noite. Verifica-se que não há relação entre a perda térmica de energia do *boiler* durante à noite com a temperatura ambiente média da noite.

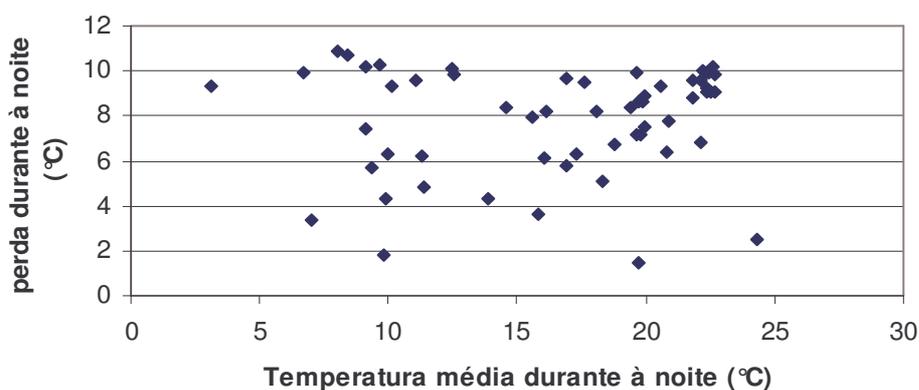


Figura 20 - Temperatura ambiente média durante à noite e perda da energia térmica no *boiler*, durante à noite.

4.1.1.2 Irradiação diária pela temperatura final do *boiler*

Nas tabelas 5 e 6 são apresentados os dados de temperatura no *boiler*, coletados nos meses de julho, agosto e setembro, às 6:00h e 19:30h, as temperaturas ambientes médias no dia e na noite e a irradiação diária. Os dias que não aparecem foram suprimidos porque houve redução da temperatura da água no *boiler* durante o dia.

Tabela 5 - Dados coletados: temperaturas inicial e final no *boiler*, temperaturas médias dia e noite e irradiação nos meses de julho e agosto

Data	T <i>boiler</i>		T ambiente média dia °C	T ambiente média noite °C	Irradiação diária W.m ⁻²
	(6:00h) °C	(19:30h) °C			
23/07/2007	33,80	47,30	11,29	13,84	3321,43
25/07/2007	32,40	50,60	9,57	9,91	4552,93
26/07/2007	41,30	57,20	10,16	3,09	4621,66
27/07/2007	47,30	61,70	14,16	6,67	4591,09
28/07/2007	51,40	61,40	15,79	9,63	4598,32
29/07/2007	50,50	56,60	13,40	8,04	4677,01
31/07/2007	33,80	57,70	17,44	11,39	4483,40
01/08/2007	49,30	63,60	22,34	14,61	4339,79
03/08/2007	48,00	62,80	21,47	18,78	4354,02
05/08/2007	39,30	57,80	18,27	9,98	4305,01
06/08/2007	49,60	55,30	21,76	16,11	3748,29
07/08/2007	47,40	58,90	14,61	15,62	4242,88
08/08/2007	49,30	61,50	22,16	11,07	4343,28
09/08/2007	52,90	55,80	24,13	19,90	3779,29
11/08/2007	40,20	51,00	16,95	11,27	3593,17
12/08/2007	44,70	58,30	22,65	17,28	4445,58
13/08/2007	50,10	55,90	22,89	18,06	4141,25
14/08/2007	48,70	56,50	23,90	19,64	4468,09
15/08/2007	49,00	63,30	24,24	19,91	4822,41
16/08/2007	54,40	68,40	24,77	19,97	4923,60
17/08/2007	58,50	63,60	23,15	19,67	4459,30
18/08/2007	53,50	65,20	19,09	12,43	4654,06
19/08/2007	55,50	58,90	15,80	16,94	3839,51
20/08/2007	48,70	59,60	12,33	9,15	5246,92
21/08/2007	48,90	66,10	19,44	8,39	5201,80
22/08/2007	56,60	64,60	23,82	17,62	4826,66
23/08/2007	56,20	65,50	25,19	19,43	4945,19
24/08/2007	56,20	65,30	26,36	20,54	4837,50
29/08/2007	20,80	49,50	18,27	9,78	4561,03
31/08/2007	33,70	48,00	20,09	15,81	3559,29

Tabela 6 - Dados coletados: temperaturas inicial e final no *boiler*, temperaturas médias dia e noite e irradiação no mês de setembro

Data	T <i>boiler</i>		T Ambiente média dia °C	T Ambiente média noite °C	Irradiação diária W.m ⁻²
	(6:00h) °C	(19:30h) °C			
01/09/2007	42,20	61,10	25,20	16,92	4861,83
02/09/2007	53,30	68,90	27,35	20,89	5375,04
03/09/2007	59,30	69,60	27,11	22,13	5481,98
04/09/2007	59,70	67,30	27,09	22,38	5355,03
05/09/2007	58,20	67,40	27,21	22,64	5265,92
06/09/2007	58,30	71,30	27,14	22,52	5676,08
07/09/2007	61,10	69,60	27,21	22,56	5477,40
08/09/2007	60,00	70,10	27,98	21,79	5719,30
09/09/2007	60,30	70,60	27,82	22,66	5699,42
10/09/2007	60,60	70,10	27,29	22,21	5787,02
11/09/2007	60,20	67,10	26,71	22,43	5449,35
13/09/2007	50,20	67,10	26,69	22,14	5842,53
16/09/2007	29,50	57,60	26,26	19,68	4830,90

Na Figura 21 são apresentadas a radiação diária na placa e a temperatura final da água no *boiler*.

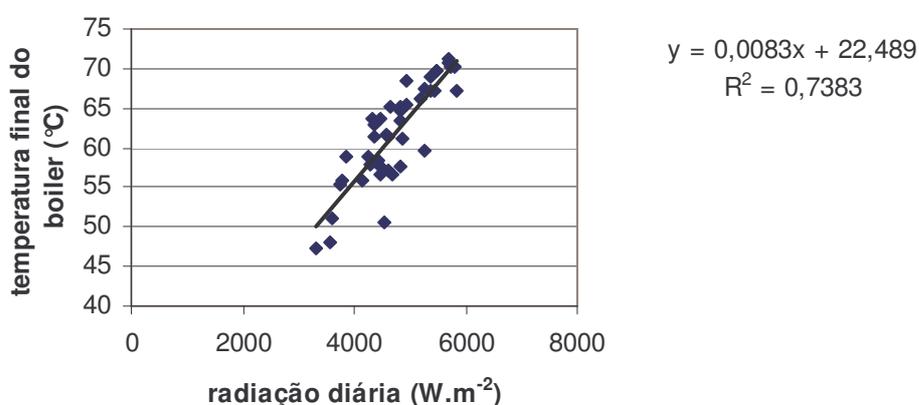


Figura 21 - Temperatura final da água no *boiler* em relação à radiação total diária no inverno.

A maioria das medidas obtidas guarda relação entre a radiação diária e a temperatura final da água no *boiler*. A equação da reta, obtida por regressão linear, é $y = 0,0083x + 22,489$, com $R^2 = 0,7383$. Verifica-se, então, que o principal fator para o aquecimento da água no sistema estudado é a irradiação solar, confirmando as afirmações de BRAZIL (2006) e PEREIRA *et al.* (2003).

4.1.2 Sistema com drenagem do *boiler*

No verão, o procedimento foi o de drenar diariamente o *boiler*, no horário de ponta, simulando com isso um banho de chuveiro.

4.1.2.1 Influência da velocidade do vento

A verificação da influência da velocidade do vento é apresentada nas figuras 22, 23, 24 e 25.

Depreende-se da Figura 22 que, no período estudado, não há relação entre a velocidade do vento e a temperatura final da água no *boiler*.

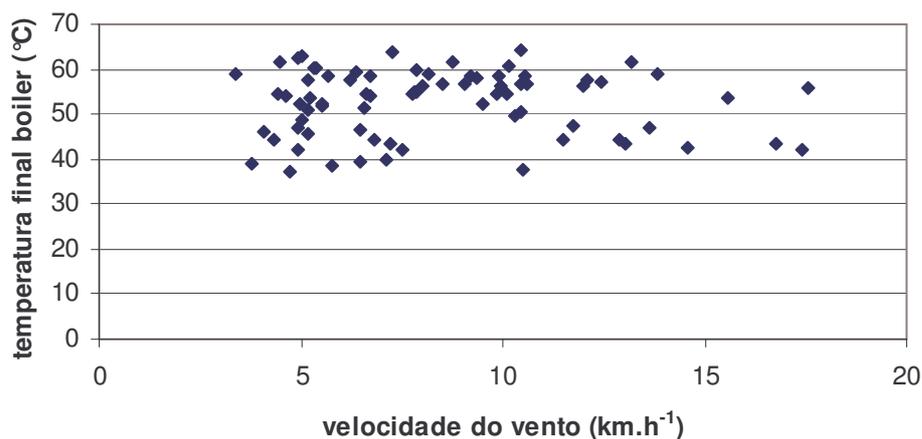


Figura 22 - Velocidade do vento e temperatura final da água no *boiler* no verão.

Foram analisadas a temperatura de entrada da água na placa e a temperatura de saída da água na placa, com a velocidade do vento, em três dias específicos: no solstício de verão (21/12/2007), no dia com maior média de velocidade do vento (27/01/2008) e no dia de maior temperatura final da água no *boiler* (05/03/2008). Da mesma forma, não se observa, nas figuras 23, 24 e 25, influência da velocidade do vento na temperatura de entrada e de saída da água na placa. KHALIFA (1999) encontrou um acréscimo de temperatura entre a saída e a entrada da placa de 5 a 12°C. Nos três dias estudados, o

acréscimo foi de até 38,70°C (05/03/2008 – 13:30h). Esta diferença se deve às condições climáticas de cada local e à época do ano da realização do experimento.

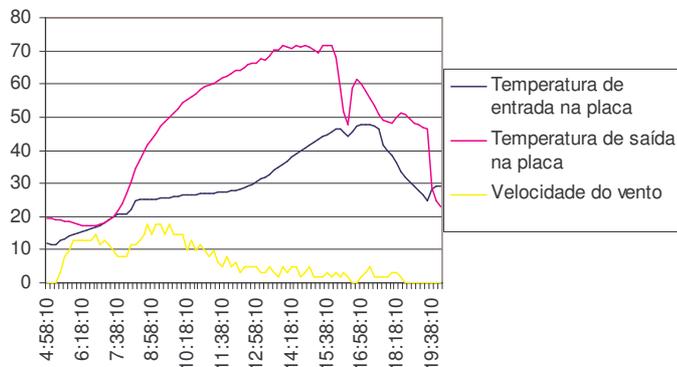


Figura 23 - Velocidade do vento, temperatura de entrada na placa e temperatura de saída da placa no dia 21/12/2007.

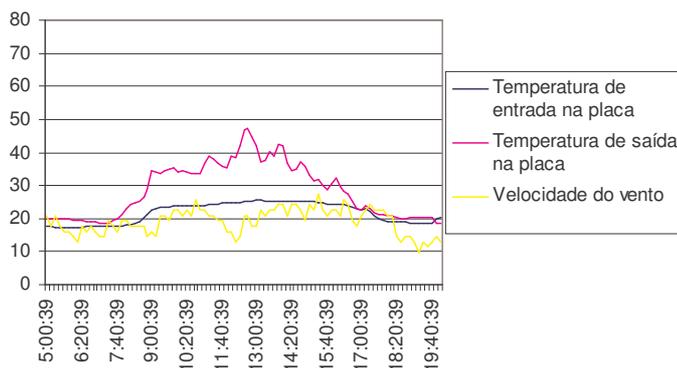


Figura 24 - Velocidade do vento e temperatura de entrada na placa e temperatura de saída da placa no dia 27/01/2008.

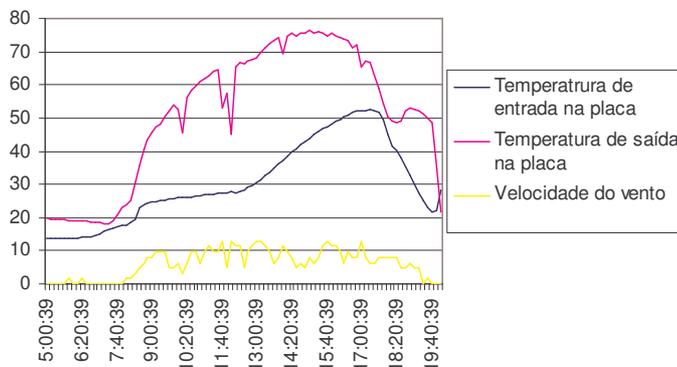


Figura 25 - Velocidade do vento e temperatura de entrada na placa e temperatura de saída da placa no dia 05/03/2008.

4.1.2.2 Eficiência da coleta de energia e energia coletada por litro de água armazenada

Nas tabelas 7, 8, 9 e 10 são apresentados os dados coletados no verão, de temperaturas da água no *boiler*, às 6:00h e às 19:30h e de radiação diária e calculadas a radiação diária no plano da placa, o ganho térmico no *boiler*, a energia calorífica absorvida, a eficiência de coleta desta energia e a energia coletada por litro armazenado de água no *boiler*.

De 2 de janeiro de 2008 até 14 de janeiro de 2008 não houve coleta de dados em função de problemas técnicos na estação meteorológica. Nos dias 6 e 7 de março de 2008 não houve coleta por falta de energia elétrica no protótipo. Os dias em que a temperatura final do *boiler* não atingiu 35° foram desconsiderados, levando-se em conta ser a temperatura mínima admitida neste trabalho para banho.

Tabela 7 - Temperaturas inicial e final no *boiler*, radiação diária, radiação diária no plano da placa, ganho térmico no *boiler*, energia calorífica absorvida, eficiência da coleta e energia coletada por litro, no mês de dezembro de 2007

Data	T_Boiler		Radiação diária (W.m ⁻²)	Radiação diária no plano da placa (W.m ⁻²)	ganho térmico <i>boiler</i> (°C)	energia calorífica absorvida (Wh)	Eficiência da coleta (%)	Energia coletada por litro (Wh)
	Início (6:00h) (°C)	Final (19:30h) (°C)						
17/12/2007		64,20	7764,92	9479,21	64,20	7548,89		
18/12/2007	28,10	47,50	5644,83	6891,07	19,40	2281,13	33,10	22,81
19/12/2007	25,40	53,90	7509,68	9167,63	28,50	3351,14	36,55	33,51
20/12/2007	26,30	52,20	6973,92	8513,58	25,90	3045,43	35,77	30,45
21/12/2007	26,20	58,40	8369,96	10217,83	32,20	3786,20	37,05	37,86
22/12/2007	27,00	61,70	8207,58	10019,61	34,70	4080,16	40,72	40,80
23/12/2007	27,50	53,70	6596,50	8052,84	26,20	3080,70	38,26	30,81
24/12/2007	27,30	56,30	7275,04	8881,19	29,00	3409,94	38,40	34,10
25/12/2007	26,40	52,10	6727,15	8212,34	25,70	3021,91	36,80	30,22
26/12/2007	26,80	57,50	7487,03	9139,97	30,70	3609,83	39,49	36,10
27/12/2007	26,30	39,90	3754,17	4582,99	13,60	1599,14	34,89	15,99
28/12/2007	25,20	46,90	5237,08	6393,30	21,70	2551,57	39,91	25,52
29/12/2007	25,80	45,70	4623,32	5644,03	19,90	2339,92	41,46	23,40
30/12/2007	24,70	38,70	3718,57	4539,54	14,00	1646,18	36,26	16,46
31/12/2007	25,90	51,00	5585,13	6818,18	25,10	2951,36	43,29	29,51

Tabela 8 - Temperaturas inicial e final no *boiler*, radiação diária, radiação diária no plano da placa, ganho térmico no *boiler*, energia calorífica absorvida, eficiência da coleta e energia coletada por litro, no mês de janeiro de 2008

Data	T_Boiler		Radiação diária (W.m ⁻²)	Radiação diária no plano da placa (W.m ⁻²)	ganho térmico <i>boiler</i> (°C)	energia calorífica absorvida (Wh)	Eficiência da coleta (%)	Energia coletada por litro (Wh)
	Início (6:00h) (°C)	Final (19:30h) (°C)						
01/01/2008	25,30	44,30	5155,41	6293,59	19,00	2234,10	35,50	22,34
15/01/2008	27,70	56,20	7736,50	9444,52	28,50	3351,14	35,48	33,51
16/01/2008	27,80	56,80	7768,85	9484,02	29,00	3409,94	35,95	34,10
17/01/2008	27,70	59,10	6887,69	8408,32	31,40	3692,14	43,91	36,92
18/01/2008	28,60	54,10	5514,79	6732,32	25,50	2998,39	44,54	29,98
20/01/2008	25,60	54,80	7126,67	8700,06	29,20	3433,45	39,46	34,33
21/01/2008	27,70	44,50	5381,67	6569,81	16,80	1975,41	30,07	19,75
22/01/2008	26,60	53,70	7177,92	8762,62	27,10	3186,53	36,36	31,87
23/01/2008	26,40	55,70	7488,61	9141,91	29,30	3445,21	37,69	34,45
24/01/2008	26,70	43,40	5274,89	6439,45	16,70	1963,65	30,49	19,64
25/01/2008	25,80	42,40	4413,41	5387,78	16,60	1951,89	36,23	19,52
26/01/2008	25,60	42,20	4686,04	5720,60	16,60	1951,89	34,12	19,52
29/01/2008	21,70	37,60	4321,43	5275,49	15,90	1869,59	35,44	18,70
30/01/2008	24,20	39,10	3835,14	4681,84	14,90	1752,00	37,42	17,52
31/01/2008	24,20	57,40	7979,58	9741,27	33,20	3903,79	40,07	39,04

A radiação diária no plano da placa foi calculada dividindo-se o valor da radiação diária por cosseno de 35°. O ganho térmico no *boiler* foi calculado subtraindo-se da temperatura final da água no *boiler* (19:30h) a temperatura inicial (6:00h). A energia calorífica absorvida foi calculada segundo a fórmula $Q = m.c.\Delta T$. A eficiência da coleta foi calculada dividindo-se a energia calorífica absorvida pela radiação diária no plano da placa. A energia coletada por litro foi calculada dividindo-se a energia calorífica absorvida pelo volume do *boiler* (100L).

Tabela 9 - Temperaturas inicial e final no *boiler*, radiação diária, radiação diária no plano da placa, ganho térmico no *boiler*, energia calorífica absorvida, eficiência da coleta e energia coletada por litro, no mês de fevereiro de 2008

Data	T_Boiler		Radiação diária (W.m ⁻²)	Radiação diária no plano da placa (W.m ⁻²)	ganho térmico <i>boiler</i> (°C)	energia calorífica absorvida (Wh)	Eficiência da coleta (%)	Energia coletada por litro (Wh)
	Início (6:00h) (°C)	Final (19:30h) (°C)						
01/02/2008	25,30	54,30	6577,38	8029,50	29,00	3409,94	42,47	34,10
02/02/2008	25,50	54,70	6346,28	7747,38	29,20	3433,45	44,32	34,33
03/02/2008	25,60	58,40	7957,93	9714,84	32,80	3856,76	39,70	38,57
04/02/2008	26,10	62,30	7696,66	9395,89	36,20	4256,54	45,30	42,57
05/02/2008	26,60	59,10	6318,80	7713,83	32,50	3821,48	49,54	38,21
06/02/2008	27,30	60,70	6061,68	7399,95	33,40	3927,31	53,07	39,27
07/02/2008	27,30	56,20	5664,96	6915,64	28,90	3398,18	49,14	33,98
08/02/2008	27,70	46,30	4753,20	5802,59	18,60	2187,06	37,69	21,87
09/02/2008	26,50	42,00	3812,68	4654,42	15,50	1822,55	39,16	18,23
12/02/2008	24,10	56,60	7002,03	8547,90	32,50	3821,48	44,71	38,21
13/02/2008	25,60	60,30	6968,00	8506,36	34,70	4080,16	47,97	40,80
14/02/2008	26,30	60,40	6077,57	7419,34	34,10	4009,61	54,04	40,10
15/02/2008	27,40	61,40	5871,29	7167,52	34,00	3997,86	55,78	39,98
16/02/2008	26,60	58,70	6151,16	7509,18	32,10	3774,45	50,26	37,74
17/02/2008	27,50	57,80	5703,55	6962,75	30,30	3562,80	51,17	35,63
18/02/2008	27,50	54,30	5297,86	6467,49	26,80	3151,25	48,72	31,51
19/02/2008	27,50	51,20	4723,96	5766,89	23,70	2786,74	48,32	27,87
20/02/2008	27,20	54,40	4955,77	6049,88	27,20	3198,28	52,87	31,98
21/02/2008	26,10	62,90	6935,62	8466,83	36,80	4327,09	51,11	43,27
22/02/2008	27,70	42,30	3205,21	3912,84	14,60	1716,73	43,87	17,17
23/02/2008	25,40	46,00	3916,36	4780,99	20,60	2422,23	50,66	24,22
24/02/2008	25,80	48,60	4317,30	5270,45	22,80	2680,92	50,87	26,81
25/02/2008	26,90	56,80	5915,83	7221,90	29,90	3515,76	48,68	35,16
26/02/2008	27,00	57,10	5988,41	7310,50	30,10	3539,28	48,41	35,39
27/02/2008	27,00	43,40	3962,07	4836,79	16,40	1928,38	39,87	19,28
29/02/2008	24,90	50,40	4041,03	4933,19	25,50	2998,39	60,78	29,98

Para os dias, nos quais a temperatura se igualou ou superou os 35°C, a eficiência da energia coletada variou de 30,07% (21/01/2008) até 58,41% (20/03/2008), tendo como média 44,71% e a energia coletada por litro variou de 13,87 Wh por litro (12/03/2008) até 44,92 Wh por litro (05/03/2008), tendo como média 30,96 Wh por litro.

Tabela 10 - Temperaturas inicial e final no *boiler*, radiação diária, radiação diária no plano da placa, ganho térmico no *boiler*, energia calorífica absorvida, eficiência da coleta e energia coletada por litro, no mês de março de 2008

Data	T_Boiler		Radiação diária (W.m ⁻²)	Radiação diária no plano da placa (W.m ⁻²)	ganho térmico boiler (°C)	energia calorífica absorvida (Wh)	Eficiência da coleta (%)	Energia coletada por litro (Wh)
	Início (6:00h) (°C)	Final (19:30h) (°C)						
01/03/2008	24,90	54,40	5604,27	6841,55	29,50	3468,73	50,70	34,69
02/03/2008	25,30	58,20	6261,28	7643,61	32,90	3868,51	50,61	38,69
03/03/2008	25,30	59,00	6957,08	8493,03	33,70	3962,58	46,66	39,63
04/03/2008	25,10	61,70	7079,50	8642,47	36,60	4303,57	49,80	43,04
05/03/2008	25,60	63,80	6765,00	8258,54	38,20	4491,71	54,39	44,92
08/03/2008	27,00	43,60	3729,75	4553,18	16,60	1951,89	42,87	19,52
09/03/2008	25,40	56,80	5427,84	6626,17	31,40	3692,14	55,72	36,92
10/03/2008	26,20	49,50	4383,56	5351,34	23,30	2739,71	51,20	27,40
11/03/2008	25,90	44,30	3162,79	3861,05	18,40	2163,55	56,04	21,64
12/03/2008	25,30	37,10	2651,53	3236,92	11,80	1387,49	42,86	13,87
13/03/2008	24,40	59,30	6100,75	7447,64	34,90	4103,68	55,10	41,04
14/03/2008	25,50	52,50	4962,70	6058,34	27,00	3174,77	52,40	31,75
15/03/2008	24,90	46,80	4761,58	5812,82	21,90	2575,09	44,30	25,75
16/03/2008	24,00	58,50	6163,15	7523,82	34,50	4056,65	53,92	40,57
17/03/2008	25,30	55,10	5313,21	6486,23	29,80	3504,00	54,02	35,04
18/03/2008	25,10	59,80	6194,53	7562,13	34,70	4080,16	53,96	40,80
19/03/2008	26,00	44,30	4069,62	4968,09	18,30	2151,79	43,31	21,52
20/03/2008	24,50	58,40	5590,31	6824,51	33,90	3986,10	58,41	39,86
21/03/2008	25,60	51,90	4509,67	5505,29	26,30	3092,46	56,17	30,92
22/03/2008	25,60	39,50	2803,25	3422,14	13,90	1634,42	47,76	16,34

SMYTH, EAMES & NORTON (2003), utilizando dois sistemas, um com placa de 1,10 m por 1,20 m e *boiler* de 57 litros, com quatro configurações diferentes (tipo A) e outro com placa de 1,60 m x 1,20 m e *boiler* de 87 litros, e também com quatro configurações diferentes (tipo B), encontraram para o Tipo A: para uma eficiência de 52,72 %, a energia coletada por litro de 57,95 Wh, para uma eficiência de 51,42 %, a energia coletada por litro de 56,56 Wh, para uma eficiência de 57,36 %, a energia coletada por litro de 61,60,95 Wh e para uma eficiência de 52,89 %, a energia coletada por litro de 61,04 Wh. Para o Tipo B, os autores encontraram: para uma eficiência de 58,33 %, a energia coletada por litro de 42,84 Wh, para uma eficiência de 56,58 %, a energia coletada por litro de 41,16 Wh, para uma eficiência de 59,61 %, a energia coletada por litro de 43,12 Wh e para uma eficiência de 58,60 %, a energia coletada por litro de 42,46 Wh.

KAPTAN & KILIC (1996), utilizando um *boiler* de 87 litros e um coletor com $1,80 \text{ m}^2$, encontraram, para uma radiação de 245 W.m^{-2} , $\Delta T = 10,53 \text{ }^\circ\text{C}$, uma eficiência de 48,3%, para uma radiação de 475 W.m^{-2} , $\Delta T = 22,37 \text{ }^\circ\text{C}$, uma eficiência de 52,9%, para uma radiação de 600 W.m^{-2} , $\Delta T = 28,66 \text{ }^\circ\text{C}$, uma eficiência de 53,7% e para uma radiação de 890 W.m^{-2} , $\Delta T = 43,54 \text{ }^\circ\text{C}$, uma eficiência de 55,0%.

Confirma-se, então, a afirmação de CHANG, SHEN & HUANG (2002), de que a performance de aquecedor de água por energia solar é afetada pela capacidade do *boiler*.

As diferenças ocorreram, provavelmente, por terem os autores utilizado equipamentos com coletor e *boiler* integrados, o que, naturalmente, causa menor perda térmica, além da utilização de materiais seletivos nos coletores, o que aumenta a eficiência.

Na Figura 26 estão plotados, no eixo das abcissas, os dados de radiação diária, em W.m^{-2} e, no eixo das ordenadas, a energia calorífica absorvida no *boiler*. A maioria dos dados guarda relação entre si, como pode ser verificado pela reta formada a partir de uma regressão linear.

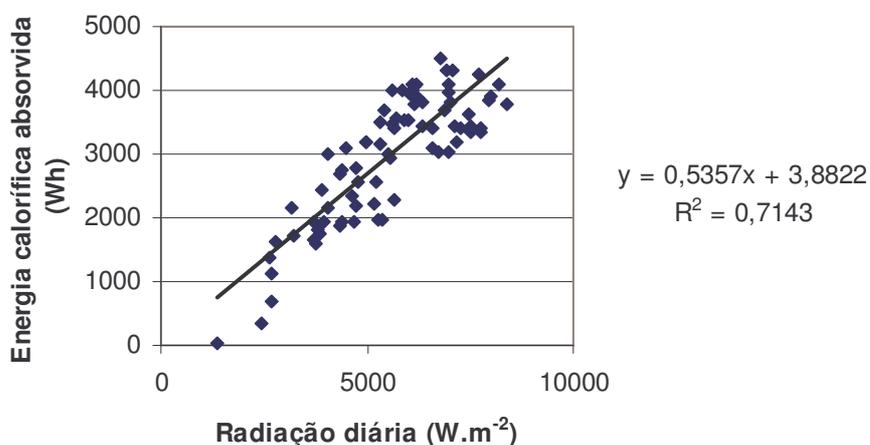


Figura 26 - Radiação diária e energia calorífica absorvida.

Na Figura 27 estão plotados, no eixo das abcissas, os dados de radiação diária, em W.m^{-2} e, no eixo das ordenadas, a energia calorífica absorvida no *boiler*, por litro de água armazenada. A maioria dos dados guarda

relação entre si, como pode ser verificado pela reta formada a partir de uma regressão linear.

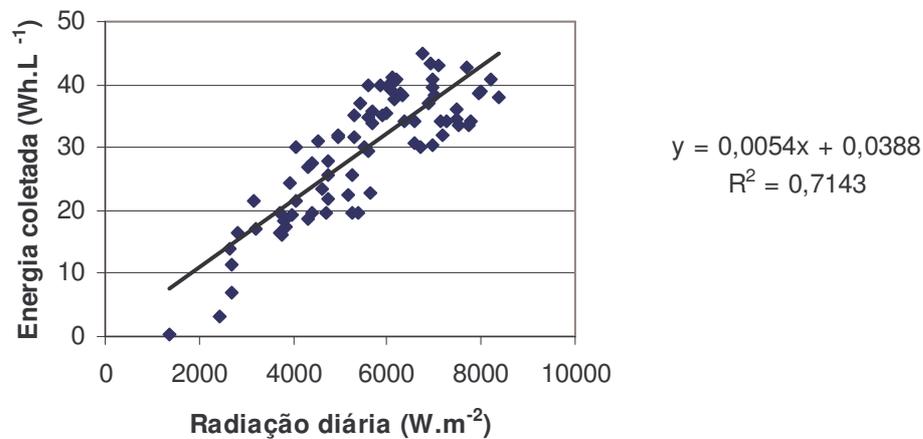


Figura 27 - Radiação diária e energia coletada por litro de água depositada no *boiler*.

4.1.2.3 Produção específica de energia (PEE) e eficiência térmica diária relacionada à PEE.

Nas tabelas 11, 12, 13 e 14 são apresentados os dados coletados de temperaturas no *boiler*, às 6:00h e às 19:30h e a radiação diária e calculados a radiação diária no plano da placa, o ganho de energia térmica no *boiler*, a energia calorífica absorvida, a produção específica de energia, o rendimento relativo à produção específica de energia: η , e o rendimento relativo a energia total coletada e a irradiação: η^* .

Tabela 11 - Temperaturas inicial e final no *boiler*, radiação diária, radiação diária no plano da placa, ganho térmico no *boiler*, energia calorífica absorvida, Produção específica de energia (PEE) e eficiências térmicas diárias no mês de dezembro de 2007, relacionadas à PEE

Data	T_Boiler		Radiação diária (W.m ⁻²)	Radiação diária no plano da placa (W.m ⁻²)	ganho térmico <i>boiler</i> (°C)	energia calorífica absorvida (Wh)	PEE kWh.m ⁻² .dia ⁻¹	η (%)	η* (%)
	Início (6:00h) (°C)	Final (19:30h) (°C)							
17/12/07	50,40	64,20	7764,92	9479,21	13,80	1622,66			
18/12/07	28,10	47,50	5644,83	6891,07	19,40	2281,13	1,31	18,96	40,41
19/12/07	25,40	53,90	7509,68	9167,63	28,50	3351,14	1,92	20,94	44,62
20/12/07	26,30	52,20	6973,92	8513,58	25,90	3045,43	1,74	20,49	43,67
21/12/07	26,20	58,40	8369,96	10217,83	32,20	3786,20	2,17	21,23	45,24
22/12/07	27,00	61,70	8207,58	10019,61	34,70	4080,16	2,34	23,33	49,71
23/12/07	27,50	53,70	6596,50	8052,84	26,20	3080,70	1,76	21,91	46,70
24/12/07	27,30	56,30	7275,04	8881,19	29,00	3409,94	1,95	21,99	46,87
25/12/07	26,40	52,10	6727,15	8212,34	25,70	3021,91	1,73	21,08	44,92
26/12/07	26,80	57,50	7487,03	9139,97	30,70	3609,83	2,07	22,62	48,21
27/12/07	26,30	39,90	3754,17	4582,99	13,60	1599,14	0,92	19,99	42,60
28/12/07	25,20	46,90	5237,08	6393,30	21,70	2551,57	1,46	22,86	48,72
29/12/07	25,80	45,70	4623,32	5644,03	19,90	2339,92	1,34	23,75	50,61
30/12/07	24,70	38,70	3718,57	4539,54	14,00	1646,18	0,94	20,77	44,27
31/12/07	25,90	51,00	5585,13	6818,18	25,10	2951,36	1,69	24,79	52,84

Tabela 12 - Temperaturas inicial e final no *boiler*, radiação diária, radiação diária no plano da placa, ganho térmico no *boiler*, energia calorífica absorvida, Produção específica de energia (PEE) e eficiências térmicas diárias no mês de janeiro de 2008, relacionadas à PEE

Data	T_Boiler		Radiação diária (W.m ⁻²)	Radiação diária no plano da placa (W.m ⁻²)	ganho térmico <i>boiler</i> (°C)	energia calorífica absorvida (Wh)	PEE kWh.m ⁻² .dia ⁻¹	η (%)	η* (%)
	Início (6:00h) (°C)	Final (19:30h) (°C)							
01/1/08	25,30	44,30	5155,41	6293,59	19,00	2234,10	1,28	20,33	43,33
15/1/08	27,70	56,20	7736,50	9444,52	28,50	3351,14	1,92	20,32	43,32
16/1/08	27,80	56,80	7768,85	9484,02	29,00	3409,94	1,95	20,60	43,89
17/1/08	27,70	59,10	6887,69	8408,32	31,40	3692,14	2,11	25,15	53,60
18/1/08	28,60	54,10	5514,79	6732,32	25,50	2998,39	1,72	25,51	54,37
20/1/08	25,60	54,80	7126,67	8700,06	29,20	3433,45	1,97	22,61	48,18
21/1/08	27,70	44,50	5381,67	6569,81	16,80	1975,41	1,13	17,22	36,71
22/1/08	26,60	53,70	7177,92	8762,62	27,10	3186,53	1,83	20,83	44,39
23/1/08	26,40	55,70	7488,61	9141,91	29,30	3445,21	1,97	21,59	46,01
24/1/08	26,70	43,40	5274,89	6439,45	16,70	1963,65	1,12	17,47	37,23
25/1/08	25,80	42,40	4413,41	5387,78	16,60	1951,89	1,12	20,75	44,23
26/1/08	25,60	42,20	4686,04	5720,60	16,60	1951,89	1,12	19,54	41,65
29/1/08	21,70	37,60	4321,43	5275,49	15,90	1869,59	1,07	20,30	43,26
30/1/08	24,20	39,10	3835,14	4681,84	14,90	1752,00	1,00	21,44	45,68
31/1/08	24,20	57,40	7979,58	9741,27	33,20	3903,79	2,24	22,96	48,92

A radiação diária no plano da placa é calculada dividindo-se a radiação diária por cosseno de 35°. O ganho térmico no *boiler* é calculado subtraindo-se da temperatura final da água no *boiler* a temperatura inicial. A energia calorífica absorvida é calculada utilizando-se a fórmula: $Q = m.c.\Delta T$. A produção específica de energia é calculada segundo a fórmula: $PEE = \rho.V.C_p.(T_f - T_i) . 3600^{-1} . A^{-1}$. O rendimento relativo à PEE é calculado com a utilização da fórmula $\eta = PEE . (\int Gdt)^{-1}$ e o rendimento η^* é calculado dividindo-se a energia calorífica absorvida pela radiação diária.

Tabela 13 - Temperaturas inicial e final no *boiler*, radiação diária, radiação diária no plano da placa, ganho térmico no *boiler*, energia calorífica absorvida, produção específica de energia (PEE) e eficiências térmicas diárias no mês de fevereiro de 2008, relacionadas à PEE

Data	T_Boiler		Radiação Diária (W.m ⁻²)	Radiação diária no plano da placa (W.m ⁻²)	ganho térmico <i>boiler</i> (°C)	energia calorífica absorvida (Wh)	PEE kWh.m ⁻² .dia ⁻¹	η (%)	η^* (%)
	Início (6:00h) (°C)	Final (19:30h) (°C)							
1/2/08	25,30	54,30	6577,38	8029,50	29,00	3409,94	1,95	24,33	51,84
2/2/08	25,50	54,70	6346,28	7747,38	29,20	3433,45	1,97	25,39	54,10
3/2/08	25,60	58,40	7957,93	9714,84	32,80	3856,76	2,21	22,74	48,46
4/2/08	26,10	62,30	7696,66	9395,89	36,20	4256,54	2,44	25,95	55,30
5/2/08	26,60	59,10	6318,80	7713,83	32,50	3821,48	2,19	28,38	60,48
6/2/08	27,30	60,70	6061,68	7399,95	33,40	3927,31	2,25	30,40	64,79
7/2/08	27,30	56,20	5664,96	6915,64	28,90	3398,18	1,95	28,15	59,99
8/2/08	27,70	46,30	4753,20	5802,59	18,60	2187,06	1,25	21,59	46,01
9/2/08	26,50	42,00	3812,68	4654,42	15,50	1822,55	1,04	22,43	47,80
12/2/08	24,10	56,60	7002,03	8547,90	32,50	3821,48	2,19	25,61	54,58
13/2/08	25,60	60,30	6968,00	8506,36	34,70	4080,16	2,34	27,48	58,56
14/2/08	26,30	60,40	6077,57	7419,34	34,10	4009,61	2,30	30,96	65,97
15/2/08	27,40	61,40	5871,29	7167,52	34,00	3997,86	2,29	31,95	68,09
16/2/08	26,60	58,70	6151,16	7509,18	32,10	3774,45	2,16	28,79	61,36
17/2/08	27,50	57,80	5703,55	6962,75	30,30	3562,80	2,04	29,31	62,47
18/2/08	27,50	54,30	5297,86	6467,49	26,80	3151,25	1,81	27,91	59,48
19/2/08	27,50	51,20	4723,96	5766,89	23,70	2786,74	1,60	27,68	58,99
20/2/08	27,20	54,40	4955,77	6049,88	27,20	3198,28	1,83	30,28	64,54
21/2/08	26,10	62,90	6935,62	8466,83	36,80	4327,09	2,48	29,27	62,39
22/2/08	27,70	42,30	3205,21	3912,84	14,60	1716,73	0,98	25,13	53,56
23/2/08	25,40	46,00	3916,36	4780,99	20,60	2422,23	1,39	29,02	61,85
24/2/08	25,80	48,60	4317,30	5270,45	22,80	2680,92	1,54	29,14	62,10
25/2/08	26,90	56,80	5915,83	7221,90	29,90	3515,76	2,01	27,89	59,43
26/2/08	27,00	57,10	5988,41	7310,50	30,10	3539,28	2,03	27,73	59,10
27/2/08	27,00	43,40	3962,07	4836,79	16,40	1928,38	1,10	22,84	48,67
29/2/08	24,90	50,40	4041,03	4933,19	25,50	2998,39	1,72	34,82	74,20

No período de 2/1/2008 até 14/1/2008 não houve coleta por parte da estação meteorológica da FAG, por problemas técnicos.

No dia 6/3/2008 à tarde e no dia 7/3/2008 pela manhã não houve coleta de temperatura por falta de energia elétrica no protótipo.

Os dias onde a temperatura foi inferior a 35°C, considerada neste trabalho como a mínima para banho, foram desprezados, ou seja, para os dias em que a temperatura no reservatório térmico não atingiu 35°C, o sistema de aquecimento de água por energia solar é desprezado e o usuário teria que fazer uso de sistema auxiliar.

Tabela 14 - Temperaturas inicial e final no boiler, radiação diária, radiação diária no plano da placa, ganho térmico no *boiler*, energia calorífica absorvida, Produção específica de energia (PEE) e eficiências térmicas diárias no mês de março de 2008, relacionadas à PEE

Data	T_Boiler		Radiação diária (W.m ⁻²)	Radiação diária no plano da placa (W.m ⁻²)	ganho térmico <i>boiler</i> (°C)	energia calorífica absorvida (Wh)	PEE kWh.m ⁻² .dia ⁻¹	η (%)	η* (%)
	Início (6:00h) (°C)	Final (19:30h) (°C)							
1/3/08	24,90	54,40	5604,27	6841,55	29,50	3468,73	1,99	29,04	61,89
2/3/08	25,30	58,20	6261,28	7643,61	32,90	3868,51	2,22	28,99	61,78
3/3/08	25,30	59,00	6957,08	8493,03	33,70	3962,58	2,27	26,73	56,96
4/3/08	25,10	61,70	7079,50	8642,47	36,60	4303,57	2,47	28,52	60,79
5/3/08	25,60	63,80	6765,00	8258,54	38,20	4491,71	2,57	31,15	66,40
8/3/08	27,00	43,60	3729,75	4553,18	16,60	1951,89	1,12	24,56	52,33
9/3/08	25,40	56,80	5427,84	6626,17	31,40	3692,14	2,11	31,92	68,02
10/3/08	26,20	49,50	4383,56	5351,34	23,30	2739,71	1,57	29,33	62,50
11/3/08	25,90	44,30	3162,79	3861,05	18,40	2163,55	1,24	32,10	68,41
12/3/08	25,30	37,10	2651,53	3236,92	11,80	1387,49	0,79	24,55	52,33
13/3/08	24,40	59,30	6100,75	7447,64	34,90	4103,68	2,35	31,56	67,27
14/3/08	25,50	52,50	4962,70	6058,34	27,00	3174,77	1,82	30,02	63,97
15/3/08	24,90	46,80	4761,58	5812,82	21,90	2575,09	1,48	25,38	54,08
16/3/08	24,00	58,50	6163,15	7523,82	34,50	4056,65	2,32	30,88	65,82
17/3/08	25,30	55,10	5313,21	6486,23	29,80	3504,00	2,01	30,94	65,95
18/3/08	25,10	59,80	6194,53	7562,13	34,70	4080,16	2,34	30,91	65,87
19/3/08	26,00	44,30	4069,62	4968,09	18,30	2151,79	1,23	24,81	52,87
20/3/08	24,50	58,40	5590,31	6824,51	33,90	3986,10	2,28	33,46	71,30
21/3/08	25,60	51,90	4509,67	5505,29	26,30	3092,46	1,77	32,18	68,57
22/3/08	25,60	39,50	2803,25	3422,14	13,90	1634,42	0,94	27,36	58,30

Na Figura 28 são plotados os dados de radiação diária e a temperatura final da água no *boiler*.

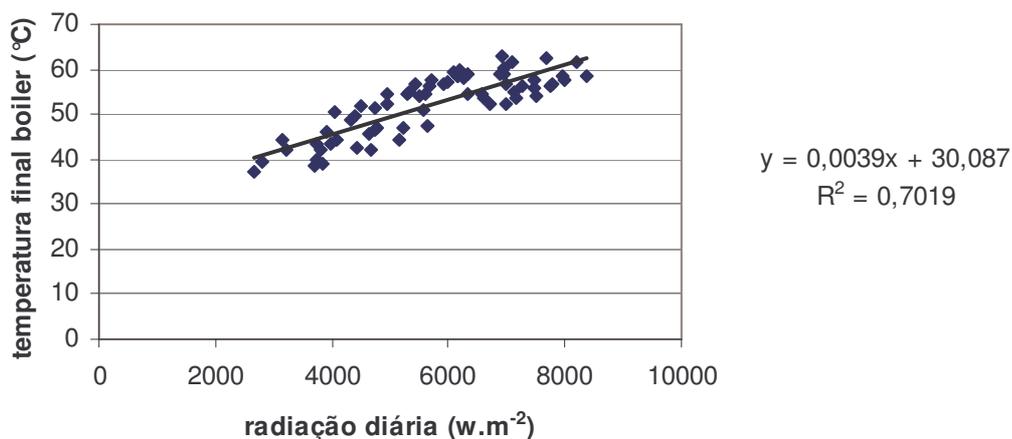


Figura 28 - Relação entre a radiação diária e a temperatura final da água no *boiler*.

Na maioria das medidas observa-se relação entre a radiação diária e a temperatura final da água no *boiler*, da mesma maneira que observado no inverno e também comprovado pela reta formada por regressão linear.

Na Figura 29 são plotadas a radiação diária e a produção específica de energia.

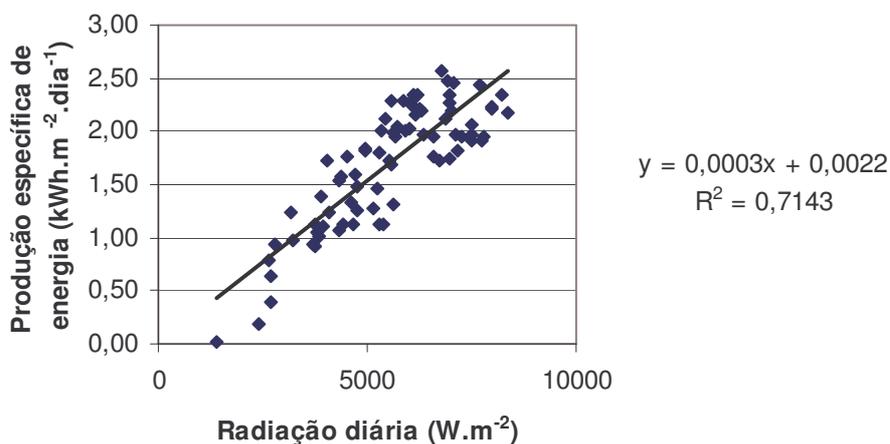


Figura 29 - Relação entre a radiação diária e a produção específica de energia.

Observa-se no gráfico que há relação entre a radiação diária e a produção específica de energia, como se pode observar na reta formada por

regressão linear. Para os dias em que a temperatura se igualou ou superou os 35°C, a produção específica de energia (PEE) variou de $0,56 \text{ kWh} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{dia})^{-1}$ até $2,57 \text{ kWh} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{dia})^{-1}$, tendo como média $1,76 \text{ kWh} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{dia})^{-1}$ e a eficiência térmica diária (η) variou de 10,13% até 23,11%, tendo como média 15,62%.

Na Figura 30 são plotados os dados de radiação diária e de rendimento relativo à PEE: η e se observa que não há relação entre os dados.

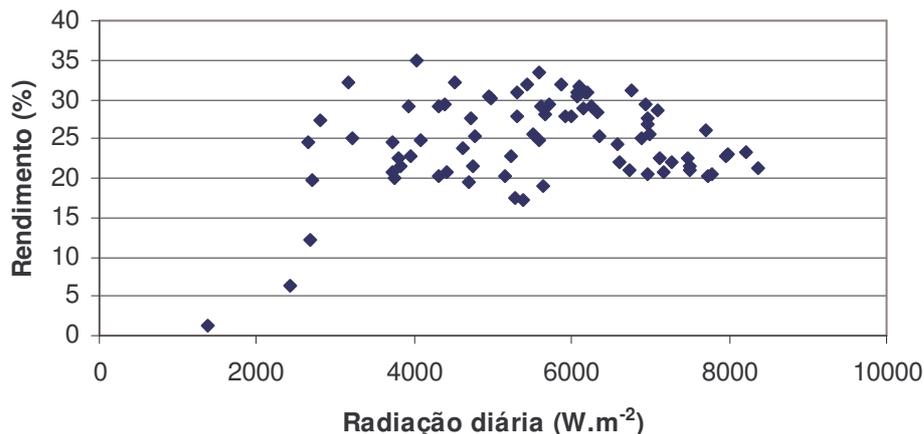


Figura 30 - Rendimento do sistema relativamente à PEE.

Na Figura 31 são plotados os dados de radiação diária e o rendimento η^* calculado e, da mesma maneira que no caso do rendimento η , não há relação entre os dados.

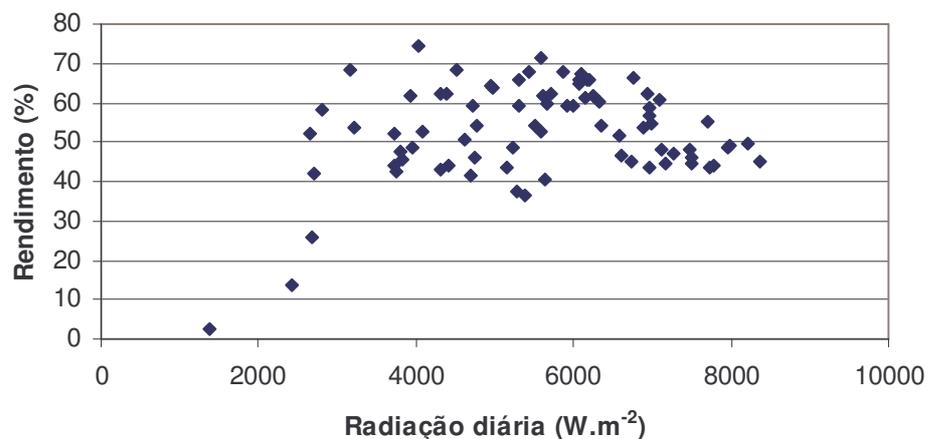


Figura 31 - Rendimento η^* do sistema relativamente à radiação diária.

CARDOSO, SCALON & PADILHA (2007), utilizando dois protótipos, um de referência, com produção de energia conhecida, funcionando por termossifão, com reservatórios térmicos idênticos de 200 litros, instalação hidráulica semelhante e placas com áreas de 0,964 m² e 0,936 m², em dois dias seguidos de ensaio, encontraram para o equipamento referência 2,39 kWh.(m².dia)⁻¹ e para o outro, 3,06 kWh.(m².dia)⁻¹, de produção específica de energia média. A eficiência térmica diária do equipamento de referência ficou em 68,48%, enquanto que o outro em 87,61%.

Refazendo-se as contas, com as dimensões do equipamento utilizado no protótipo (*boiler* de 100 litros e placa de 1,71m²), apenas como termo de comparação, tem-se:

$$PEE = 0,81 \text{ kWh.}(m^2.\text{dia})^{-1}$$

$$\eta = 18,9\%$$

A produção específica de energia é proporcional ao volume e inversamente proporcional à área do coletor, justificando os valores.

Outra razão para a diferença é a coleta em apenas dois dias por parte dos autores, limitando a somente duas variações de temperatura no reservatório, lembrando que a produção específica de energia também é proporcional ao ganho térmico.

WOELZ (2002), utilizando aquecedores de baixo custo, com depósito de água quente de 150 e 200 litros e coletores de 2 m², obteve temperaturas médias da água no final do dia, em dias ensolarados no verão, para a cidade de São Paulo, de 53 °C a 56 °C.

No experimento, a menor temperatura considerada foi de 37,10 °C e a maior temperatura alcançada no *boiler* foi de 63,80 °C, no final do dia. A média da temperatura da água no *boiler* no verão, ao final do dia, ficou em 52,26 °C. Esta diferença também se explica pela utilização de diferentes tipos de materiais.

4.2 Avaliação Econômica

Em 82 dias estudados, houve 6 dias sem que a temperatura final no *boiler* fosse igual ou superior a 35°C, ou seja, em 7,32% dos dias. Nesta proporção, no ano seriam 27 dias sem radiação suficiente para alcançar a temperatura mínima no *boiler* ou 338 dias no ano com radiação solar suficiente para alcançar a temperatura requerida.

Pode-se também observar, dos dados, inclusive no inverno, que sempre que a radiação foi superior a 3000 W.m⁻².dia⁻¹, a temperatura final no *boiler* atingiu o mínimo de 35°C.

Foi adotada, então, com margem de segurança, como mínima, a radiação de 3500 W.m⁻².dia⁻¹ para se atingir a temperatura requerida mínima de 35°C.

Considerando GRIGOLETO (2001), que apresenta a irradiação global máxima para o município de Cascavel, para partição diária, tem-se 323 dias no ano com radiação solar diária superior a 3500 W.m⁻².dia⁻¹.

Segundo o IBGE (2008), a taxa anual de inflação de 2007, tendo como indexador o Índice Nacional de Preços ao Consumidor (INPC), foi de 5,04% (Anexo C) e a menor taxa de juros em 2007 para financiamentos, segundo BNDES (2008) foi a Taxa de Juros de Longo Prazo (TJLP) de 6,25% ao ano (Anexo D).

A energia elétrica economizada, considerando-se um chuveiro de 4000 W, funcionando 20 minutos por dia (duas pessoas com tempo de dez minutos), com eficiência de 95%, foi de 1,40 kWh por dia. A tarifa de energia em março de 2008 foi de R\$ 0,38193 por kWh (Anexo B). Tem-se, portanto, R\$ 0,54 por dia e em 323 dias, R\$ 174,42 economizados.

O valor de um equipamento similar ao do protótipo, instalado em Cascavel, é de R\$ 2300,00 (Anexo A). Considerando-se como zero o valor de manutenção do equipamento, já que é, normalmente, apenas a limpeza do coletor e esta pode ser feita pelo próprio usuário, tem-se:

$$N = \frac{\log[(E-M)/(a-b)] - \log[(E-M)/(a-b)-C]}{\log[(1+a)/(1+b)]}$$

$$N = 15,27 \text{ anos.}$$

Fazendo-se um cálculo sem custo financeiro para o período de retorno do investimento, dividindo-se o valor do equipamento (R\$ 2300,00) pela energia economizada por ano (R\$ 174,42), encontra-se 13,19 anos.

Considerando o custo financeiro, tem-se:

$N = 13,46$ anos

PILLAI & BANERJEE (2006) encontraram um período de retorno de 12 anos para residências. RAIMO & FAGÁ (2006) encontraram, para um custo do equipamento de R\$ 684,00, substituindo a energia elétrica e com taxa de juro de 8% ao ano, um período de retorno de quatro anos.

Para diminuir o período de retorno do investimento, mantendo-se a qualidade dos equipamentos, pode-se utilizar materiais mais baratos, como por exemplo polipropileno no lugar do cobre e o reservatório térmico em aço carbono vitrificado, que tem a mesma durabilidade e custa até 50% menos (REVISTA TÉCHNE, 2008).

5 CONCLUSÕES

Nas condições em que este experimento foi realizado, é possível concluir que há viabilidade técnica na instalação de equipamento de aquecimento de água por energia solar na região oeste do Paraná. O equipamento permite alcançar temperaturas mínimas da água para banho em número de dias suficientes para que o aquecimento elétrico seja apenas complementar e utilizado esporadicamente.

Mantidas as especificações do fabricante, o equipamento funciona de maneira satisfatória. A manutenção esteve restrita à limpeza da placa o que pode ser realizado pelo próprio usuário. Não houve desgaste aparente dos materiais expostos às intempéries no período estudado.

O período de retorno do investimento de um equipamento de aquecimento de água por energia solar etiquetado, para uma residência com duas pessoas é de 15 anos. Mesmo sendo um período de retorno alto, como a vida útil do equipamento é de 25 anos, ainda é um investimento atrativo.

Como o valor do investimento para equipamentos etiquetados pelo INMETRO, para uma residência com duas pessoas, é de R\$ 2300,00 (dois mil e trezentos reais) e pode ser considerado alto, pois corresponde a, aproximadamente, sete salários mínimos, torna-se imprescindível a criação de linhas oficiais de financiamento, com baixas taxas de juros e longos prazos para pagamento.

REFERÊNCIAS

ADAM, R. S. **Princípios do ecoedifício**: interação entre ecologia, consciência e edifício. São Paulo: Aquariana, 2001. 128 p.

ALMEIDA, L. M. A; RIGOLIN, T. B. **Geografia**. São Paulo: Ática, 2002. 464 p.

AMALDI, U. **Imagens da física**. As idéias e as experiências do pêndulo aos quarks. São Paulo: Scipione, 1997. 537 p.

ANDERSON, T. N.; MORRISON, G. L. Effect of load pattern on solar-boosted heat pump water heater performance. Great Britain. **Solar Energy**, v. 81, p. 1386-1395, 2007.

ARRUDA, L. B. **Operação de sistemas de aquecimento solar de água com controle de vazões em coletores planos**. 2004. 71 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade de São Paulo, São Paulo – SP, 2004.

ASIMOV, I. **Cronologia das ciências e das descobertas**. Rio de Janeiro: Civilização Brasileira, 1993. 1060 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 7198**. Instalação prediais de água quente. Rio de Janeiro: 1993.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 12269**. Instalação de sistemas de aquecimento de água em circuito direto - procedimento. Rio de Janeiro: 1992.

AZEVEDO NETTO, J. M.; FERNANDEZ, M. F. y; ARAUJO, R.; ITO, A. E. **Manual de hidráulica**. São Paulo: Edgard Blücher, 1998. 669 p.

BANCO BRASILEIRO DE DESENVOLVIMENTO SOCIAL - BNDES. **Taxa de juros de longo prazo**. Disponível em: <http://www.bndes.gov.br>. Acesso em: 19 mai. 2008.

BARCELLOS JÚNIOR, A. L. **Análise termoeconômica de coletores solares planos**. 2003. 71 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba – PR, 2003.

BATISTA, M; LARA, M. **Fundamentos de engenharia hidráulica**. Belo Horizonte: Editora da UFMG, 2003. 440 p.

BELESSIOTIS, V.; MATHIOULAKIS, E. Analytical approach of thermosiphon solar domestic hot water system performance. Great Britain. **Solar Energy**, v. 72, n. 4, p. 307-315, 2002.

BENTACURT, J. J, V. Aquecimento solar para fabricação de queijo. Dimensionamento e estudo de viabilidade de protótipo. ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL – AGRENER, 2000. Campinas. **Anais...** Campinas: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola - SBEA, 2002. 1 CD-ROM

BRANCO, S. M. **Água: origem, uso e preservação.** São Paulo: Moderna, 2003. 96 p.

----- **Energia e meio ambiente.** São Paulo: Moderna, 2004. 144 p.

BRASIL, **Constituição da República Federativa do Brasil.** São Paulo: Saraiva, 1999. 267 p.

BRAZIL, O. A. V. **Regulação e apropriação de energia térmica solar pela população de baixa renda no Brasil.** 2006. 121 f. Dissertação (Mestrado em Regulação da Indústria de Energia) - Universidade Salvador, UNIFACS, Salvador – BA, 2006.

BRINKWORTH, B. J. **Energia solar para el hombre.** Madri: H. Blume, 1982. 242 p.

BROWN, G. Z.; DE KAY, M. **Sol, vento & luz.** Estratégias para o projeto de arquitetura. Porto Alegre: Bookman, 2004. 415 p.

BUDIARDJO, I.; MORRISON, G. L.; BEHNIA, M. Natural circulation flow through water-in-glass evacuated tube solar collectors. Great Britain. **Solar Energy**, v. 81, p. 1460-1472, 2007.

CABIROL, T.; PELISSOU, A.; ROUX D. **O aquecedor solar de água.** Lisboa: Cetop, 1980.

CARDOSO, L. C.; SCALON, V. L.; PADILHA, A. Método comparativo de baixo custo para estimativa de eficiência térmica no desenvolvimento de sistemas de aquecimento solar. CONGRESSO IBERO-AMERICANO DE ENGENHARIA MECÂNICA, 8, 2007. Cusco, Peru. **Anais...** Cusco, Peru: Federacion Iberoamericana de Ingenieria Mecânica, 2007. código 1331. 1 CD-ROM.

CARRON, W.; GUIMARÃES, O. **As faces da física**. São Paulo: Moderna, 2006. 751 p.

----- **Física**. São Paulo: Moderna, 2003. 338 p.

CHANG, J. M.; LEU, J. S.; SHEN, M. C.; HUANG, B. J. A proposed modified efficiency for thermosiphon solar heating systems. Great Britain. **Solar Energy**, v. 76, p. 693-701, 2004.

CHANG, J. M.; SHEN, M. C.; HUANG, B. J. A criterion study of solar irradiation patterns for the performance testing of thermosiphon solar water heaters. Great Britain. **Solar Energy**, v. 73, p. 287-792, 2002.

COELHO, R. S. A. **Instalações hidráulicas domiciliares**. Rio de Janeiro: Hemus, 1982. 267 p.

COMETTA, E. **Energia solar: utilização e empregos práticos**. São Paulo: Hemus, 1982. 127 p.

CREDER, H. **Instalações hidráulicas e sanitárias**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2006. 423 p.

DANIELS, F. **Uso directo de la energia solar**. Madri: H. Blume, 1982. 301 p.

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**, Kidlington Oxford, United Kingdom: Elsevier, v. 38, p. 2147-219, 2006.

DIAS, G. F. **Educação ambiental, princípios e práticas**. São Paulo: Gaia, 2003. 551 p.

FAIMAN, D.; HAZAN, H.; LAUFER, I. Reducing the heat loss at night from solar water heaters of the integrated collector-storage variety. Great Britain. **Solar Energy**, v. 71, p. 87-93, 2001.

FAN, J.; SHAH, L. J.; FURBO, S. Flow distribution in a solar collector panel with horizontally inclined absorber strips. Great Britain. **Solar Energy**, v. 81, p. 1501-1511, 2007.

FANTINELLI, J. T.; PEREIRA, J. T. V.; PEREIRA, E. M. D. Evolução da indústria brasileira de sistemas termossolares e os preços do kWh/m². CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA, 11, 2006. Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2006. p. 2007-2018.

FERRARO, N. G.; PENTEADO, P. C.; SOARES, P. T.; TORRES, C. M. **Física ciência e tecnologia**. São Paulo: Moderna, 2001. 665 p.

FERREIRA, A. B. H. **Novo dicionário da língua portuguesa**. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1986. 1838 p.

FIALHO, A. B. **Automação hidráulica**: projetos, dimensionamento e análise de circuitos. São Paulo: Érica, 2003. 284 p.

----- **Instrumentação industrial**: conceitos, aplicações e análises. São Paulo: Érica, 2002. 278 p.

FRAIDENRAICH, N.; TIBA, C.; VILELA, O. C.; BARBOSA, E. M. S.; KREZINGER, A.; PEREIRA, O. S.; ZILLES, R.; Energia solar fotovoltaica. In: TOLMASQUIM, M. T. (Org.). **Fontes renováveis de energia no Brasil**. Rio de Janeiro: Interciência; CENERGIA, 2003. 55 p.

FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. R. **Manual de conforto térmico**. São Paulo: Studio Nobel, 2003. 243 p.

FUENTES, M.; THOMAS, S. **Ecohouse a casa ambientalmente sustentável**. Porto Alegre: Bookman, 2006. 408 p.

GNOATTO, E. **Desempenho de painel fotovoltaico para geração de energia elétrica na região de Cascavel**. 2003. 58 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel – PR, 2003.

GOMES, B. M. M.; COHEN, C. Despesas de energia elétrica no setor residencial brasileiro. CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA, 11, 2006. Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2006. p. 1757-1767.

GRIGOLETO, M. W. **Comportamento do potencial de energia solar na região de Cascavel/PR**. 2001. 46 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Agroindustriais) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel – PR, 2001.

HINRICHS, R. A.; KLEINBACH, M. **Energia e meio ambiente**. São Paulo: Pioneira Thomson Learling, 2003. 543p.

HOUAISS, A.; VILLAR, M. S.; FRANCO, F. M. M. **Dicionário Houaiss da língua portuguesa**. Rio de Janeiro: Objetiva, 2001. 2922 p.

HUSSEIN, H. M. S. Optimization of a natural circulation two phase closed thermosyphon flat plate solar water heater. **Energy Conversion & Management**, Kidlington Oxford, United Kingdom: Elsevier, v. 44, p. 2341-2352, 2003.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE Série histórica do INPC. Disponível em <http://www.ibge.gov.br>. Acessado em 19 de maio de 2008.

KAPTAN, I. N.; KILIC, A. A theoretical and experimental investigation of a novel built-in-storage solar water heater. Great Britain. **Solar Energy**, v. 57, n. 4, p. 3937-400, 1996.

KHALIFA, A-J N. Thermal performance of locally made flat plate solar collectors used as part of a domestic hot water system. **Energy Conversion & Management**, Kidlington Oxford, United Kingdom: Elsevier, 40, p.1825-1833, 1999.

KOLLING, E. M.; SOUZA, S. N. M. de; RICIERI, R. P.; SAMPAIO; S. C.; DALLACORT, R. Análise operacional de um sistema fotovoltaico de bombeamento de água. **Revista de Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 24, n. 3, p. 527-535, set./dez.2004.

KULKARNI, G, N.; KEDARE, S. B.; BANDYOPADHYAY, S. Determination of design space and optimization of solar water heating systems. Great Britain. **Solar Energy**, v. 81, p. 958-968, 2007.

KUMAR, S.; KUMAR, N. Constant delivery temperature solar water heater-an integrated approach. United Kingdom. **Energy Convers**, v.38, p.61-71, 1997.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA; F.O. R. **Eficiência energética na arquitetura**. São Paulo: PW, 1997. 192 p.

LIMA, J. B. A. **Otimização de sistema de aquecimento de água em edificações residenciais unifamiliares utilizando o programa trnsys**. 2003. 70 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade de São Paulo, São Paulo – SP, 2003.

LINSLEY, R. K.; FRANZINI, J. B.; FREYBERG, D. L.; TCHOBANOGLOUS, G. **Water-resources engineering**. Singapore: McGraw-Hill, 1992. 841 p.

LYLE, J. T. **Regenerative design for sustainable development**. New York: John Wiley & Sons, 1994. 97 p.

MACINTYRE, A. J. **Bombas e instalações de bombeamento**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1997. 782 p.

----- **Instalações hidráulicas**. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1982. 770 p.

MADHLOPA, A.; MGAWI, R.; TAULO, J. Experimental study of temperature stratification in a integrated collector-storage solar water heater with two horizontal tanks. Great Britain. **Solar Energy**, v. 80, p. 989-1002, 2006.

MARQUES, J. F.; SKORUPA, L. A.; FERRAZ, J. M. G. (Editores). **Indicadores de sustentabilidade em agroecossistemas**. Jaguariúna, SP: Embrapa Meio Ambiente, 2003. 281 p.

MELO, V. O.; AZEVEDO NETTO, J. M. **Instalações prediais hidráulico-sanitárias**. São Paulo: Edgard Blücher, 1988. 185 p.

MENEZES, L. C. **Ligado na energia**. São Paulo: Ática, 2002. 126 p.

MICHELS, R. N. **Avaliação de um sistema de bombeamento de água alimentado por painéis fotovoltaicos**. 2007. 57 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel – PR, 2007.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - MME. **Balço Energético Nacional** (BEN, 2007). Matrizes energéticas, exercício 2006. Dados do setor residencial (tab. 3.4). Brasil. Disponível em: <http://www.mme.gov.br>. Acesso em: 3 jul. 2008.

MONTANARI, V. **Energia nossa de cada dia**. São Paulo: Moderna, 2003. 71 p.

MORRISON, G. L.; ANDERSON, T.; BEHNIA, M. Seasonal performance rating of heat pump water heaters. Great Britain. **Solar Energy**, v. 76, p. 147-152, 2004.

NAHAR, N, M. Capital cost and economic viability of thermosiphonic solar water heaters manufactured from alternate materials in india. Great Britain. **Renewable Energy**, v. 26, p. 623-635, 2002.

NASCIMENTO, M. V. G.; CHEROTO, S.; GUIMARÃES, A. P. C.; VIANNA JÚNIOR, A. L.; PEREIRA, M. G.; NOGUEIRA, M.; BEZERRA, P.; Energia heliotérmica. In: TOLMASQUIM, M. T. (Org.). **Fontes renováveis de energia no Brasil**. Rio de Janeiro: Interciência; CENERGIA, 2003. 42 p.

OLIVEIRA, C. A. A. de. **Desenvolvimento de um protótipo de rastreador solar de baixo custo e sem baterias**. 2007. 64 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife – PE, 2007.

PALZ, W. **Energia solar e fontes alternativas**. Curitiba, PR: Hemus, 2002. 358 p.

PANESI, A. R. Q. **Fundamentos de eficiência energética. Industrial, comercial e residencial**. São Paulo: Ensino Profissional, 2006. 189 p.

PARKER, B. F. **Solar energy in agriculture**. New York: Elsevier Science, 1991. 211 p.

PEDROSO, N. G.; Clima, meio ambiente e edificação: “orientações para obtenção de dados climáticos necessários ao planejamento e execução de projetos construtivos”. IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas. **Tecnologia de edificações**. Coletânea de trabalhos da divisão de edificações do IPT. São Paulo: Pini, 1988. 4 p.

PEREIRA, E. M. D.; DUARTE, L. O.; PEREIRA, L. T.; FARIA, C. F. C.; SOUZA, H. M; Energia solar térmica. In: TOLMASQUIM, M. T. (Org.). **Fontes renováveis de energia no Brasil**. Rio de Janeiro: Interciência; CENERGIA, 2003. 42 p.

PEREIRA, J. T. V.; FANTINELLI, J. T. Tecnologia solar de baixo custo para aquecimento de água na habitação de interesse social. CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA, 9 SEMINÁRIO LATINO AMERICANO DE ENERGIA: Soluções para a Energia no Brasil, 4, 2002, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: SBPE/COPPE-UFRJ/Clube de Engenharia, 2002. v. 4. p. 1545-1552.

PILLAI, I. R.; BANERJEE, R. Methodology for estimation of potential for solar water heating in a target area. Great Britain. **Solar Energy**, v. 81, p. 162-172, 2006.

PINGUELLI-ROSA, L.; KRAUTER, S. C. W.; NASCIMENTO, J. L. de; SAMPAIO, M.; SILVA, N. F. da; ARAÚJO, M. R. P. de; PETERSEN, R. C. O laboratório de fontes alternativas de energia da UFRJ - LAFAE. CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA, 9 SEMINÁRIO LATINO AMERICANO DE ENERGIA: Soluções para a Energia no Brasil, 4, 2002, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: SBPE/COPPE-UFRJ/Clube de Engenharia, 2002. v. 4. p. 1780-1785.

PRAPAS, D. E. Improving the actual performance of thermosiphon solar water heaters. Great Britain. **Renewable Energy**, v. 6, n. 1, p. 399-406, 1995.

RAIMO, P. A.; FAGÁ, M. T. W. Avaliação do tempo de retorno dos sistemas de aquecimento solar de água no setor residencial. CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA, 11, 2006, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2006. p. 835-843.

RAMALHO JÚNIOR, F.; FERRARO, N. G.; SOARES, P. A. T. **Os fundamentos da física**. v. 3. São Paulo: Moderna, 2007. 508 p.

REVISTA TÉCNICA, São Paulo-SP, Editora Pini, Edição 133, 16 de abril de 2008.

RISPOLDI, I. A. G. **Estudo do aproveitamento da energia solar para aquecimento de água em edificações unifamiliares de baixa renda**. 2001. 234 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas – SP, 2001.

RODRIGUEZ, P. S. **Energía solar para todos**. Con Con, Chile: Centro el Canelo de Nos: 1991. 147 p.

SANTOS, M. M. F.; ROSA, L. P. Substituição da energia elétrica por energia solar em residências e hotéis: o caso de campos. CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA, 9 SEMINÁRIO LATINO AMERICANO DE ENERGIA: Soluções para a Energia no Brasil, 4, 2002, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: SBPE/COPPE-UFRJ/Clube de Engenharia, 2002. v. 4. p. 1728-1735.

SANTOS, S. A. F.; NASCIMENTO FILHO, J. Coletores solares: materiais disponíveis no meio rural. ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL - AGRENER, 4, Campinas – SP, 2002. **Anais...** Campinas: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola - SBEA, 2002. p. 1-6.

SÃO PAULO. Lei municipal n.º 14459 de 3 de julho de 2007. Dispõe sobre a obrigatoriedade de utilização de instalação de aquecimento de água por energia solar. **Diário Oficial de São Paulo**, São Paulo – SP. Data da publicação no diário: 04/07/2007. Não paginado.

SHARIAH, A. M.; LÖF, G. O. G. Effects of auxiliary heater on annual performance of thermosyphon solar water heater simulated under variable operating conditions. Great Britain. **Solar Energy**, v. 60, p. 119-126, 1997.

SILVEIRA, P. R.; SANTOS, W, E. **Automação e controle discreto**. São Paulo: Érica, 1998. 125 p.

SMYTH, M.; EAMES, P. C.; NORTON, B. Heat retaining integrated collector/storage solar water heaters. Great Britain. **Solar Energy**, v. 75, p. 27-34, 2003.

SOLETROL AQUECEDORES SOLARES DE ÁGUA. **Treinamento técnico em aquecimento solar de água**. São Manuel. São Paulo: Senai, 2001. 105 p.

SOUZA, P. A. P.; MAUAD, F. F.; LEME, A. A.; Uso de fontes alternativas de energia: o caso das pequenas centrais hidrelétricas (PCHs). In: FELICIDADE, N.; MARTINS, R. C.; LEME, A. A. **Uso e gestão dos recursos hídricos no Brasil: velhos e novos desafios para a cidadania**. São Carlos: RiMa, 2003. 19p.

STRAZZACAPPA, C.; MONTANARI, V. **Pelos caminhos da água**. São Paulo: Moderna, 2003. 64 p.

THOMAZINI, D.; ALBUQUERQUE, P. U. B. **Sensores industriais fundamentos e aplicações**. São Paulo: Érica, 2005. 220 p.

TIPLER, P. A.; MOSCA, G. **Física para cientistas e engenheiros**. Rio de Janeiro: LTC, 2006. 793 p.

TOLMASQUIM, M. T. **Geração de energia elétrica no Brasil**. Rio de Janeiro: Interciência; CENERGIA, 2005. 198 p.

TOLMASQUIM, M. T. (Org.). **Fontes renováveis de energia no Brasil**. Rio de Janeiro: Interciência; CENERGIA, 2003. 515 p.

TRANSEN AQUECEDOR SOLAR. **Manual de aquecimento solar**. São Paulo: Senai, 2004. 44 p.

TRIGOSO, F. M. **Demanda energética em solar home systems**. 2000. 201 f. Dissertação (Mestrado em Energia) - Universidade de São Paulo, São Paulo – SP, 2000.

VALIATI, M. I.; RICIERI, R. P. Estimativa de irradiação solar global com partição mensal e sazonal para a região de cascavel - PR. **Revista de Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 25, n. 1, p. 76-85, jan./abr. 2005.

WALLACE, W.; WANG, Z. Solar energy in China: development trends for solar water heaters and photovoltaics in the urban environment. **Bulletin of Science, Technology & Society**, Toronto. Canadá. v. 26, p. 135-140, 2006.

WOELZ, A. T. Aquecedor solar de baixo custo (asbc): uma alternativa custo-efetiva. ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL - AGRENER, 4, Campinas – SP, 2002. **Anais...** Campinas: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola - SBEA, 2002. 1 CD-ROM.

ZANIN, A.; SOUZA, S. M. de; SILVA, S. de L. e; RICIERI, R. P.; KOLLING, E. M.; SORDI, A. Métodos indiretos para adequação de força motriz em uma unidade compressora do sistema de refrigeração de um abatedouro de aves. ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL - AGRENER, 4, Campinas – SP, 2002. **Anais...** Campinas: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola - SBEA, 2002. 1 CD-ROM.

ZERROUKI, A.; BOUMÉDIEN, A.; BOUHADEF, K. The natural circulation solar water heater model with linear temperature distribution. Great Britain. **Renewable Energy**, v. 26, p. 549-559, 2002.

ANEXOS

**ANEXO A - ORÇAMENTO DE UM COLETOR SOLAR DE 1,00 X 1,71M,
CATEGORIA A E UM BOILER EM AÇO INOX, COM CAPACIDADE DE 100
LITROS**

Atlântica Piscinas		PREÇO /ORÇAMENTO	
Fone/Fax: (45) 3252-3013 e 3252-4330 Rua Santos Dumont, 2668 - Centro - CEP 85900-010 - TOLEDO - PR		Data de Emissão <u>14/03/08</u>	
Nome: <u>Luiz Henrique Basso</u>			
Endereço: _____			
Município: <u>TOLEDO</u>		Estado: <u>PR.</u>	
Fone: _____		Cx. Postal: _____ CEP _____	
Cond. Pagto. _____			
Endereço p/ Cobrança: _____			
Validade da Proposta: _____		Entrega: _____	
CNPJ/CPF _____		Inscr. Est. _____	
QUANT.	DISCRIMINAÇÃO	P. UNITÁRIO	TOTAL
<u>01</u>	<u>RESERVATORIO TERMICO CAP. 100LTS. AÇO INOX</u>		<u>1.155,00</u>
<u>01</u>	<u>COLETOR SOLAR TRG TAM: 1,71 X 1,0</u>		<u>780,00</u>
	<u>M.O. DE INSTALAÇÃO - C/ TELHADO FACE NORTE</u>		<u>150,00</u>
	<u>IMMETRO - CATEGORIA "A" 10 ANOS GARANTIA.</u>		
ATENÇÃO: Preços informativos sujeitos a alterações e estoque.		TOTAL GERAL: <u>2.085,00</u>	
CLIENTE _____		VENDEDOR <u>[Assinatura]</u>	

ANEXO B - CONTA DE ENERGIA ELÉTRICA RESIDENCIAL DO MÊS DE MARÇO DE 2008



Copel Distribuição S.A.
Rua José Izidoro Biazetto, 158 - Curitiba - PR - CEP 81200-240
CNPJ 04.368.899/0001-06 - Inscrição Estadual 90.233.073-99
www.copel.com

(Ligações gratuitas) **Número de identificação**
5.473.061-9

Atendimento COPEL
0800 51 00 116

Valor a pagar (R\$)
148,17

Ouvیدoria Copel
(Em dias úteis das 8h00 às 18h00)
0800 647 0606

Vencimento
26/03/2008

Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL
144 - Ligação Gratuita de telefones fixos e
Tarifada na origem para telefones celulares 81776 01 051 254100

85812-040 CASCAVEL - PR 5508 F 14/03

81776 01 051 254100 00884040176

81776 01 051 254100

CPF: 00032709145887 Código de faturamento: 0.1.01.0.03

NOTA FISCAL CONTA DE ENERGIA ELETRICA N. 001.346.659 SERIE B

APOS 20 DIAS DO VENCIMENTO, ESTA FATURA NAO PODERA SER PAGA NAS AGENCIAS DOS CORREIOS E NAS CASAS LOTERICAS.

OUTRAS OPCOES PARA PAGAMENTO:
FARMACIAS: DROGASUL, MORIFARMA;
MERCADO GARCIA.

SEQ	PRODUTOS E SERVIÇOS DA COPEL	Valores em R\$
001	IMPORTE DE CONSUMO DE 331 KWH	126,41
002	MULTA ATRASO PAGAMENTO FEV/2008	1,76
003	CONT ILUMIN PUBLICA MUNICIPIO	20,00
VALOR TOTAL		148,17

MARCO/2008

LEITURA EM 10/03/2008	68153
LEITURA EM 09/02/2008	67822
CONSTANTE DE MULTIPLICAÇÃO	-4
CONSUMO FATURADO (KWH)	331
CONSUMO MEDIO DIARIO	11,03
DATA APRESENTAÇÃO	16/03/2008
DATA PREVISTA PROXIMA LEITURA	09/04/2008

ATIVIDADE: RESIDENCIAL
NÚMERO DO MEDIDOR - TRIFASICO 00884040176

RESERVADO AO FISCO
F23F.C462.C7CA.9E05.CA61.2480.238C.A2D6

HISTÓRICO DE CONSUMO E PAGAMENTO - 13/03/2008

MÊS	CONSUMO	VALOR	DATA PGTO
FEV/2008	231	100,22	10/03/2008
JAN/2008	196	85,26	25/01/2008
DEZ/2007	316	142,06	09/01/2008
NOV/2007	283	125,58	07/12/2007
OUT/2007	279	124,32	08/11/2007
SET/2007	315	141,85	09/10/2007
AGO/2007	307	138,84	06/09/2007
JUL/2007	310	141,02	03/08/2007
JUN/2007	346	155,62	09/07/2007
MAI/2007	320	146,09	11/06/2007
ABR/2007	380	176,33	10/05/2007
MAR/2007	299	132,67	10/04/2007

DEMONSTRATIVO DE ICMS

DESCRIÇÃO	ALÍQUOTA	BASE DE CÁLCULO	VALOR
ICMS	27,00%	126,41	34,13

DEMONSTRATIVO DE TARIFAS (TRIB.INCLUIDO)

Consumo	x	Tarifa	=	126,41	Composição dos Valores
331	kWh	0,38193			Fatura em R\$
					Energia 44,59
					Distribuição 32,98
					Transmissão 7,88
					Encargos 8,14
					Tributos 41,84
				126,41	126,41

INCLUSO EM SUA FATURA A ALIQUOTA DE 6,09% REFERENTE AO PIS-PASEP E COFINS CONFORME LEGISLAÇÃO ESPECÍFICA. PAGUE EM DIA, EVITE MULTA DE 2%.

REAJUSTE TARIFARIO MEDIO DE (-)1,22% AUTORIZADO PELA RES. ANEEL 479 DE 19/06/2007.

A COPEL APLICA TARIFAS MAIS BARATAS A PARTIR DE 24/06/2007.

COMPARE SUA CONTA.

DENUNCIE TRAFICO DE DROGAS E VIOLENCIA INFANTIL, LIGUE 181

Fatura em Braille

A Copel, contribuindo para a inclusão social, disponibiliza aos deficientes visuais a fatura de energia em Braille.

Mais informações: 0800 51 00 116 (ligação gratuita, 24 horas por dia).

**ANEXO C - INFLAÇÃO PARA O ANO DE 2007, INDEXADA PELO INPC
(ÍNDICE NACIONAL DE PREÇOS AO CONSUMIDOR), FORNECIDA PELO
IBGE (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA)**

SÉRIE HISTÓRICA - INPC							
ANO	MÊS	NÚMERO ÍNDICE (DEZ 93 = 100)	VARIÇÃO (%)				
			NO MÊS	3 MESES	SEMESTRAL	NO ANO	12 MESES
2005	JAN	2474,2100000000000	0,57	1,88	2,74	0,57	5,86
	FEV	2485,1000000000000	0,44	1,88	2,68	1,01	5,91
	MAR	2503,2400000000000	0,73	1,75	3,25	1,75	6,08
	ABR	2526,0200000000000	0,91	2,09	4,01	2,68	6,61
	MAI	2543,7000000000000	0,70	2,36	4,28	3,39	6,93
	JUN	2540,9000000000000	-0,11	1,50	3,28	3,28	6,28
	JUL	2541,6600000000000	0,03	0,62	2,73	3,31	5,54
	AGO	2541,6600000000000	0,00	-0,08	2,28	3,31	5,01
	SET	2545,4700000000000	0,15	0,18	1,69	3,47	4,99
	OUT	2560,2300000000000	0,58	0,73	1,35	4,07	5,42
	NOV	2574,0500000000000	0,54	1,27	1,19	4,63	5,53
	DEZ	2584,3500000000000	0,40	1,53	1,71	5,05	5,05
2006	JAN	2594,1700000000000	0,38	1,33	2,07	0,38	4,85
	FEV	2600,1400000000000	0,23	1,01	2,30	0,61	4,63
	MAR	2607,1600000000000	0,27	0,88	2,42	0,88	4,15
	ABR	2610,2900000000000	0,12	0,62	1,96	1,00	3,34
	MAI	2613,6800000000000	0,13	0,52	1,54	1,13	2,75
	JUN	2611,8500000000000	-0,07	0,18	1,06	1,06	2,79
	JUL	2614,7200000000000	0,11	0,17	0,79	1,18	2,87
	AGO	2614,2000000000000	-0,02	0,02	0,54	1,16	2,85
	SET	2618,3800000000000	0,16	0,25	0,43	1,32	2,86
	OUT	2629,6400000000000	0,43	0,57	0,74	1,75	2,71
	NOV	2640,6800000000000	0,42	1,01	1,03	2,18	2,59
	DEZ	2657,0500000000000	0,62	1,48	1,73	2,81	2,81
2007	JAN	2670,0700000000000	0,49	1,54	2,12	0,49	2,93
	FEV	2681,2800000000000	0,42	1,54	2,57	0,91	3,12
	MAR	2693,0800000000000	0,44	1,36	2,85	1,36	3,30
	ABR	2700,0800000000000	0,26	1,12	2,68	1,62	3,44
	MAI	2707,1000000000000	0,26	0,96	2,52	1,88	3,57
	JUN	2715,4900000000000	0,31	0,83	2,20	2,20	3,97
	JUL	2724,1800000000000	0,32	0,89	2,03	2,53	4,19
	AGO	2740,2500000000000	0,59	1,22	2,20	3,13	4,82
	SET	2747,1000000000000	0,25	1,16	2,01	3,39	4,92
	OUT	2755,3400000000000	0,30	1,14	2,05	3,70	4,78
	NOV	2767,1900000000000	0,43	0,98	2,22	4,15	4,79
	DEZ	2794,0300000000000	0,97	1,71	2,89	5,16	5,16
2008	JAN	2813,3100000000000	0,69	2,10	3,27	0,69	5,36
	FEV	2826,8100000000000	0,48	2,15	3,16	1,17	5,43
	MAR	2841,2300000000000	0,51	1,69	3,43	1,69	5,50
	ABR	2859,4100000000000	0,64	1,64	3,78	2,34	5,90

http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/precos/inpc_ipca/defaultinpc.shtm em
19/05/2008.

ANEXO D - TAXA DE JUROS PARA FINANCIAMENTOS DE EQUIPAMENTOS, TJLP (TAXA DE JUROS DE LONGO PRAZO) PARA O ANO DE 2007, FORNECIDA PELO BNDES (BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO SOCIAL)

BNDES: Taxa de juros de longo prazo - TJLP

Página 1 de 2



BNDES - O banco do desenvolvimento de todos os brasileiros

[Custos Financeiros](#) > Taxa de Juros de Longo Prazo - TJLP

Taxa de Juros de Longo Prazo - TJLP

A Taxa de Juros de Longo Prazo - TJLP foi instituída pela Medida Provisória nº 684, de 31.10.94, publicada no Diário Oficial da União em 03.11.94, sendo definida como o custo básico dos financiamentos concedidos pelo BNDES.

Posteriormente alterações ocorreram através das Medidas Provisórias nº 1.790, de 29.12.98 e da [Medida Provisória nº 1.921](#), de 30.09.99, convertida na lei nº 10.183 de 12.02.2001.

A Taxa de Juros de Longo Prazo - TJLP tem período de vigência de um trimestre-calendário e é calculada a partir dos seguintes parâmetros:

I - meta de inflação calculada pro rata para os doze meses seguintes ao primeiro mês de vigência da taxa, inclusive, baseada nas metas anuais fixadas pelo Conselho Monetário Nacional;
II - prêmio de risco.

A TJLP é fixada pelo Conselho Monetário Nacional e divulgada até o último dia útil do trimestre imediatamente anterior ao de sua vigência. Em [moedas contratuais](#), a TJLP, expressa em percentual ao ano, tem o código 311.

Evolução (% a.a.)

2008

ABRIL a JUNHO 6,25%
JANEIRO a MARÇO 6,25%

2007

OUTUBRO a DEZEMBRO 6,25%
JULHO a SETEMBRO 6,25%
ABRIL a JUNHO 6,5%
JANEIRO a MARÇO 6,5%

2006

OUTUBRO a DEZEMBRO 6,85%
JULHO a SETEMBRO 7,5%
ABRIL a JUNHO 8,15%
JANEIRO a MARÇO 9%

Mais Informações:

- [Evolução da TJLP - de 1995 a 2005 \(arquivo xls\)](#)
- [Taxa de Juros de Longo Prazo - TJLP: \(*\)](#), regulamentação, parâmetros, evolução, metodologia de cálculo dos contratos do BNDES. Última versão: 29.04.2008

(*) Documento disponível em formato PDF. Para visualizar um arquivo PDF é necessário o programa Acrobat Reader, que pode ser gratuitamente obtido no site da [Adobe](#).

[topo](#)