

IDENTIFICAÇÃO DE VARIÁVEIS CRÍTICAS E SIMULAÇÃO DO USO DE COLETORES SOLARES EM PRÉDIOS RESIDENCIAIS

Daniel Moreira Coelho

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Planejamento Energético, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Planejamento Energético.

Orientador: Maurício Cardoso Arouca

Rio de Janeiro

Março de 2011

IDENTIFICAÇÃO DE VARIÁVEIS CRÍTICAS E SIMULAÇÃO DO USO DE
COLETORES SOLARES EM PRÉDIOS RESIDENCIAIS

Daniel Moreira Coelho

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA
(COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE
EM CIÊNCIAS EM PLANEJAMENTO ENERGÉTICO.

Examinada por:

Prof. Maurício Cardoso Arouca, D.Sc

Prof. Alexandre Salem Szklo, D.Sc.

Dr. Amaro Pereira, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MARÇO DE 2011

Coelho, Daniel Moreira

Identificação de Variáveis Críticas e Simulação do
Uso de Coletores Solares em Prédios Residenciais /
Daniel Moreira Coelho. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE,
2011.

XII, 113 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Maurício Cardoso Arouca

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de
Planejamento Energético, 2011.

Referencias Bibliográficas: p. 95-99

1. Energia Solar. 2. Aquecimento de água. 3. Prédios
Residenciais. I. Arouca, Maurício Cardoso. II.
Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE,
Programa de Planejamento Energético. III. Título.

À minha esposa Taty e aos meus filhos Sofia e Davi.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus por ter concluído mais uma etapa da minha vida e principalmente por colocar pessoas tão especiais no meu caminho.

Minha esposa Taty, que conviveu com minha ausência, tendo paciência e carinho durante todo o mestrado.

Minha mãe, que sempre me incentivou a estudar e buscar os meus objetivos independentes de quais fossem.

Meu pai, amigo verdadeiro, que sempre apoiou minhas decisões, meu maior incentivador, espelho de pessoa que busco ser na minha vida.

Minha irmã Lília, que me proporcionou o tempo necessário para a realização deste trabalho.

Ao amigo Saul maior incentivador para ingresso no mestrado.

Ao amigo Alan pela convivência agradável, certamente mais uma pessoa do bem que entrou na minha vida. À amiga Luciana pela ajuda na formatação final do trabalho.

Ao amigo Getulio pelas informações passadas e Juliana pela convivência no PPE.

Meu orientador Maurício Arouca, professor e amigo, que com suas críticas e sugestões contribuiu enormemente com a realização deste trabalho.

Aos alunos do PPE com os quais compartilhei momentos importantes em sala de aula. Entre eles o amigo Gustavo com o qual me identifiquei e dividi minhas dúvidas e preocupações no início do mestrado.

Aos professores Roberto Schaeffer e Alexandre Szklo, pelo aprendizado proporcionado ao longo do mestrado.

Aos funcionários do PPE por proporcionar a estrutura necessária ao funcionamento do PPE.

Ao CNPQ que proporcionou o apoio financeiro necessário.

E a todas as pessoas que de alguma forma contribuíram para a realização desta dissertação.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

IDENTIFICAÇÃO DE VARIÁVEIS CRÍTICAS E SIMULAÇÃO DO USO DE COLETORES SOLARES EM PRÉDIOS RESIDENCIAIS

Daniel Moreira Coelho

Março/2011

Orientadores: Maurício Cardoso Arouca

Programa: Planejamento Energético

Este trabalho tem o objetivo de identificar as variáveis mais determinantes para justificar o uso da energia solar em substituição às fontes de energia convencionais utilizadas no Brasil, entre elas a energia elétrica, o GN (gás natural) e o GLP (gás liquefeito de petróleo). Para isso, serão analisadas as variáveis físicas, tecnológicas e econômicas envolvidas em um estudo de viabilidade da oportunidade do uso da energia solar. O papel de cada variável será analisado através de um estudo de caso real simulado através do modelo Retscreen. Para isso, foram apresentados os fenômenos físicos envolvidos na conversão da energia solar, suas tecnologias de aproveitamento, o estado da arte da tecnologia de aquecimento solar de água com seus principais componentes, entre eles, o coletor solar, o reservatório térmico e o sistema de aquecimento auxiliar. Também foi analisado o panorama atual do uso da energia solar para aquecimento no Brasil e no mundo.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

IDENTIFICATION OF CRITICAL MEASUREMENTS AND SIMULATION OF THE USE OF SOLAR COLLECTORS IN RESIDENTIAL BUILDINGS

Daniel Moreira Coelho

March/2011

Advisor: Maurício Cardoso Arouca

Program: Energy Planning

This study aims at identifying the most crucial variables that justify the use of solar energy in replacement of conventional sources of energy used in Brazil, including electricity, NG (natural gas) and LPG (liquefied petroleum gas). We shall analyze the following physical, technological and economic variables involved in a feasibility study on the opportunity of using solar energy. The role of each variable will be examined through a real case study simulated by the Retscreen models. For such, we present the physical phenomena involved in the conversion of solar energy; the technologies in use, the state-of-the-art of solar water heaters technology, with emphasis on its main components, among which the solar collector, the storage tank and the auxiliary heating system. We also analyze the current status of the use of solar energy for heating purpose both in Brazil and worldwide.

SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO	1
2 - O PANORAMA ATUAL DO USO DA ENERGIA SOLAR PARA AQUECIMENTO DE ÁGUA NO BRASIL E NO MUNDO.....	4
2.1 - O USO DA ENERGIA SOLAR PARA AQUECIMENTO DE ÁGUA NO MUNDO	4
2.2 - O USO DA ENERGIA SOLAR PARA AQUECIMENTO DE ÁGUA NO BRASIL	8
2.2.1. - Avaliação da participação da energia elétrica consumida no Brasil utilizada para aquecimento de água	9
2.2.2. - Participação do consumo de Gás Natural e de GLP Utilizado para Aquecimento de Água no Brasil	13
2.3 - AVALIAÇÃO DO USO DE ENERGIA SOLAR PARA AQUECIMENTO DE ÁGUA NO BRASIL	14
2.4 - O MERCADO, SEUS MARCOS REGULATÓRIOS E PRINCIPAIS DESAFIOS	18
2.5 - PRINCIPAIS BARREIRAS AO DESENVOLVIMENTO DO MERCADO DE AQUECIMENTO SOLAR	23
3 - CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E TECNOLÓGICAS ASSOCIADAS AO USO DA ENERGIA SOLAR.....	26
3.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DA ENERGIA SOLAR.....	26
3.2 FENÔMENOS FÍSICOS ENVOLVIDOS NA CONVERSÃO DA ENERGIA SOLAR	35
3.3 FORMAS DE APROVEITAMENTO DE ENERGIA SOLAR	39
4 - PRINCIPAIS COMPONENTES DO SISTEMA DE AQUECIMENTO SOLAR DE ÁGUA	47
4.1 PRINCIPAIS COMPONENTES	47
4.2 PRINCIPAIS TIPOS DE COLETORES SOLARES UTILIZADOS PARA AQUECIMENTO DE ÁGUA	50
4.3 RESERVATÓRIO TÉRMICO	59
5 - PRINCIPAIS PARÂMETROS ENVOLVIDOS NA AVALIAÇÃO DO USO DA ENERGIA SOLAR EM SUBSTITUIÇÃO A ENERGIA CONVENCIONAL - ESTUDO DE CASO	65
5.1 CARACTERIZAÇÃO DO ESTUDO DE CASO	66
5.2 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE AQUECIMENTO SOLAR	70
5.3 ANÁLISE DA VIABILIDADE ECONÔMICA	78
5.4 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	86
6 - CONCLUSÕES.....	92

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	95
ANEXO A - PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO SISTEMA DE AQUECIMENTO SOLAR POR TERMOSSIFÃO	100
ANEXO B - PRINCIPAIS COMPONENTES ENCONTRADOS NO SISTEMA DE AQUECIMENTO SOLAR COM SISTEMA AUXILIAR ALIMENTADO POR GN.....	110
ANEXO C - DIMENSIONAMENTO DO RESERVATÓRIO DO SISTEMA A GÁS	111

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 - CLASSIFICAÇÃO DA INSTALAÇÃO DE AQUECIMENTO SOLAR EM FUNÇÃO DO VOLUME.....	21
TABELA 4.1- FATOR K.....	55
TABELA 5.1- CONSUMO ATUAL DE GÁS NATURAL.....	67
TABELA 5.2- TARIFA DE GÁS NATURAL RESIDENCIAL	68
TABELA 5.3- TEMPERATURA AMBIENTE MÉDIA NA CIDADE DO RIO DE JANEIRO.....	68
TABELA 5.4- CONSUMO DE ÁGUA QUENTE POR PESSOA EM FUNÇÃO DO PONTO DE CONSUMO.....	70
TABELA 5.5- NÚMERO DE MORADORES EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE QUARTOS NA UNIDADE RESIDENCIAL	71
TABELA 5.6- FATOR DE OCUPAÇÃO DE EDIFICAÇÕES RESIDENCIAIS	71
TABELA 5.7- DEMANDA DE ÁGUA QUENTE DO ESTUDO DE CASO.....	72
TABELA 5.8- PARÂMETROS ADOTADOS PARA O DIMENSIONAMENTO DO VOLUME DO RESERVATÓRIO TÉRMICO	74
TABELA 5.9- CARACTERÍSTICAS DO COLETOR SOLAR ADOTADO NO ESTUDO DE CASO	76
TABELA 5.10- INVESTIMENTO NO SISTEMA DE AQUECIMENTO SOLAR	79
TABELA 5.11- RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DO CASO BASE NO RETSCREEN	85
TABELA 5.12 – IMPACTO DA VARIAÇÃO DA ÁREA COLETORA	87
TABELA 5.13 – IMPACTO DA INCLINAÇÃO DO COLETOR SOLAR	88
TABELA 5.14 – IMPACTO DA VARIAÇÃO DA FRAÇÃO SOLAR.....	88
TABELA 5.15 – COMPORTAMENTO DE DIFERENTES SISTEMAS DE AQUECIMENTO SOLAR DE ÁGUA.....	89
TABELA 5.16 - SIMULAÇÃO DA VARIAÇÃO REGIONAL.....	90
TABELA 5.17 - IMPACTO DA VARIAÇÃO DA TAXA DE DESCONTO	91

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2-1 - PAÍSES QUE PARTICIPARAM DO ESTUDO DA SHC_EIA.....	4
FIGURA 2-2 - PARTICIPAÇÃO DOS COLETORES EM OPERAÇÕES NO ANO DE 2008	5
FIGURA 2-3 - DISTRIBUIÇÃO DE COLETORES POR TIPO NO MUNDO EM 2008	6
FIGURA 2-4 - CAPACIDADE INSTALADA DE COLETOR SOLAR PARA AQUECIMENTO DE ÁGUA EM 2008	6
FIGURA 2-5 - CAPACIDADE INSTALADA DE COLETORES SOLARES PLANOS FECHADOS E DE TUBO DE VÁCUO EM 2008.....	7
FIGURA 2-6 - CAPACIDADE INSTALADA DE COLETORES SOLARES ABERTO EM 2008.....	7
FIGURA 2-7 - RADIAÇÃO SOLAR NA CHINA.....	8
FIGURA 2-8 - FONTE UTILIZADA PARA AQUECIMENTO DE ÁGUA PARA BANHO	9
FIGURA 2-9 - CONSUMO FINAL NO SETOR RESIDENCIAL POR TIPO DE USO	10
FIGURA 2-10 - CURVA DE CARGA DIÁRIA MÉDIA NO BRASIL.....	10
FIGURA 2-11 - NÚMERO DE CHUVEIRO ELÉTRICO POR RESIDÊNCIA NO BRASIL	11
FIGURA 2-12 - DOMICÍLIOS QUE POSSUEM PELO MENOS UM CHUVEIRO ELÉTRICO NO BRASIL.....	11
FIGURA 2-13 - TEMPO MÉDIO DO BANHO POR PESSOA UTILIZANDO CHUVEIRO ELÉTRICO	12
FIGURA 2-14 - PREDISPOSIÇÃO PARA SUBSTITUIR O CHUVEIRO ELÉTRICO POR AQUECEDOR SOLAR	12
FIGURA 2-15 - PREDISPOSIÇÃO PARA SUBSTITUIR O SISTEMA DE AQUECIMENTO DE ÁGUA ELÉTRICO PARA GÁS	13
FIGURA 2-16 - CONHECIMENTO DO SISTEMA DE AQUECIMENTO SOLAR E A GÁS.....	14
FIGURA 2-17 - RADIAÇÃO SOLAR NO BRASIL	15
FIGURA 2-18- IRRADIAÇÃO SOLAR GLOBAL MÉDIA	16
FIGURA 2-19 - EXPECTATIVA DE CRESCIMENTO DO MERCADO DE AQUECIMENTO SOLAR NO BRASIL.....	17
FIGURA 2-20 - USO DE AQUECIMENTO SOLAR POR REGIÃO.....	19
FIGURA 2-21 - PARTICIPAÇÃO DO AQUECIMENTO SOLAR POR SETOR DA ECONOMIA EM 2005	20
FIGURA 2-22 - EVOLUÇÃO DO MERCADO DE AQUECIMENTO SOLAR NO BRASIL	20
FIGURA 2-23 - VENDA DE COLETORES SOLARES EM 2009	21
FIGURA 2-24 - CONJUNTO POPULAR VILA RURAL EM TRÊS ILHAS E ANTONY GAROTINHO EM VOLTA REDONDA RESPECTIVAMENTE	23
FIGURA 3-1- SOL.....	26
FIGURA 3-2- VARIAÇÃO DA CONSTANTE SOLAR.....	27
FIGURA 3-3- ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO	28
FIGURA 3-4 - ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO COM DESTAQUE PARA A BANDA SOLAR	28
FIGURA 3-5- RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL E SUAS COMPONENTES	29
FIGURA 3-6 - MOVIMENTO DE TRANSLAÇÃO DA TERRA.....	30
FIGURA 3-7 - DECLINAÇÃO SOLAR.....	31
FIGURA 3-8 - ZÊNITE	32
FIGURA 3-9 - ÂNGULOS SOLARES	32
FIGURA 3-10 - ÂNGULOS DA INSTALAÇÃO SOLAR	33
FIGURA 3-11- INCLINAÇÃO DE COLETORES SOLARES	34
FIGURA 3-12 - ÂNGULO AZIMUTAL DE SUPERFÍCIE.....	35

FIGURA 3-13- FLUXO DE ENERGIA NO COLETOR SOLAR.....	36
FIGURA 3-14- CONVECÇÃO ENTRE PLACAS PARALELAS.....	37
FIGURA 3-15- FORMAS DE APROVEITAMENTO DA ENERGIA SOLAR	39
FIGURA 3-16 - TEMPERATURA DE TRABALHO DA TECNOLOGIA SOLAR TÉRMICA.....	41
FIGURA 3-17 - CILINDRO PARABÓLICO.....	42
FIGURA 3-18 - ESQUEMA DE FUNCIONAMENTO DO CONCENTRADOR SOLAR.....	43
FIGURA 3-19 - TORRE CENTRAL.....	44
FIGURA 3-20 - DISCO PARABÓLICO.....	45
FIGURA 4-1- SISTEMA DE AQUECIMENTO SOLAR	47
FIGURA 4-2 - COMPONENTES DOS COLETORES SOLARES FECHADOS	48
FIGURA 4-3- ISOLAMENTO TÉRMICO	48
FIGURA 4-4- TUBOS	49
FIGURA 4-5- EFEITO DA PINTURA DA PLACA ABSORVEDORA.....	49
FIGURA 4-6- EFEITO ESTUFA	50
FIGURA 4-7- COLETORES SOLARES ABERTOS	51
FIGURA 4-8- COLETOR SOLAR FECHADO	51
FIGURA 4-9- COLETOR DE TUBOS DE VÁCUO.....	52
FIGURA 4-10- CURVA CARACTERÍSTICA DOS COLETORES E APLICAÇÕES	53
FIGURA 4-11- DISTÂNCIA MÍNIMA ENTRE COLETORES	55
FIGURA 4-12- ASSOCIAÇÃO DE COLETORES SOLARES	56
FIGURA 4-13- COMPORTAMENTO DA TEMPERATURA DO FLUIDO NA ASSOCIAÇÃO EM SÉRIE.....	56
FIGURA 4-14- COMPORTAMENTO DA TEMPERATURA DO FLUIDO NA ASSOCIAÇÃO EM PARALELO DE CANAIS	57
FIGURA 4-15- EQUILÍBRIO HIDRÁULICO NA BATERIA DE COLETORES	58
FIGURA 4-16- RESERVATÓRIO TÉRMICO	60
FIGURA 4-17- ASSOCIAÇÃO EM PARALELO DE RESERVATÓRIOS TÉRMICOS	62
FIGURA 4-18- ASSOCIAÇÃO EM SÉRIE DE RESERVATÓRIOS TÉRMICOS.....	63
FIGURA 4-19- ASSOCIAÇÃO ENTRE RESERVATÓRIO TÉRMICO E AQUECEDOR DE PASSAGEM.....	64
FIGURA 4-20- SISTEMA AUXILIAR EM SÉRIE COM A SAÍDA DE CONSUMO.....	64
FIGURA 5-1- FOTO DO PRÉDIO	66
FIGURA 5-2- SISTEMA CONJUGADO DE AQUECIMENTO A GÁS	66
FIGURA 5-3- RADIAÇÃO SOLAR DIÁRIA NA CIDADE DO RIO DE JANEIRO	69
FIGURA 5-4- VARIAÇÃO DA DEMANDA DE ENERGIA PARA AQUECIMENTO DE ÁGUA AO LONGO DO ANO	75
FIGURA 5-5- DIMENSIONAMENTO DA ÁREA COLETORA A CADA MÊS.....	77
FIGURA 5-6- VARIAÇÃO DA FRAÇÃO SOLAR EM FUNÇÃO DA ÁREA COLETORA.....	81
FIGURA 5-7- FRAÇÃO SOLAR E EFICIÊNCIA DO SISTEMA.....	82
FIGURA 5-8- CONSUMO ANUAL DE GÁS NATURAL.....	83
FIGURA 5-9- CUSTO ANUAL COM GÁS NATURAL	84

1 - INTRODUÇÃO

A energia solar é principal fonte de energia da Terra. As fontes renováveis de energia utilizadas no mundo são de forma direta ou indireta dependentes da energia solar. O aproveitamento pode ser feito de forma direta como no caso da energia solar para aquecimento ou geração de energia elétrica. De forma indireta como no caso da energia hidráulica que depende das chuvas que por sua vez dependem do calor do Sol. Da energia eólica que depende dos ventos que são gerados pelo deslocamento de massas de ar que se deslocam em função de diferença de temperatura causada pela incidência de radiação solar e da energia da biomassa que tem origem nas plantas que necessitam da luz solar para se desenvolver.

As principais fontes de energia não renováveis, como o petróleo e o carvão, também dependem de forma indireta da energia solar, uma vez que, foram formadas por restos de plantas e animais que quando viveram a milhões de anos atrás dependeram da energia solar para se desenvolverem.

Nesta dissertação será abordado o uso da energia solar para aquecimento de água no Brasil, ainda que se encontre pouco desenvolvido quando comparada com outros países. Sua maior participação está localizada no setor residencial, principalmente para substituição da energia elétrica utilizada em aquecedores de passagem (chuveiros elétricos) ou de acumulação. Esses dispositivos podem ser também alimentados a GN (gás natural) ou GLP (gás liquefeito de petróleo).

Apesar de o Brasil possuir um enorme potencial de aproveitamento de energia solar devido ao seu alto nível de insolação, apenas 0,4% das residências utiliza o aquecedor solar para o aquecimento de água para banho (PROCEL, 2007).

O objetivo desta dissertação é identificar as variáveis mais determinantes para justificar o uso da energia solar em substituição as fontes de energia convencionais utilizadas no Brasil, entre elas a energia elétrica, o GN e o GLP. Para isso serão analisadas as variáveis físicas, tecnológicas e econômicas envolvidas em um estudo de viabilidade da oportunidade do uso da energia solar. O papel de cada variável será

analisado através de um estudo de caso real simulado através do modelo Retscreen. Como potencial benefícios do uso mais intensivo da energia solar pode-se destacar a redução do problema do uso intensivo da energia elétrica no horário de ponta do setor elétrico e a redução da poluição ambiental no caso da substituição de combustíveis fósseis.

Esta dissertação está organizada em seis capítulos, incluindo esta introdução. O capítulo 2 apresenta o panorama atual do uso da energia solar para aquecimento no Brasil e no mundo. A princípio são mostrados os países com maior número de instalações de sistemas de energia solar para aquecimento de água e suas principais tecnologias. Em relação ao Brasil a abordagem começa fazendo uma avaliação da participação da energia elétrica, do gás natural e do GLP utilizados para aquecimento de água. Segue com a avaliação do uso de energia solar para aquecimento de água, seu mercado, marco regulatório e as principais barreiras enfrentadas para o desenvolvimento do mercado de aquecimento solar.

O capítulo 3 faz a identificação das principais variáveis físicas e tecnológicas envolvidas no uso da energia solar para aquecimento de água. Os aspectos físicos abordados se referem à radiação solar antes e depois da entrada na atmosfera terrestre quando seu efeito é atenuado por uma série de fatores. Outro aspecto abordado foi a geometria solar, ou seja, os efeitos decorrentes do ângulo de incidência da radiação solar e as inclinações e orientações dos coletores solares em relação ao eixo da Terra.

Os fenômenos físicos envolvidos na conversão da energia solar são apresentados, destacando-se as formas de transferência de calor entre duas fontes e suas perdas. Em relação às características tecnológicas são apresentadas algumas tecnologias de aproveitamento da energia solar, como as tecnologias de geração de calor a altas temperaturas através do emprego de cilindro parabólico, torre central e disco parabólico.

O capítulo 4 apresenta os principais componentes de um sistema de aquecimento solar de água, entre eles: o coletor solar, o reservatório térmico e o sistema de aquecimento auxiliar.

No capítulo 5 são identificados os principais parâmetros envolvidos na avaliação do uso da energia solar em substituição a energia convencional através de um estudo de caso real que consiste na análise da viabilidade de substituição de um sistema de aquecimento de água convencional em um prédio residencial, por um sistema de aquecimento solar. Para isso será realizado o dimensionamento do sistema de aquecimento solar e seu sistema complementar de energia necessário, em seguida a viabilidade econômica e a análise de sensibilidade dos parâmetros.

Por fim, no capítulo 6 são apresentadas as conclusões a respeito dos principais parâmetros envolvidos no uso da energia solar para aquecimento de água em prédios residenciais.

2 - O PANORAMA ATUAL DO USO DA ENERGIA SOLAR PARA AQUECIMENTO DE ÁGUA NO BRASIL E NO MUNDO

2.1 - O uso da energia solar para aquecimento de água no mundo

A capacidade instalada de sistemas de aquecimento solar em operação nos 53 países assinalados no mapa da figura 2.1 é de 151,9 GW_{th}, correspondendo a 217 milhões de metros quadrados de coletores em 2008. Os 53 países correspondem a 61% da população mundial e aproximadamente 90% do mercado de aquecimento solar no mundo (SHC-IEA, 2010).

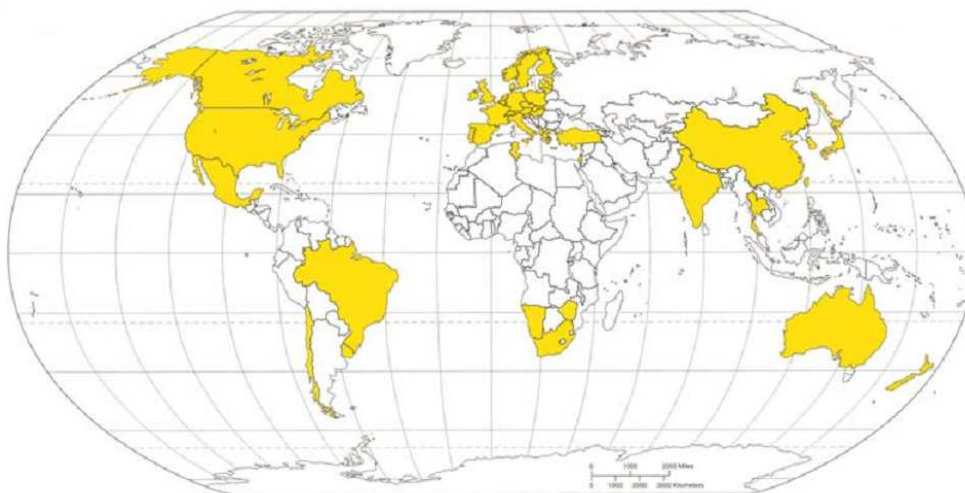


Figura 2-1 - Países que participaram do estudo da SHC_EIA

Fonte: SHC-IEA, 2010

No passado a capacidade instalada de coletores solares era dada em metros quadrados e não em capacidade de produzir calor. Consequentemente era difícil a comparação com outras fontes de energia ficando várias vezes fora de estatísticas importantes. Para que se possa comparar em termos de potência o aquecimento solar com outras fontes de energia, foi definido pela *International Energy Agency's Solar Heating and Cooling Programme* (IEA SHC) um fator de conversão entre metros quadrados de coletor solar e a potência nominal em kW_{th} (potência térmica), onde 1m² de coletor solar equivale a 0,7 kW_{th} (SHC-IEA, 2004).

A figura 2.2 mostra a participação dos países no mercado mundial de aquecimento solar. Os principais mercados estão na China (87,5 GW_{th}), Europa (28,5 GW_{th}) e Estados Unidos (15,1 GW_{th}) que juntos possuem 86,4% de participação no mercado mundial. Os outros países juntos representam 13,6% do mercado, sendo que a América Central e a América do Sul contam com 2,5% do mercado mundial (SHC-IEA, 2010).

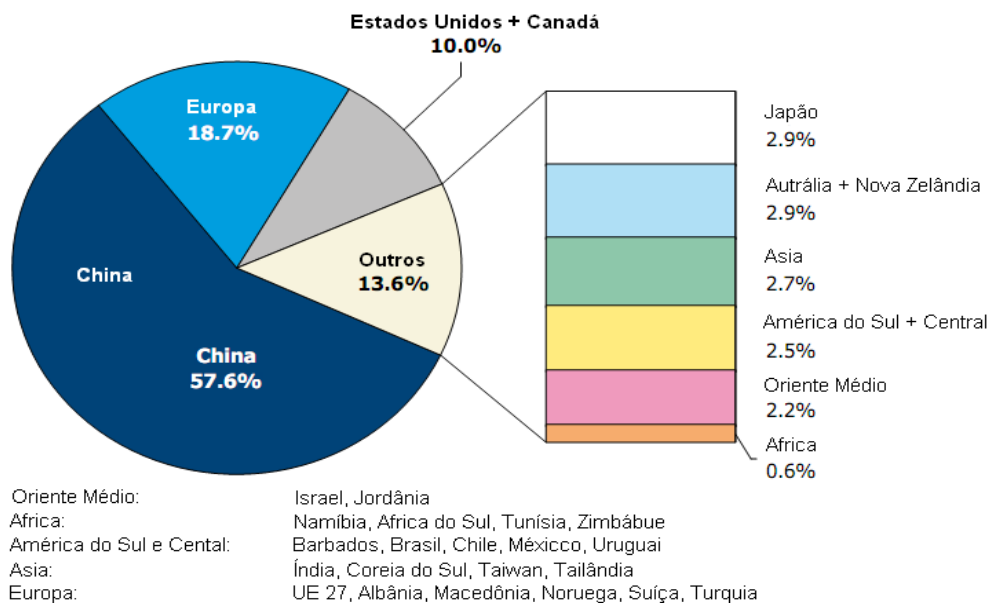


Figura 2-2 - Participação dos coletores em operações no ano de 2008

Fonte: SHC-IEA, 2010

As principais tecnologias de coletores em operação no mundo em 2008, de acordo com dados da IEA (*International Energy Agency*) são mostradas no gráfico da figura 2.3 abaixo. A capacidade instalada de coletores de tubo a vácuo em W_{th}, corresponde a mais da metade dos coletores instalados no mundo. Os coletores planos fechados correspondem a 32,6% e os coletores abertos representam 12,4% (SHC-IEA, 2010).

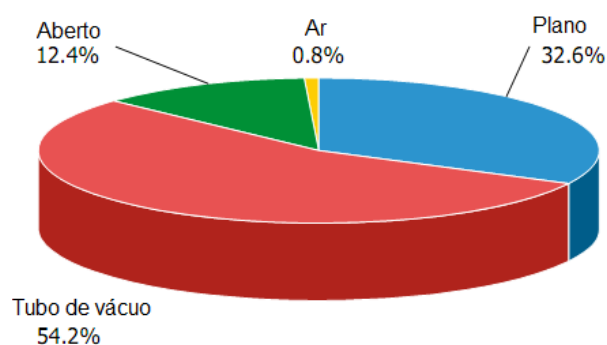


Figura 2-3 - Distribuição de coletores por tipo no mundo em 2008

Fonte: SHC-IEA, 2010

O grande percentual de participação dos coletores de tubo de vácuo é justificado pelo grande uso dessa tecnologia pela China como pode ser observado na figura 2.4.

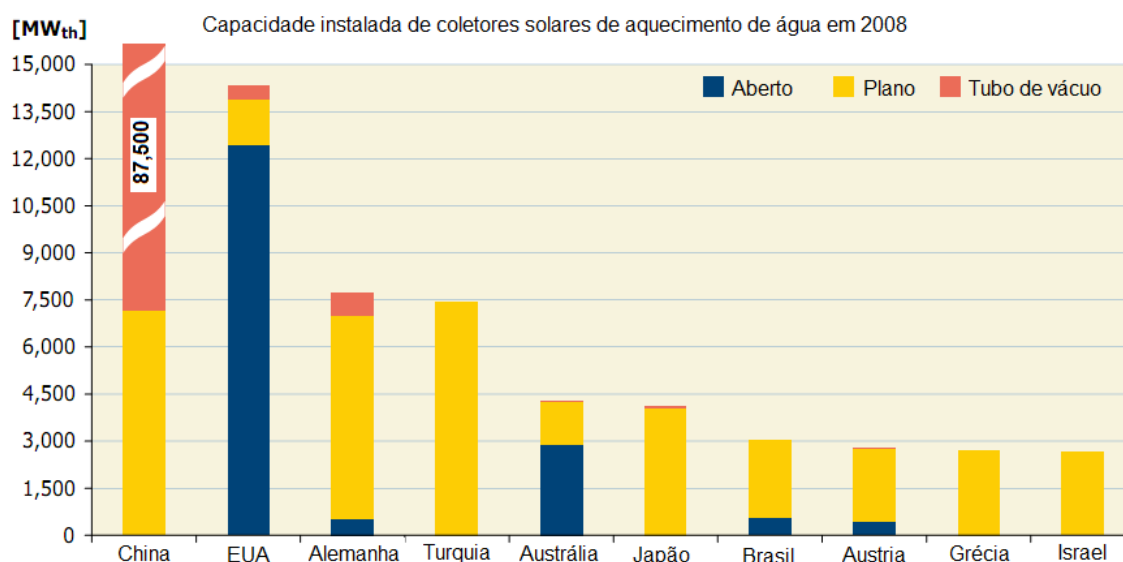


Figura 2-4 - Capacidade instalada de coletor solar para aquecimento de água em 2008

Fonte: SHC-IEA, 2010

A figura 2.5 mostra a capacidade instalada de coletores planos fechados e de tubo de vácuo no ano de 2008 (SHC-IEA, 2010). A China é o país com a maior capacidade instalada, seguida de Turquia e Alemanha. O Brasil ocupa a sétima colocação como mostrado na figura 2.5 abaixo.

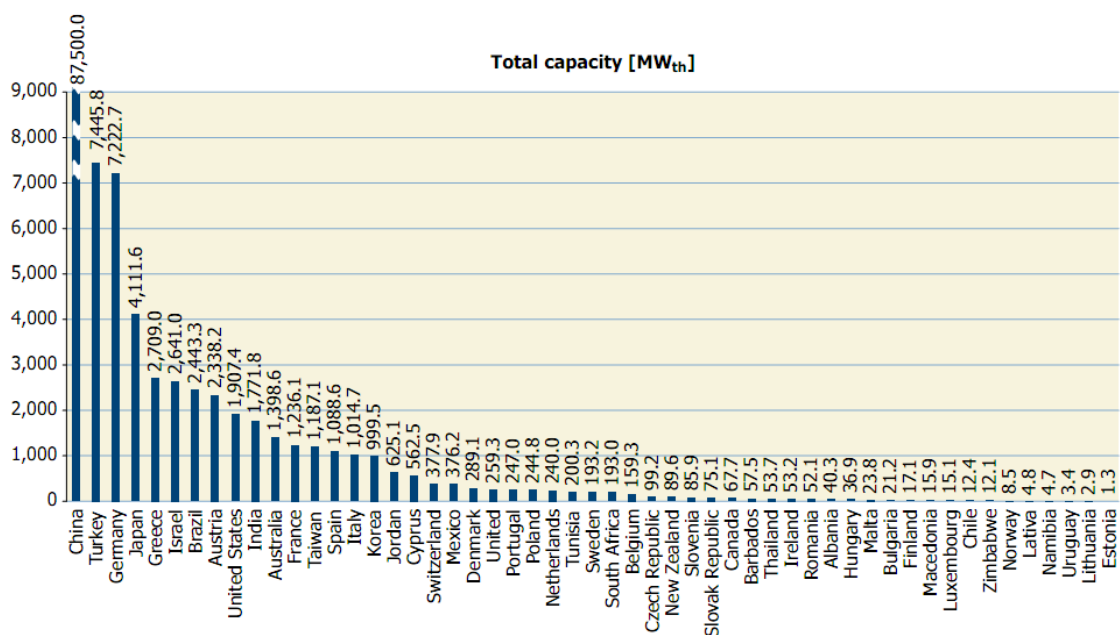


Figura 2-5 - Capacidade instalada de coletores solares planos fechados e de tubo de vácuo em 2008

Fonte: SHC-IEA, 2010

Quando se trata da tecnologia de coletores abertos os Estados Unidos assumem a primeira colocação, seguido de Austrália e Brasil como mostra a figura 2.6.

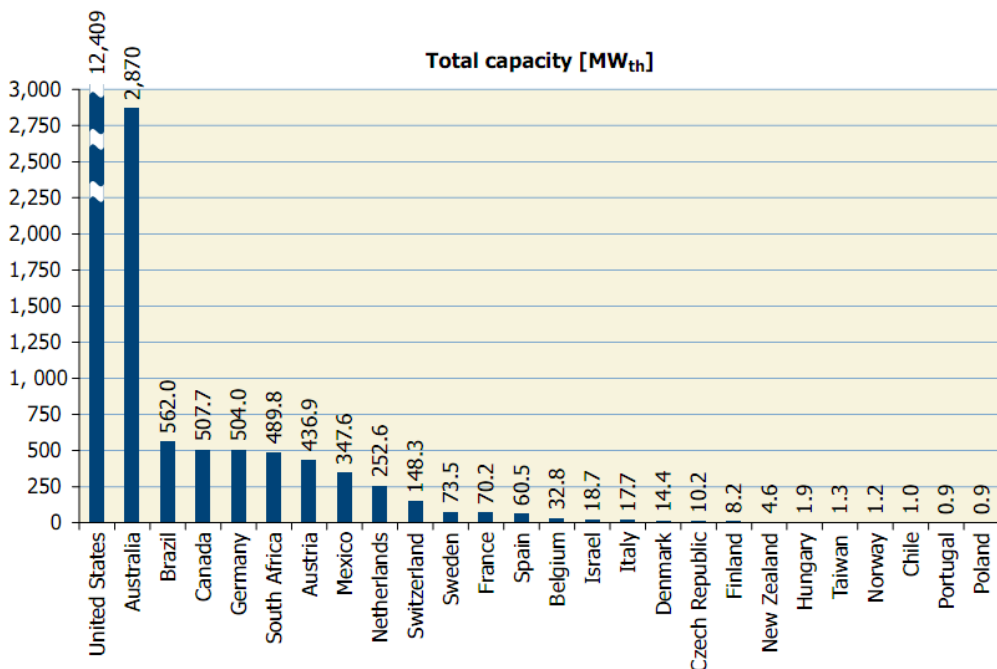


Figura 2-6 - Capacidade instalada de coletores solares aberto em 2008

Fonte: SHC-IEA, 2010

A China, como mostrado anteriormente, vem se destacando como o país que possui a maior quantidade instalada de sistemas de aquecimento de água a partir da energia solar. A figura 2.7 abaixo mostra como está distribuída a radiação solar média anual no território chinês. Pode-se observar que existem regiões de alta incidência de radiação solar, porém há também grandes áreas de baixa insolação.

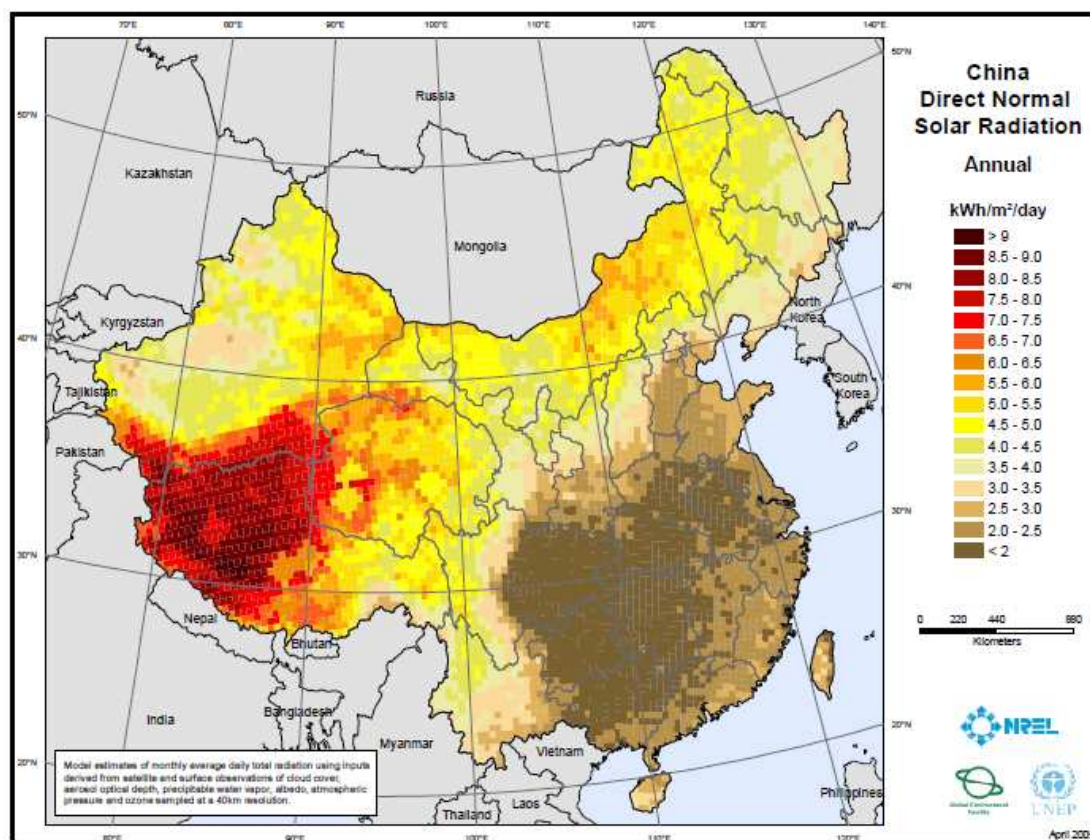


Figura 2-7 - Radiação Solar na China

Fonte: SWERA, 2010

2.2 - O uso da energia solar para aquecimento de água no Brasil

A energia solar para aquecimento de água no Brasil ainda é pouca desenvolvida quando comparada com outros países do mundo. Sua maior participação está concentrada no aquecimento de água, principalmente no setor residencial em substituição da energia elétrica utilizada em chuveiros elétricos, gás natural ou GLP utilizados principalmente em aquecedores de passagem. O uso do gás natural concentra-se principalmente nos centros urbanos que possuem rede canalizada de distribuição de gás.

Apesar de o Brasil possuir um enorme potencial de aproveitamento de energia solar devido ao seu alto nível de insolação o aquecimento de água na grande maioria das residências é feito com chuveiros elétricos.

Como pode ser visto na figura 2.8, 80,9% dos domicílios brasileiros esquentam água para tomar banho. Sendo que em 73,5% deles utilizam eletricidade, 5,9% gás e apenas 0,4% utilizam aquecimento solar. Apenas 18,2% dos domicílios não esquentam água para tomar banho (PROCEL, 2007).

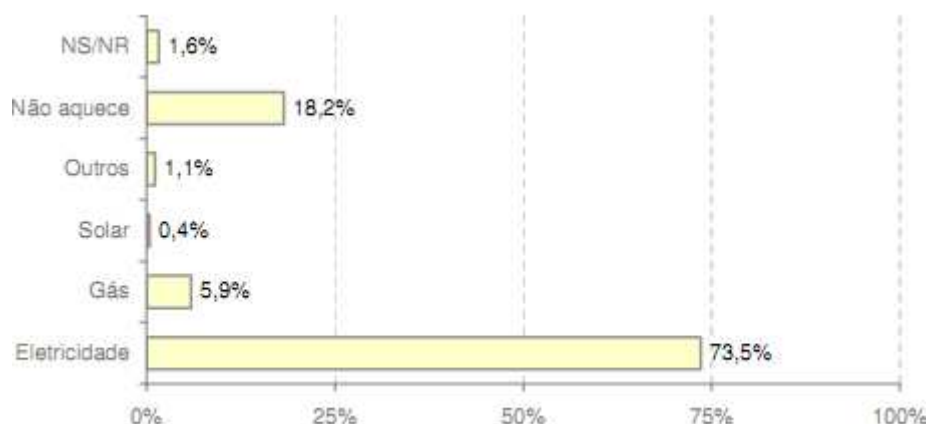


Figura 2-8 - Fonte utilizada para aquecimento de água para banho

Fonte: PROCEL, 2007

2.2.1. - Avaliação da participação da energia elétrica consumida no Brasil utilizada para aquecimento de água

De acordo com o Balanço Energético Nacional o consumo final de energia elétrica em 2009 foi de 426.029 GWh. O setor residencial foi responsável pelo consumo de 101.779 GWh o que corresponde a aproximadamente 24% do consumo final de energia elétrica (EPE, 2010).

Observar-se na figura 2.9 que o consumo final de energia no setor residencial tem o chuveiro elétrico como a principal fonte de consumo de energia elétrica representando 24% do consumo (PROCEL, 2007).

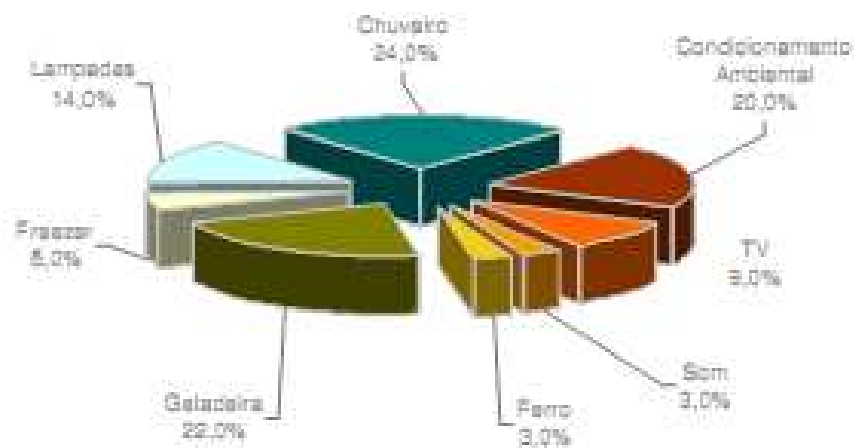


Figura 2-9 - Consumo final no setor residencial por tipo de uso

Fonte: PROCEL, 2007

A figura 2.10 mostra a curva de carga média diária do setor residencial brasileiro. Pode-se observar que o chuveiro elétrico tem grande participação na demanda de energia no horário de ponta do sistema elétrico. Estudos realizados por concessionárias de energia mostram que o chuveiro elétrico, apesar de não consumir energia na maior parte do dia, é responsável por 18 % (RODRIGUES; MATAJS, 2005) da demanda máxima de potência no horário de ponta.

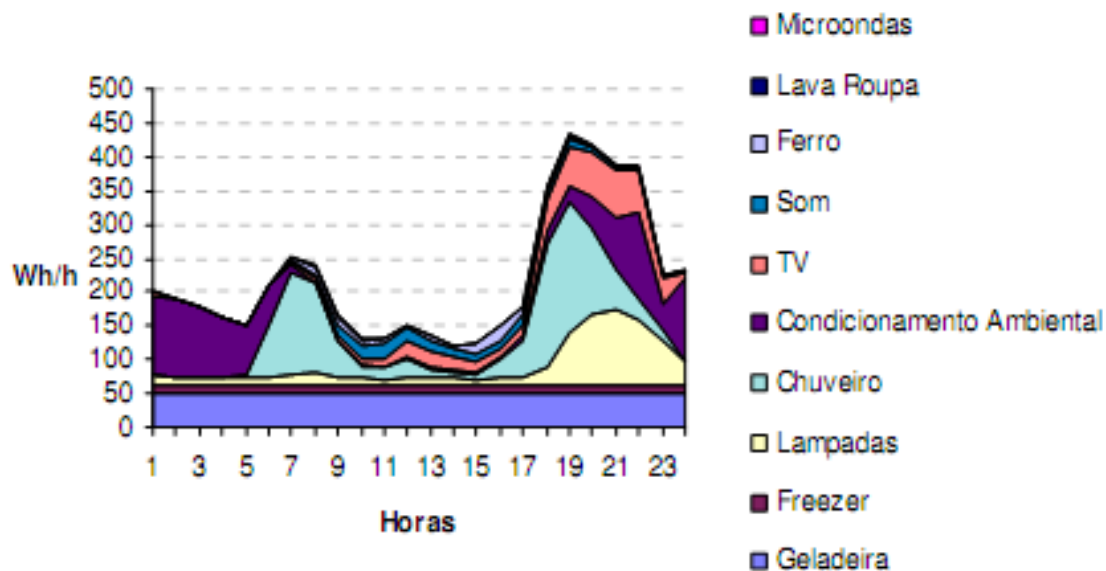


Figura 2-10 - Curva de carga diária média no Brasil

Fonte: PROCEL, 2007

Observa-se na figura 2.11 que algumas regiões como centro-oeste, sudeste e sul possuem em média mais de um chuveiro por domicílio. Porém as regiões norte e nordeste apresentam uma baixa média de posse de chuveiros elétricos, principalmente a região norte. Uma explicação é a condição climática da região com elevadas médias de temperatura durante o ano. A média do Brasil é de 0,89 chuveiros por residência, o que equivale a aproximadamente 30 milhões de chuveiros instalados (PROCEL, 2007).

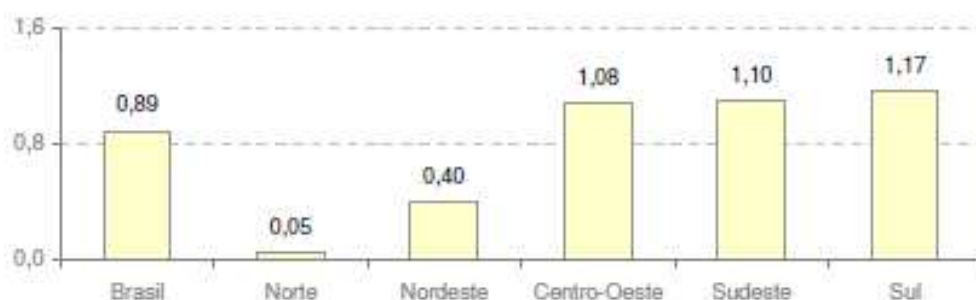


Figura 2-11- Número de chuveiro elétrico por residência no Brasil

Fonte: PROCEL, 2007

Como pode ser visto na figura 2.12, 73,1% dos domicílios brasileiros possuem pelos menos um chuveiro elétrico, com destaque para a região sul onde 98% dos domicílios possuem chuveiro elétrico, enquanto na região norte apenas 4% dos domicílios aquece água com chuveiros elétricos (PROCEL, 2007).

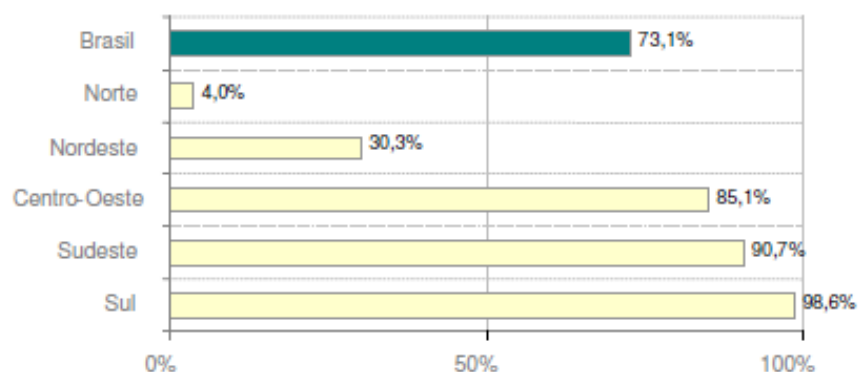


Figura 2-12 - Domicílios que possuem pelo menos um chuveiro elétrico no Brasil

Fonte: PROCEL, 2007

O tempo médio do banho é um importante parâmetro para o dimensionamento de sistemas de aquecimento de água. De acordo com a pesquisa do PROCEL mostrada na figura 2.13 a maioria das pessoas gasta menos de 10 minutos para tomar banho.



Figura 2-13 - Tempo médio do banho por pessoa utilizando chuveiro elétrico

Fonte: PROCEL, 2007

A figura 2.14 mostra a predisposição das pessoas substituírem o chuveiro elétrico pelo aquecimento solar, destaca-se a região sudeste como sendo a mais favorável a substituição e a região sul onde 46,9% dos domicílios entrevistados disseram que não trocariam o atual chuveiro elétrico (PROCEL, 2007).

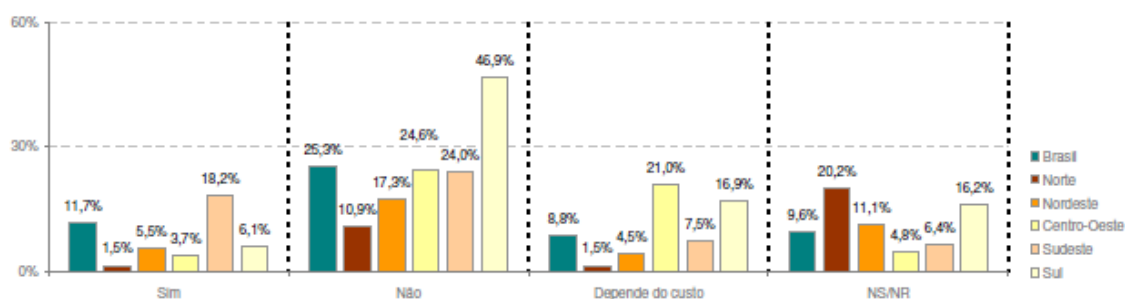


Figura 2-14 - Predisposição para substituir o chuveiro elétrico por aquecedor solar

Fonte: PROCEL, 2007

2.2.2. - Participação do consumo de Gás Natural e de GLP Utilizado para Aquecimento de Água no Brasil

O uso do gás para aquecimento de água no Brasil ainda é pequeno quando comparado com a energia elétrica.

No Brasil apenas 5,9% das residências que aquecem água para tomar banho utilizam o gás como fonte de energia, o que equivale a aproximadamente 1.863 GWh de energia térmica.

Dos domicílios que utilizam o gás como fonte de energia para aquecimento de água 57,6% usam gás natural e 42,4% usam o GLP através de botijão (PROCEL, 2007).

A figura 2.15 mostra a predisposição da população para substituir o sistema de aquecimento de água elétrico para gás. Em média 4% dos usuários de chuveiro elétrico no Brasil estariam dispostos a trocar o chuveiro elétrico pelo sistema de aquecimento a gás, sendo que na região sul esse índice chega a 6%. Entretanto, 34,8% dos brasileiros não estariam dispostos a trocar o chuveiro elétrico pelo chuveiro a gás. Essa rejeição é ainda maior na região sul onde o índice é de 58,8% (PROCEL, 2007).

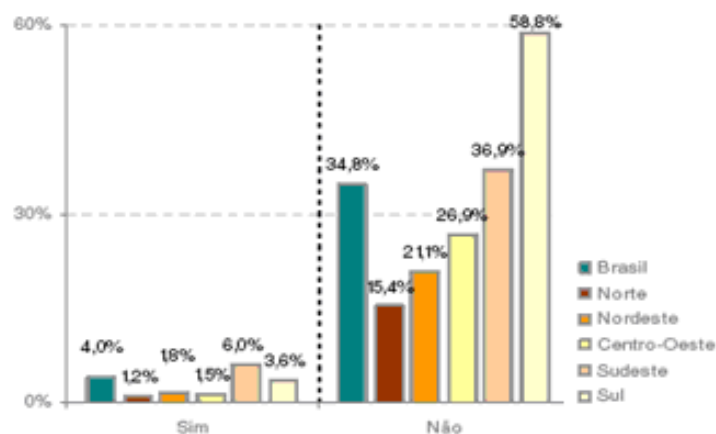


Figura 2-15 - Predisposição para substituir o sistema de aquecimento de água elétrico para gás

Fonte: PROCEL, 2007

A figura 2.16 mostra o conhecimento da população a respeito do sistema de aquecimento de água a gás e solar.

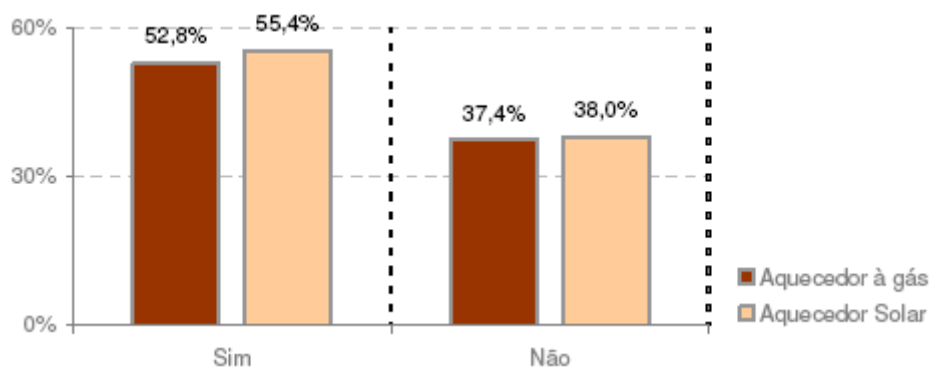


Figura 2-16 - Conhecimento do sistema de aquecimento solar e a gás

Fonte: PROCEL, 2007

Observa-se a partir da figura 2.16 que a maioria das pessoas conhecem os sistemas de aquecimento de água que utilizam o gás ou a energia solar.

2.3 - Avaliação do uso de energia solar para aquecimento de água no Brasil

Com média anual de aproximadamente 280 dias de Sol e 15 trilhões de MWh de energia solar incidentes no ano (RODRIGUES; MATAJS, 2005), o Brasil possui um enorme potencial para o desenvolvimento do mercado de aquecedores solar.

A figura 2.17 abaixo mostra a distribuição da radiação solar média anual no Brasil.

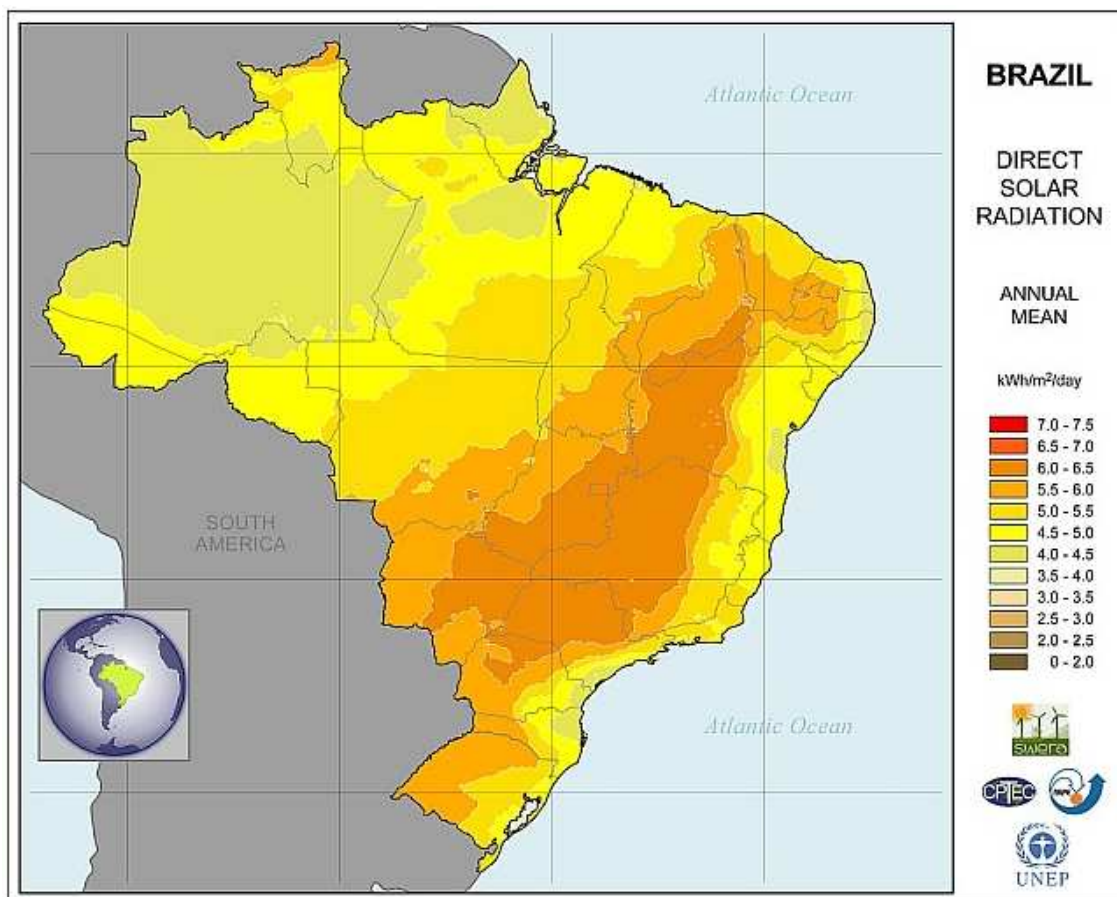


Figura 2-17 - Radiação solar no Brasil

Fonte: SWERA, 2010

A região nordeste, por exemplo, possui insolação comparada as melhores regiões do mundo. As outras regiões apesar de possuírem insolação média anual menor, ainda apresentam melhores índices de radiação que muitos países que fazem uso intensivo da energia solar para aquecimento de água, como pode ser observado na figura 2.18, que mostra a irradiação solar global média.

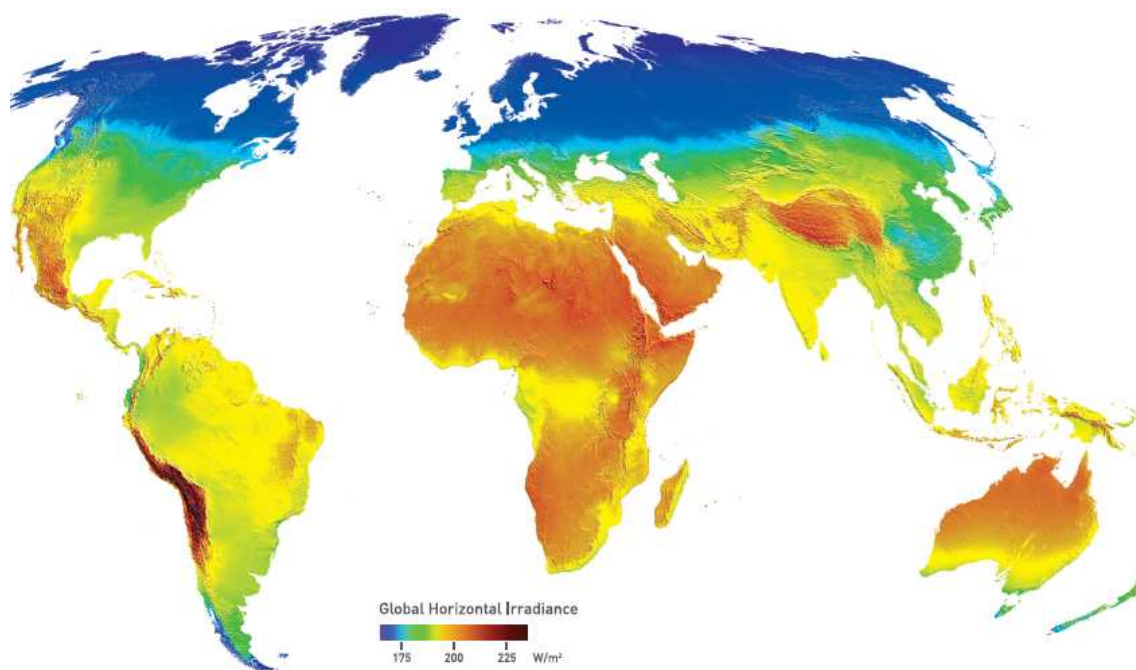


Figura 2-18- Irradiação solar global média

Fonte: 3TIER, 2010

Os níveis mais baixos de radiação no Brasil ainda são mais alto que as melhores regiões da Alemanha (3TIER, 2010), por exemplo, onde a energia solar é amplamente utilizada (POHL, 2010). Mesmo com o elevado potencial de aproveitamento, a energia solar não chega a ser representativa na matriz energética brasileira.

Por se localizar na região entre os trópicos, portanto próximo a linha do equador o Brasil se beneficia de altos índices de radiação solar. A energia solar para aquecimento de água tem se mostrado como uma opção viável para a redução do consumo de energia elétrica e de derivados de petróleo no setor residencial. Além disso, no caso da substituição do uso de energia elétrica para aquecimento de água permite a modulação da curva de carga das concessionárias de energia ao reduzir a demanda no horário de ponta. A substituição do chuveiro elétrico pelo aquecimento solar garante ao país uma geração virtual de energia elétrica, uma vez que a energia elétrica não utilizada nos chuveiros não precisaria ser gerada. No caso de substituição dos hidrocarbonetos permite reduzir a poluição urbana e reduzir a emissão de gases que produzem o efeito estufa.

A figura 2.19 mostra a expectativa de crescimento do mercado de aquecimento solar no Brasil.

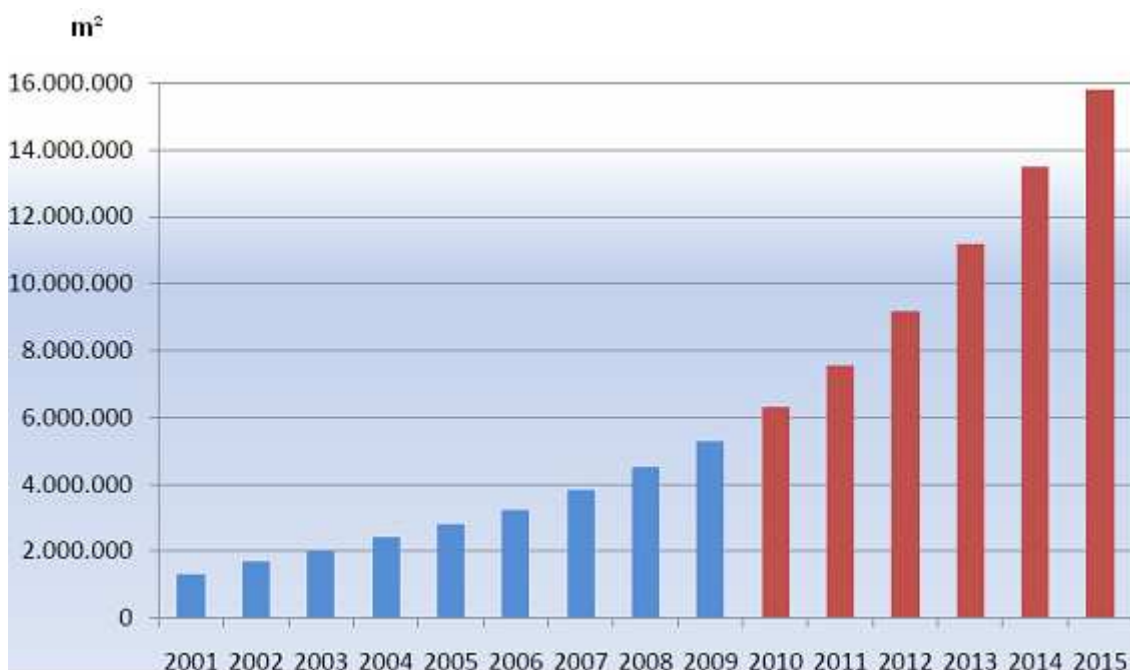


Figura 2-19 - Expectativa de crescimento do mercado de aquecimento solar no Brasil

Fonte: DASOL, 2010

A expectativa é que sejam atingidos 15 milhões de metros quadrados de coletores solares instalados até 2015. No caso brasileiro, grande parte dos coletores instalados é para substituir o uso dos chuveiros elétricos.

O chuveiro elétrico é responsável por 24% (PROCEL, 2007) da energia elétrica consumida pelo setor residencial ou a aproximadamente 6% (BEN, 2010) da energia elétrica total consumida no Brasil. Isto equivale a um consumo de energia elétrica em torno de 24.427 GWh. Considerando o rendimento do chuveiro elétrico próximo a 95%, pode-se afirmar que foram utilizados 23.206 GWh de energia térmica de origem elétrica para aquecimento de água para banho.

Considerando as residências brasileiras que aquecem água para banho, 73,5% utilizam energia elétrica como fonte de energia e 5,9% utilizam o gás, conforme mostrado na figura 2.8 (PROCEL, 2007). Logo, como 73,5% correspondem a 23.206 GWh de energia térmica, 5,9% correspondem a 1.863 GWh de energia térmica. Sendo assim pode-se afirmar que no Brasil são utilizados 25.069 GWh de energia térmica para

aquecimento de água para banho, com 23.296 GWh provenientes de energia elétrica e 1.863 GWh de gás.

Tomando como base a produção média mensal de energia de 88,6 kWh/mês.m² (INMETRO, 2011) do melhor coletor solar com selo de classificação “A” do PROCEL, a produção anual corresponderia a 1.063 kWh/m².

Pode-se estimar que, se fosse possível utilizar energia solar em todas as residências com aquecimento elétrico e a gás, seria necessários aproximadamente 24 milhões de metros quadrado de coletor solar para produzir os 25.069 GWh necessários para o aquecimento de água no Brasil.

Considerando que o Brasil possui um pouco mais de 5 milhões de m² de coletores solares instalados (DASOL, 2010), seria necessário instalar mais 19 milhões m² de coletores solares, quase quatro vezes a capacidade instalada atual, o que indica um enorme potencial de mercado para essa tecnologia.

Além do aquecimento de água para fins sanitários, a energia solar pode ser usada para outros fins. Entre eles destacam-se a produção de calor para aquecimento de ambiente, secagem de grãos, preparo de alimentos através de fogões e fornos solares e a desidratação de frutas e legumes. Pode-se também gerar calor a elevadas temperaturas, produzindo vapor para fins industriais ou para produção de energia elétrica a partir de turbinas a vapor. A produção de frio a partir do calor do Sol atende a demanda por condicionamento ambiental e refrigeração para a conservação de alimentos. Outro possível uso da energia solar é a iluminação de ambientes através sistemas que captam a luz no exterior do ambiente e a transporta para o seu interior. Finalmente a energia solar pode ser convertida diretamente em energia elétrica a partir de sistemas fotovoltaicos.

2.4 - O mercado, seus marcos regulatórios e principais desafios

A grande maioria dos sistemas de aquecimento de água instalada no Brasil é de pequeno porte, estão instalados em residências unifamiliares e utilizam o sistema de circulação natural conhecido como termossifão. A figura 2.20 mostra o uso de sistemas de aquecimento solar por região do Brasil. Pode-se observar que a maior parte dos

aquecedores solares (73,84%) está instalada na região sudeste. Praticamente não se nota o uso de sistema de aquecimento solar na região norte.

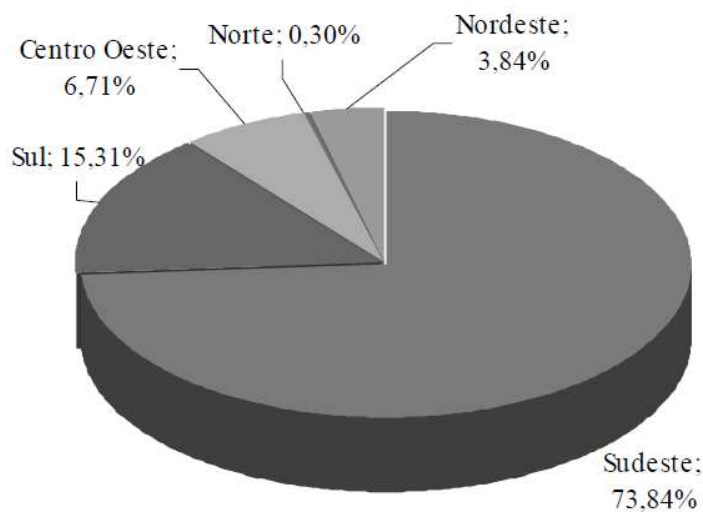


Figura 2-20 - Uso de aquecimento solar por região

Fonte: DASOL, 2010

Os estudos realizados pelo Departamento Nacional de Aquecimento Solar (DASOL) da Associação Brasileira de Refrigeração, Ar Condicionado, Ventilação e Aquecimento (ABRAVA), para o ano de 2005 mostram, conforme figura 2.21, que 85% dos sistemas de aquecimento solar de água foram destinados ao setor residencial, sendo que 95% das instalações encontram-se em residências unifamiliares e apenas 5% encontram-se em edifícios multifamiliares. Os 14% utilizados no setor terciário estão distribuídos principalmente entre hotéis, hospitais e aquecimento de piscinas. A pequena participação no setor industrial com aproximadamente 1% é destinada basicamente ao uso de aquecimento de água para banho em vestiários e para cozinhas industriais, sendo já se começa a usar a tecnologia para a geração de calor para processos industriais.

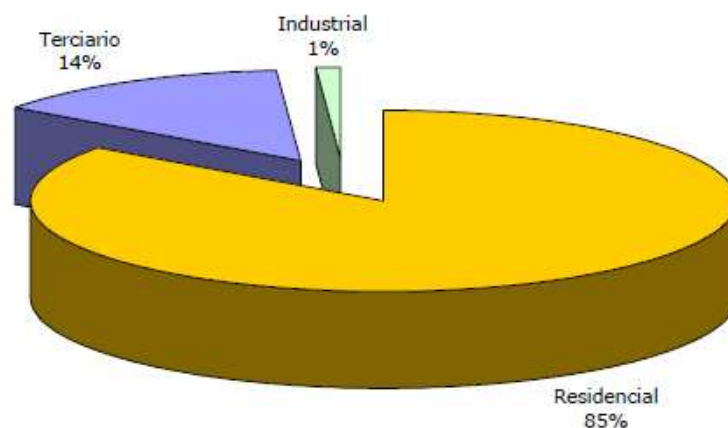


Figura 2-21 - Participação do aquecimento solar por setor da economia em 2005

Fonte: DASOL, 2010

Segundo estudos do DASOL – Departamento Nacional de Aquecimento Solar a produção brasileira de coletores solares no ano de 2009 cresceu 18,9% em relação ao ano anterior. Isso corresponde a aproximadamente 800 mil metros quadrados de coletores solares instalados, conforme mostra o gráfico de evolução do mercado de aquecimento solar no Brasil entre os anos de 2001 e 2009 apresentados na figura 2.22. Pode-se observar que a área instalada de coletores solares já ultrapassa os 5 milhões de metros quadrados no final de 2009.



Figura 2-22 - Evolução do mercado de aquecimento solar no Brasil

Fonte: DASOL, 2010

A região líder na venda de coletores solares no ano de 2009, segundo o DASOL, foi o sudeste com 64% das vendas, seguido do sul e do centro oeste como pode ser visto na figura 2.23 abaixo.

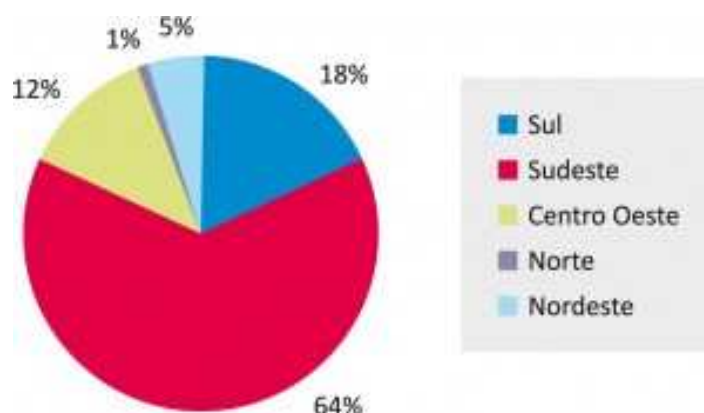


Figura 2-23 - Venda de coletores solares em 2009

Fonte: DASOL, 2010

Segundo dados do DASOL existem no Brasil cerca de 200 empresas, atuando no setor de aquecimento solar, nas áreas de fabricação, vendas, instalação, manutenção, projeto e consultoria. Essas empresas movimentam no Brasil aproximadamente 500 milhões de reais ao ano.

Conforme mostra a tabela 2.1 abaixo, os sistemas de aquecimento de água podem ser classificados de acordo com o volume de água a ser aquecido. Para sistemas de pequeno porte, ou seja, volume diário menor que 1500 litros de água, usa-se o sistema tipo termossifão. O anexo A apresenta o princípio de funcionamento do sistema de aquecimento solar por termossifão. Para médio porte, volumes entre 1500 e 5000 litros de água ou para sistemas de grande porte acima de 3000 litros de água é utilizado o sistema de circulação forçada. O sistema de aquecimento solar central é utilizado em edifícios residenciais, hospitais, hotéis, pousadas e hotéis.

Tabela 2.1 - Classificação da instalação de aquecimento solar em função do volume

Instalação	Volume Diário	Tipo
Pequeno porte	$V < 1500$ litros	Termossifão
Médio porte	$1500 < V < 5000$ litros	Circulação forçada
Grande porte	$V > 5000$ litros	Circulação forçada

Fonte: DASOL, 2010

A evolução da indústria de aquecimento solar no Brasil apresenta alguns aspectos sociais positivos em relação à geração de emprego. De acordo com dados do DASOL, o setor de aquecimento solar gera 55 empregos para cada MW térmico implantado. Tomando como base o ano de 2005, a implantação de 276 MW térmicos, equivalente a 395.000 metros quadrados de coletores solares, gerou aproximadamente 15.000 empregos diretos.

Segundo o DASOL os resultados dos projetos de aquecimento solar já implantado em habitações de interesse social trazem benefícios para os moradores, para o setor elétrico, para o governo e para o meio ambiente.

Para os moradores o principal benefício é a economia real de energia e consequentemente dinheiro, que aumenta o seu poder aquisitivo e a qualidade de vida. Para o setor elétrico a redução da carga no horário de ponta adia o investimento em geração, transmissão e distribuição. Outro aspecto importante é a redução da inadimplência. A instalação do aquecedor solar para substituição do chuveiro elétrico aumenta a capacidade de atendimento dos transformadores de distribuição.

O governo pode criar políticas de desenvolvimento sustentável gerando desenvolvimento econômico para a população beneficiada. O meio ambiente também é beneficiado com a redução de impactos ambientais. Cada metro quadrado de coletor solar instalado e utilizado durante um ano, equivale a 66 litros de óleo diesel, ou 215 quilos de lenha, ou 55 quilos de gás ou 56 metros quadrados de área inundada no caso de usinas hidrelétricas.

A figura 2.24 mostra alguns exemplos de instalação de sistemas solares em habitações de interesse social.



Figura 2-24 - Conjunto Popular Vila Rural em Três Ilhas e Antony Garotinho em Volta Redonda respectivamente

Fonte: LIGHT, 2006

O Programa Minha Casa Minha Vida é um programa habitacional do governo federal destinado a famílias com renda bruta de até R\$ 1.395,00. A instalação de sistema de aquecimento tem o objetivo de tornar os empreendimentos habitacionais mais sustentáveis, além de gerar economia de energia e melhor qualidade de vida aos futuros moradores. Poderão ser atendidos projetos localizados nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste onde ocorre a maior demanda por energia elétrica para o aquecimento de água. Os valores máximos para aquisição e instalação do sistema de aquecimento solar estão limitados a R\$ 1.800,00 para unidades habitacionais em empreendimentos horizontais e R\$ 2.500,00 para unidades habitacionais em empreendimentos multifamiliares verticais.

2.5 - Principais barreiras ao desenvolvimento do mercado de aquecimento solar

Em uma pesquisa realizada por Rodrigues; Matajs (2005) entrevistando mais de 30 atores chave do setor foram identificados sete pontos como sendo as principais barreiras para o desenvolvimento do mercado de aquecedor solar de água no Brasil. Segue abaixo a lista das principais barreiras encontradas.

Alto custo inicial: O custo do sistema de aquecimento de água no Brasil vem caindo nos últimos anos, mas mesmo assim continua sendo alto quando comparado com o seu principal concorrente o chuveiro elétrico. Quando o chuveiro elétrico é substituído pelo sistema de aquecimento solar, o retorno do investimento varia entre 2 e 12 anos

dependendo da insolação da região, do valor da tarifa de energia elétrica e do porte do sistema.

Competição com os chuveiros elétricos: A presença massiva de chuveiros elétricos no Brasil está ligada a baixo custo do equipamento e da facilidade de infraestrutura para sua instalação. As casas normalmente são projetadas prevendo a tubulação hidráulica e o ponto de ligação elétrica para o chuveiro.

Códigos de obra municipais não amigáveis ao termossolar: Apesar de algumas cidades exigirem a instalação ou a preparação da infra-estrutura das edificações para a instalação de sistemas de aquecimento de água, a grande maioria não faz essa exigência. Logo os códigos de obras municipais não encorajam a instalação de sistemas solares, uma vez que não sendo exigido e não tendo a infra-estrutura adequado o consumidor acaba optando pela instalação de aquecedores de passagem elétricos ou a gás.

Problemas com financiamento: As altas taxas de juros e falta de linhas de financiamento adequadas e sem burocracia foram apontados como uma importante barreira ao desenvolvimento do mercado termossolar. Principalmente pelo fato de ser o próprio consumidor que faz o investimento no sistema de aquecimento solar e não a concessionária de energia.

Falta de capacitação profissional: Por não existir uma plena difusão da tecnologia termossolar entre os principais agentes envolvidos na construção civil, como por exemplo, engenheiros, técnicos, arquitetos muitas edificações são construídas sem levar em consideração o uso da tecnologia termossolar. Além disso, a falta de informação a respeito de nível de insolação e outros parâmetros necessários para a boa instalação dos sistemas criam barreiras ao desenvolvimento da tecnologia.

Desinteresse do setor elétrico: As concessionárias de distribuição de energia não têm interesse que os chuveiros elétricos sejam substituídos por sistemas de aquecimento solar ou a gás em virtude da ação ter impacto direto em seu faturamento. Apesar disso, as concessionárias têm investido em programas de conservação de energia e substituição de tecnologia de uso final com interesses secundários. Entre eles

destacam-se: a instalação de coletores solares em comunidades de baixa renda, visando a redução da inadimplência e o não pagamento do imposto da energia fornecida e não recebida e melhoria na imagem da empresa em relação ao apoio a projetos socioambientais. Além disso, há o reconhecimento da melhoria na modulação da curva de carga no horário de ponta, momento em que as pessoas retornam do trabalho e os chuveiros elétricos normalmente são ligados. Muitos desses projetos são realizados de maneira obrigatória devido à lei que exige que 1% da receita operacional das empresas sejam investidos em programas de combate ao desperdício de energia, pesquisa e desenvolvimento tecnológico.

Ausência ou inadequação normativa: A criação de normas para instalação dos equipamentos é um importante passo para o desenvolvimento do mercado. Além de programas de financiamentos mais adequados, com juros menores e menos burocráticos.

3 - CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E TECNOLÓGICAS ASSOCIADAS AO USO DA ENERGIA SOLAR

3.1 Características Físicas da Energia Solar

O Sol

A energia solar tem origem no núcleo do sol através de reações de fusão nuclear, conforme figura 3.1, que liberam uma enorme quantidade de energia. A energia que é emitida do Sol corresponde ao poder de emissão de um corpo com temperatura de 5777 K. O sol com sua forma esférica de $1,39 \times 10^9$ m de diâmetro, encontra-se a aproximadamente $1,5 \times 10^{11}$ m de distância da Terra (DUFFIE; BECKMAN, 1991). Sua composição química é formada por 91,2% de hidrogênio, 8,7% de hélio, 0,078% de oxigênio e 0,043% de carbono (OLIVEIRA FILHO; SARAIVA, 2010).

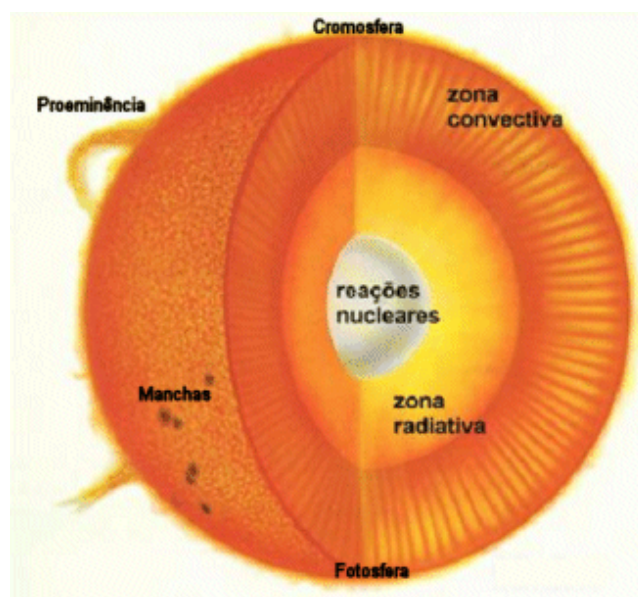


Figura 3-1- Sol

Fonte: OLIVEIRA FILHO; SARAIVA, 2010

A Constante Solar

A irradiação solar máxima é medida fora da atmosfera da Terra, antes que ocorra qualquer tipo de interferência por elementos que constituem a atmosfera terrestre, como por exemplo, atenuação por nuvens ou poluição. A constante solar G_{sc} é definida (DUFFIE; BECKMAN, 1991), como sendo a energia por unidade de tempo emitida pelo sol e recebida por uma unidade de área de uma superfície perpendicular à direção

de propagação da radiação situada fora da atmosfera terrestre e possui um valor de 1367 W/m^2 . Porém como pode ser observado na figura 3.2 esse valor pode variar ao longo do tempo. A constante solar varia em ciclos de aproximadamente 11 anos entre $1364,55$ a $1367,86 \text{ Watts/m}^2$ (OLIVEIRA FILHO; SARAIVA, 2010). A radiação extraterrestre varia em função da radiação emitida pelo sol e pela variação da distância entre a Terra e o Sol.

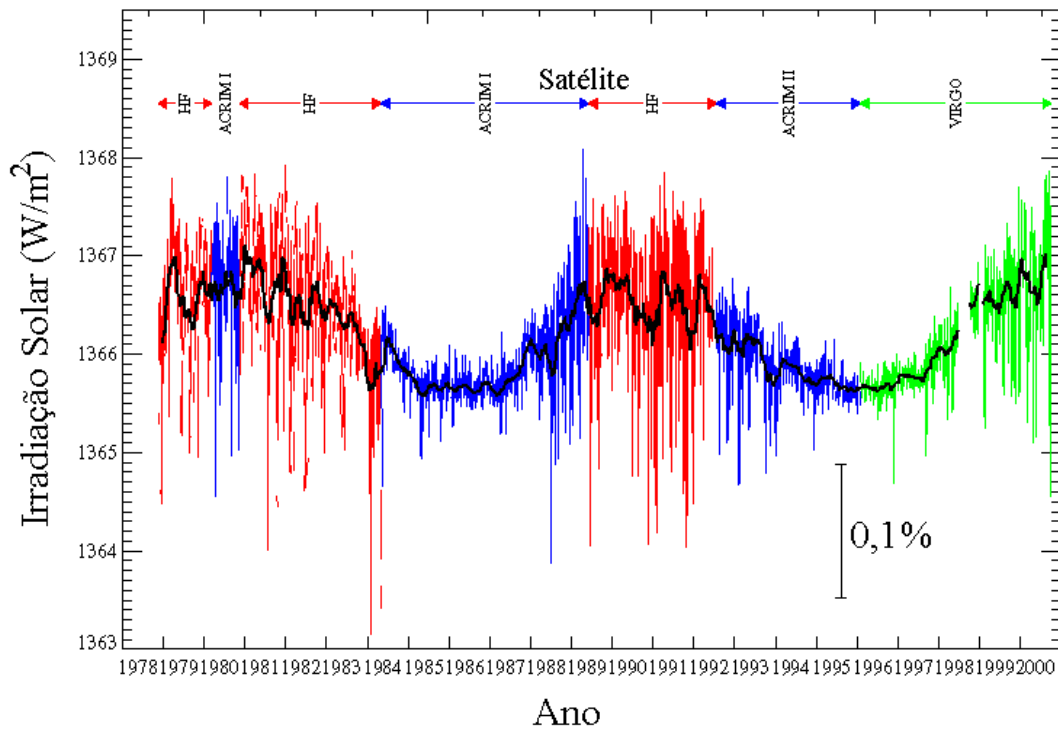


Figura 3-2- Variação da constante solar

Fonte: OLIVEIRA FILHO; SARAIVA, 2010

A Distribuição Espectral da Radiação Solar

O conhecimento dos fundamentos da radiação solar e suas características espectrais são fundamentais para a escolha dos materiais mais adequados para a fabricação dos coletores. A radiação eletromagnética emitida pelos corpos é consequência de sua energia interna que é proporcional à temperatura do corpo, esta energia chamada de energia radiante é transportada pelas ondas eletromagnéticas.

A energia radiante é emitida em uma faixa de comprimento de onda que varia de 10^{-15} a 10^7 m conforme pode ser visto na figura 3.3.

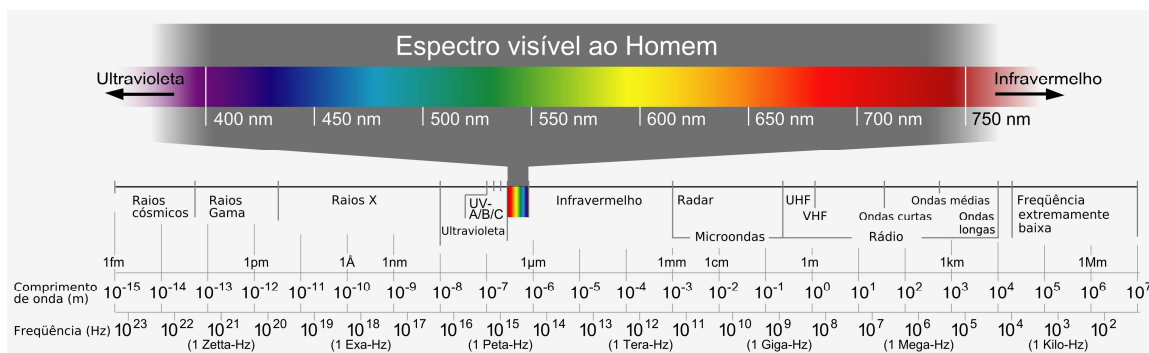


Figura 3-3- Espectro eletromagnético

Fonte: Sociedade Brasileira de Física, 2010

Pode-se observar que os menores comprimentos de onda estão associados aos raios cósmicos e raios gama, já os maiores comprimentos são referentes as ondas de rádio. A radiação térmica, na forma de luz ou calor, ocorre em comprimentos de onda intermediários na faixa de 0,1 a 100 µm.

A radiação emitida pelo Sol, conhecida como banda solar, encontra-se majoritariamente na faixa de comprimento de onda de 0,1 a 3 µm. Acima de 3 µm a região é conhecida como banda de emissão. A figura 3.4 destaca a distribuição da energia na banda solar, mostrando que 7% da energia encontram-se na região do ultravioleta, 46,8% na região visível e o restante da energia está na região do infravermelho.

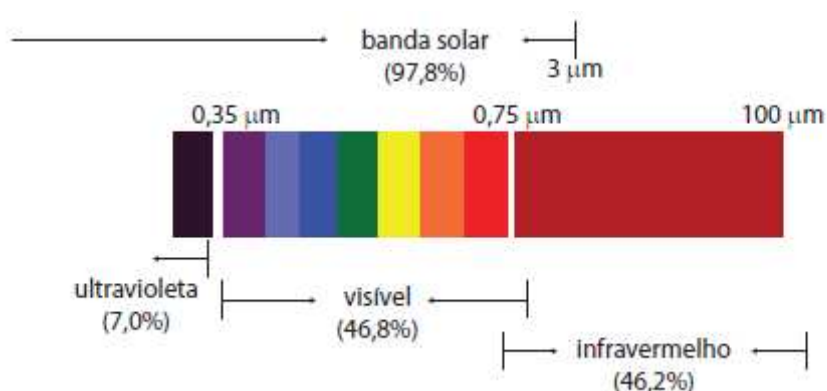


Figura 3-4 - Espectro eletromagnético com destaque para a banda solar

Fonte: RODRIGUES; MATAJS, 2010

A Atenuação da Radiação Solar pela Atmosfera

A figura 3.5 mostra as modificações ocorridas na intensidade da radiação solar ao atravessar a atmosfera terrestre. A irradiação solar que atinge o topo da atmosfera sofre uma série de atenuações antes de atingir a superfície terrestre.



Figura 3-5- Radiação solar global e suas componentes

Fonte: SENTELHAS; ANGELOCCI, 2009

Do total da energia solar recebida pela Terra, 30% é refletida para o espaço, sendo 6% retro difundida pelo ar, 20% refletida pelas nuvens e 4% refletida pela superfície terrestre. Dos 70% de radiação não refletida, 16% são absorvidos pela água e poeiras em suspensão na atmosfera, 3% são absorvidos por nuvens e apenas 51% da radiação solar recebida pela Terra, antes de entrar na atmosfera, atingem a superfície. Para que o ciclo seja fechado os 70% de radiação retornam para o espaço através de radiação infravermelha, sendo 26% emitida pelas nuvens, 38% emitidas por H₂O e CO₂ e 6% emitida pela superfície. O balanço pode ser visto de forma detalhada na figura 3.5.

Os Ângulos de Incidência da Radiação

O movimento relativo entre o Sol e a Terra tem influência direta no posicionamento dos coletores solares. Para o melhor aproveitamento da radiação solar é necessário que os coletores sejam instalados com a inclinação e a orientação adequada. Desta forma é possível ter o bom funcionamento do sistema, com menores custos de instalação e maior rendimento mensal. A inclinação e a orientação do sistema dependem

da localização geográfica da instalação. Ao instalar os coletores com o posicionamento adequado consegue-se maior período diário de insolação sobre as placas e consequentemente maior captação da radiação solar em determinadas épocas do ano.

A radiação solar incidente sobre os coletores solares é decomposta em duas componentes. A primeira é radiação solar direta, definida como sendo a fração da irradiação solar que atravessa a atmosfera sem sofrer alteração na sua direção original. A segunda componente corresponde à radiação difusa, ou seja, a componente da irradiação solar que é espalhada e refletida pelos elementos constituintes da atmosfera. O albedo, definido como a fração da radiação solar, refletida e emitida pela vizinhança do coletor como vegetação e construções, também é uma componente da radiação difusa.

A radiação incidente na superfície terrestre varia em função de suas coordenadas geográficas, ou seja, dependem da latitude, longitude e altura. Sendo a latitude correspondente a posição angular em relação ao equador e a longitude correspondente a posição medida ao longo do equador a partir do meridiano de Greenwich. A altitude é a distancia vertical medida entre o local da instalação e o nível do mar. As coordenadas geográficas influenciam significativamente a radiação incidente em cada localidade. A radiação solar também varia de acordo com a época do ano (estações) e a região em função dos movimentos de rotação e translação da Terra mostrados na figura 3.6.



Figura 3-6 - Movimento de translação da Terra

Fonte: ANEEL, 2010

A **declinação solar** (δ): é definida como sendo a posição angular do Sol ao meio dia em relação ao plano do Equador, variando ao longo dos dias do ano no

seguinte intervalo: $(-23,5^\circ \leq \delta \leq +23,5^\circ)$. As coordenadas negativas correspondem a pontos no hemisfério sul e as positivas ao hemisfério norte, logo quando $\delta = 0$ o ponto está localizado na linha do equador. A declinação solar para cada dia do ano pode ser calculada através da equação abaixo:

$$\delta = 23,45^\circ \operatorname{sen}\left(2\pi \frac{284 + d}{365}\right)$$

Onde d corresponde ao dia do ano que varia de 1 a 365, sendo o d=1 correspondendo ao dia 1º de janeiro. A figura 3.7 ilustra o conceito de declinação solar.

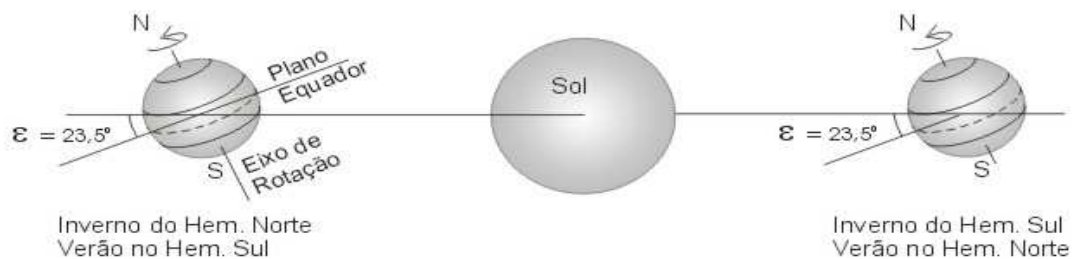


Figura 3-7 - Declinação Solar

Fonte: SANTIAGO, 2010

Zênite: Antes de apresentar os principais ângulos formados pela incidência da radiação vale colocar o conceito de zênite, que é um ponto de referência para observações do céu. É definido como o ponto exatamente acima de um local específico. A partir de um ponto em uma superfície horizontal traça-se uma linha imaginária perpendicular ao plano sendo o ponto de encontro com esfera celeste o zênite. A figura 3.8 mostra o zênite.

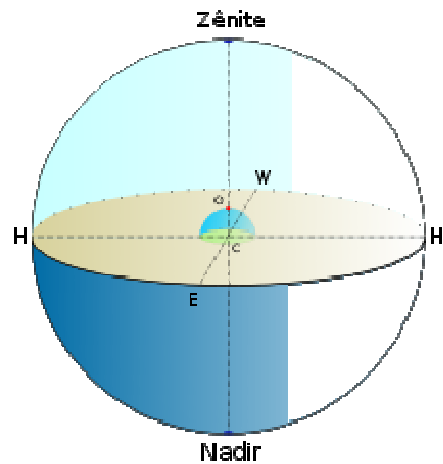


Figura 3-8 - Zênite

Fonte: Wikipédia, 2011

A figura 3.9 mostra os principais ângulos formados pela incidência da radiação solar, como por exemplo: ângulo de inclinação da superfície (β), o ângulo azimutal (γ), o ângulo de incidência (θ), o ângulo zenital (θ_z) e o ângulo de altitude solar (ϕ) que serão detalhados abaixo.

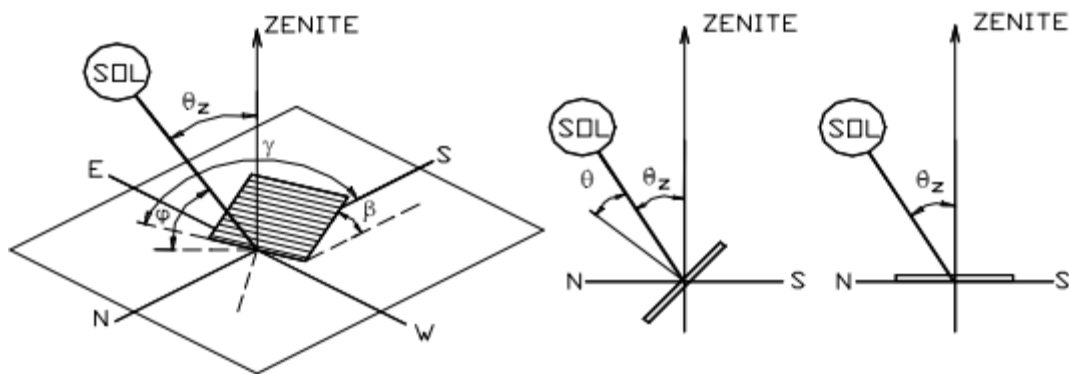


Figura 3-9 - Ângulos solares

Fonte: DUFFIE; BECKMAN, 1991

Ângulo de incidência (θ): é o ângulo formado entre a radiação direta e a normal à superfície da placa coletora, conforme mostrado na figura 3.9.

Ângulo de altitude solar (ϕ): é o ângulo formado entre a radiação solar direta e a sua projeção no plano horizontal.

Ângulo zenital (θ_z): é o ângulo formado entre radiação solar direta e a vertical, variado entre ($0^\circ \leq \theta_z \leq 90^\circ$). Quando $\theta_z=0$ o Sol está no zênite, exatamente a cima do observador, pode-se dizer que o sol está a pino.

Ângulo horário (ω): é o deslocamento angular do Sol em relação ao meridiano local. Ao o meio dia o ângulo é zero, na parte da manhã é negativo e a tarde o ângulo é positivo. Como a Terra leva 24 horas para completar a rotação de 360° , conclui-se que o deslocamento é de 15° por hora.

Os Ângulos da Instalação Solar

O bom funcionamento dos sistemas solares está diretamente ligado à escolha do ângulo de inclinação e do ângulo de orientação conhecido como ângulo azimutal de superfície. A figura 3.10 mostra os ângulos da instalação solar.

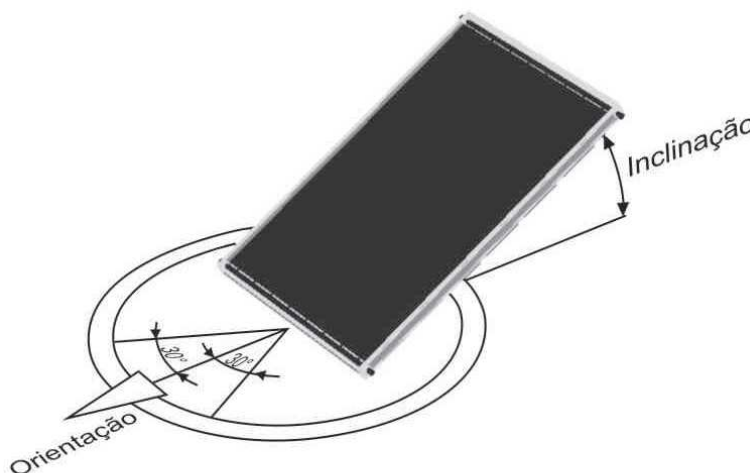


Figura 3-10 - Ângulos da instalação solar

Fonte: HELIOTEK, 2010

Ângulo de inclinação da superfície (β): é o ângulo formado entre o plano do coletor e o plano horizontal de referência conforme mostrado na figura 3.11.

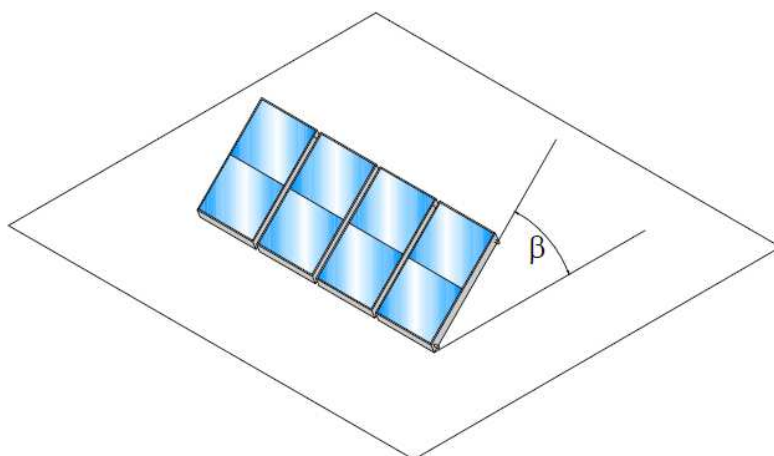


Figura 3-11 - Inclinação de coletores solares

Fonte: DASOL, 2008

No caso de instalações solares para aquecimento de água é recomendado que os coletores tenham uma inclinação fixa. A mudança na inclinação destes coletores ao longo do ano seria muito complexa em função de uma série de tubulações que deveriam ser deslocadas ocasionando aumento de manutenção e problemas como o surgimento de sifões. Desta forma existem alguns critérios utilizados na escolha da inclinação que normalmente coincidem, mas nem sempre, com a inclinação dos telhados de residências. São eles:

Média anual: o cálculo da inclinação média entre os solstícios de inverno e de verão coincide com a própria latitude local.

Favorecimento do inverno: como normalmente o consumo de água quente no inverno aumenta recomenda-se utilizar como inclinação a latitude local mais 10° .

Para casos específicos como períodos críticos de insolação ou períodos de pico de demanda de água quente devem-se ter um projeto que atenda da melhor forma essas exigências.

Ângulo azimutal de superfície (γ): é o ângulo formado entre o eixo norte-sul e a projeção no plano horizontal da reta normal a superfície da placa coletora conforme mostrado na figura 3.12. Varia no intervalo $(-180^\circ \leq \beta \leq 180^\circ)$, sendo $\gamma=0$ no sul, positivo para oeste e negativo para leste.

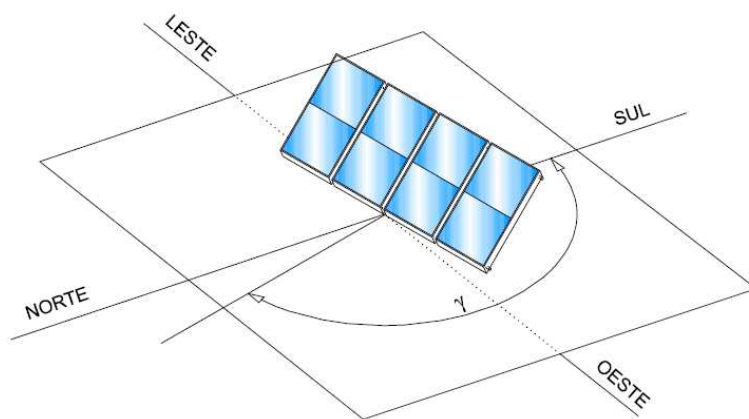


Figura 3-12 - Ângulo azimutal de superfície

Fonte: DASOL, 2008

A orientação dos coletores deve ser feita de forma a direcionar a superfície do coletor para o norte. Cabe destacar que a referência é o norte geográfico e não o norte magnético indicado por bússolas e GPS, devendo ser feita uma correção em função do local da instalação quando forem utilizados estes tipos de instrumentos. O ângulo γ é também conhecido como ângulo de desvio do norte geográfico. A partir da indicação do norte magnético pela bússola, deve-se fazer a correção da declinação magnética de acordo com o local da instalação.

3.2 Fenômenos Físicos Envolvidos na Conversão da Energia Solar

Formas de Transferência de Calor entre duas Fontes

Calor é a energia que é transferida entre um sistema e seu ambiente, devido a uma diferença de temperatura que existe entre eles (HALLIDAY *et al.*, 1993, p. 183). A transferência de calor pode ocorrer através da condução, convecção ou radiação.

Condução: É a transferência de calor por contato direto entre as partículas de dois corpos com temperaturas diferentes. Ocorre quando o calor é transferido através de um sólido ou fluido, de uma região de temperatura mais elevada para outra região com temperatura mais baixa. Os principais meios condutores sólidos utilizados em coletores solares são o cobre e o alumínio.

Convecção: Ocorre em função da diferença de densidade entre líquidos, fluidos e gases. As correntes de convecção são formadas pelo deslocamento de massas mais quentes que tendem a subir e massas mais frias que tendem a descer.

Radiação: A radiação conforme citado anteriormente é consequência da energia interna dos corpos, sendo diretamente proporcional a sua temperatura.

Perdas

Seja para aquecimento de água a baixa temperatura para fins sanitários ou alta temperatura para a produção de vapor para a geração de eletricidade, o coletor solar tem papel fundamental. Deve-se buscar maximizar a energia incidente nos coletores e minimizar as perdas térmicas. A eficiência térmica dos coletores solares (η) é dada pela razão entre a taxa de transferência de calor para a água denominada calor útil ($Q_{\text{útil}}$) e a taxa de energia solar (I_G) incidente na área do coletor solar (A_c).

$$\eta = Q_{\text{útil}} / I_G \cdot A_c$$

A figura 3.13 mostra o fluxo de energia no coletor solar. A energia incidente sofre perdas óticas e térmicas por radiação, convecção e condução.

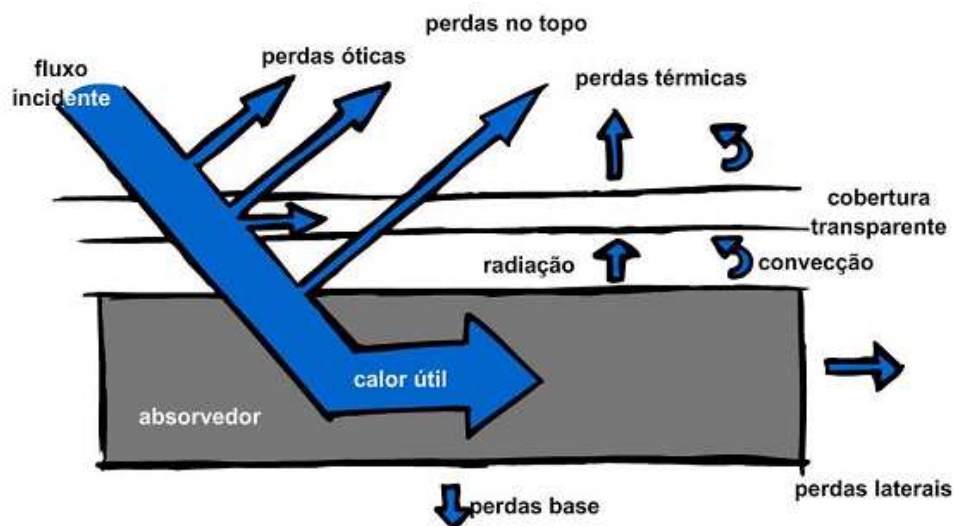


Figura 3-13- Fluxo de energia no coletor solar

Fonte: DASOL, 2008

A radiação solar incidente nos coletores pode ser transmitida, refletida e absorvida. Logo, as perdas óticas estão associadas às propriedades de transmissividade, reflectividade e absortividade. Sendo assim, a energia incidente pode ser considerada como o somatório da energia absorvida, transmitida e refletida.

A absortividade é definida como sendo a fração da energia incidente que é absorvida pela superfície da placa. A reflectividade é a parcela da energia incidente que é refletida pela placa. E por fim a transmissividade é definida como a parte da energia irradiada transmitida através do meio semitransparente.

As perdas térmicas por convecção ocorrem quando há transferência de energia entre uma superfície sólida e um fluido em movimento submetido a uma diferença de temperatura entre eles. A figura 3.14 ilustra o fenômeno que ocorre a partir do aquecimento da camada de ar mais próxima à placa de maior temperatura. Ao se aquecer o ar torna-se menos denso e tende a subir. Como o ar mais frio e, portanto mais denso na parte superior tende a descer, inicia-se o movimento básico do fenômeno da convecção.

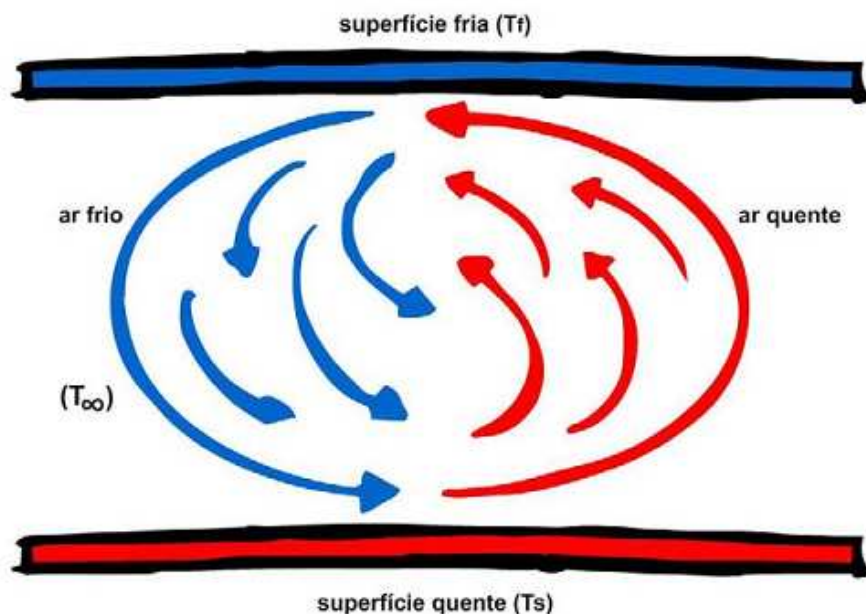


Figura 3-14- Convecção entre placas paralelas

Fonte: DASOL, 2008

A taxa de transferência de calor por convecção (q) é expressa pela Lei do Resfriamento de Newton dado por:

$$q = h_c \cdot A \cdot (T_s - T_\infty)$$

Onde:

q: Taxa de transferência de calor por convecção [W]

h_c : Coeficiente de transferência de calor por convecção [$W/m^2.K$]

A : Área normal à direção da transferência de calor [m^2]

T_s : Temperatura da superfície [K]

T_∞ : Temperatura do fluido [K]

No caso do coletor solar a transferência de calor por convecção ocorre entre a placa absorvedora e a cobertura transparente e também entre a cobertura transparente e o ar ambiente.

As perdas térmicas por radiação ocorrem quando parte da energia absorvida pela placa absorvedora do coletor é emitida, logo não servirá para variar o calor sensível da água.

Com o objetivo de evitar as perdas por condução devem-se utilizar isolantes térmicos, compostos por materiais de baixa condutividade térmica. A taxa de transferência de calor por condução é dada por:

$$q = k \cdot A \cdot (dT/dx)$$

Onde:

q: Taxa de transferência de calor por condução [W]

k: Condutividade térmica [$W/m.K$]

A: Área [m^2]

dT: Diferença de temperatura (K)

dx: Espessura [m]

3.3 Formas de Aproveitamento de Energia Solar

A energia solar para ser utilizada pelo homem, normalmente é convertida para forma de energia térmica, para aquecimento ou resfriamento de fluidos e de ambientes, ou pode ser transformada diretamente em eletricidade.

As formas de aproveitamento da energia solar dividem-se basicamente em dois grandes grupos: energia solar ativa e passiva. A figura 3.15 mostra de forma esquemática as principais formas de aproveitamento da energia solar com alguns de seus principais usos.

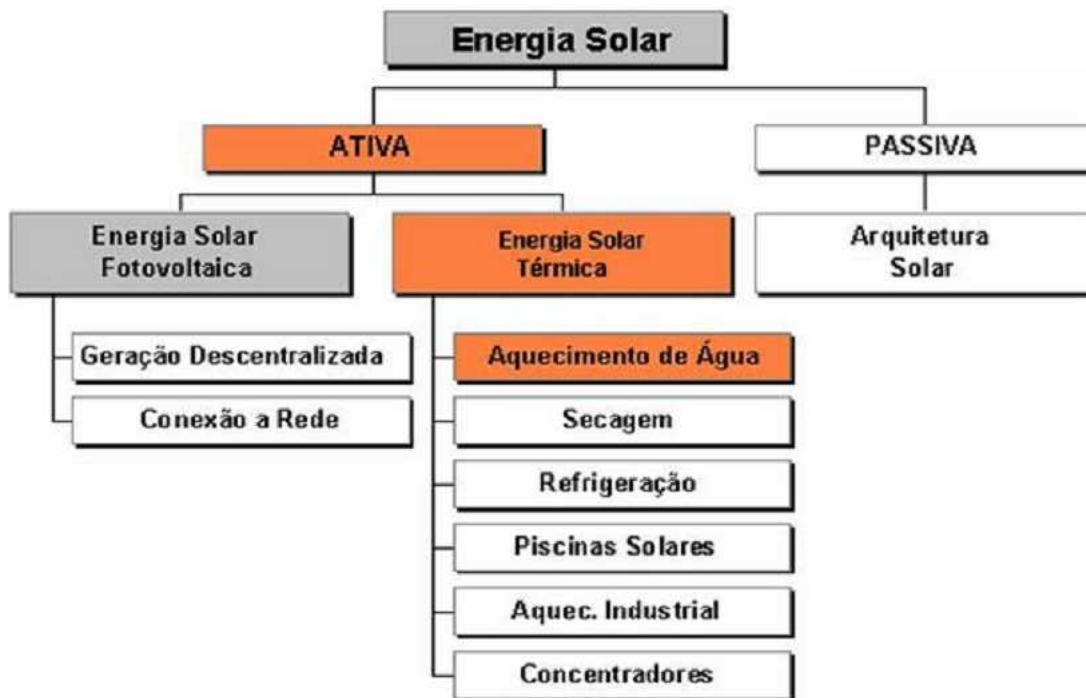


Figura 3-15- Formas de aproveitamento da energia solar

Fonte: PEREIRA *et al.*, 2003

O aproveitamento da energia solar de forma passiva é amplamente explorado no campo da arquitetura. A partir do projeto arquitetônico, a edificação é planejada de forma a ser o mais eficiente possível do ponto de vista energético. O aproveitamento da energia solar visa a regulação das condições ambientais da edificação, permitindo a entrada da radiação quando for interessante, por exemplo, para melhorar o nível de

iluminação ou aumentar a temperatura do ambiente. Entretanto há situações em que se deseja uma temperatura mais amena e a radiação solar direta torna-se indesejável.

O aproveitamento da energia solar de forma ativa é feito através de diferentes tecnologias que se dividem em dois subgrupos: energia solar fotovoltaica e energia solar térmica. O primeiro utiliza o efeito fotovoltaico para transformar a energia solar diretamente em eletricidade que pode ser utilizada em sistemas isolados ou interligada na rede de distribuição. Já o segundo subgrupo transforma a energia solar em energia térmica que pode ser utilizada para aquecimento de água, secagem de grãos, refrigeração, aquecimento de piscinas e aquecimento industrial.

A energia solar térmica não está restrita ao aquecimento de água, podendo ser utilizada para outras finalidades conforme citado anteriormente. A energia térmica gerada pelos concentradores pode ser usada, por exemplo, para gerar vapor e expandi-lo em uma turbina a vapor acoplada a um gerador para produzir eletricidade. Porém cada forma de aproveitamento está associada a um conjunto de tecnologias e à temperatura de trabalho diferente conforme pode ser visto na figura 3.16.

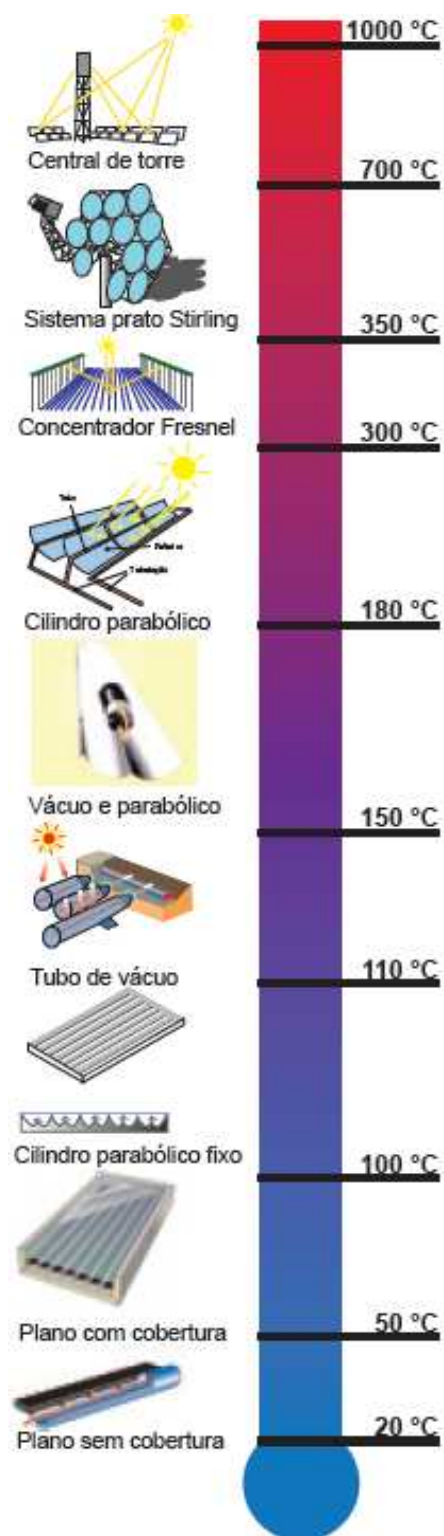


Figura 3-16 - Temperatura de trabalho da tecnologia solar térmica

Fonte: RODRIGUES; MATAJS, 2010

A tecnologia heliotérmica consiste na concentração dos raios solares que incidem sobre os coletores em um ponto específico onde um fluido de trabalho é aquecido e transferido para um determinado uso. O desenvolvimento da tecnologia está ligado à otimização de quatro sistemas: coleta da irradiação solar, conversão em calor, transporte e armazenamento do calor gerado e conversão em energia elétrica.

Atualmente as três tecnologias disponíveis mais utilizadas no mundo são: cilindro parabólico, torre central e disco parabólico. As tecnologias heliotérmicas atingem temperaturas normalmente superiores a dos coletores planos, sendo esta uma das principais diferenças entre eles. A seguir serão apresentadas as três tecnologias citadas.

Cilindro Parabólico : A figura 3.17 mostra um exemplo do cilindro parabólico juntamente com um esquema do seu funcionamento. A tecnologia consiste na absorção da energia solar por um coletor espelhado na forma de um cilindro parabólico que reflete a energia incidente em sua superfície para o ponto focal do cilindro onde se localiza a tubulação com o fluido de trabalho. Essa tubulação é feita de aço e fica no interior de um tubo de vácuo que tem a função de minimizar as perdas térmicas do sistema. Normalmente é utilizado o óleo sintético como fluido de transferência de calor.

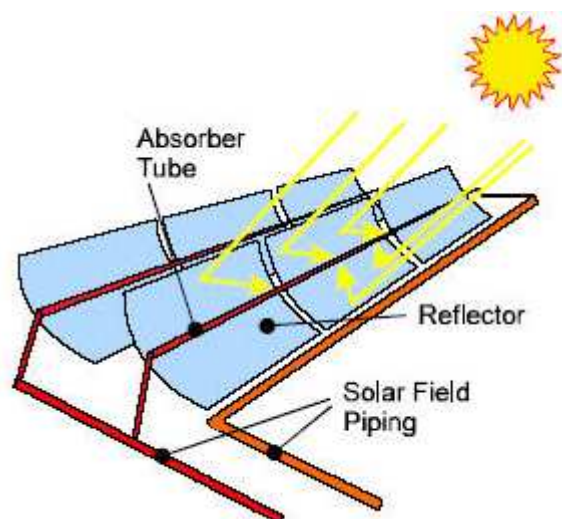


Figura 3-17 - Cilindro parabólico

Fonte: SOLAR PACES, 2010

O fluido de trabalho aquecido à temperatura na faixa de 250°C (FERNÁNDEZ-GARCIA *et al.*, 2010) é transportado para um ou mais trocadores de calor que são responsáveis pela geração de vapor que será expandido em uma turbina térmica para acionar um gerador e produzir energia elétrica. A figura 3.18 mostra de forma esquemática como a energia térmica solar pode ser usada para gerar energia elétrica.

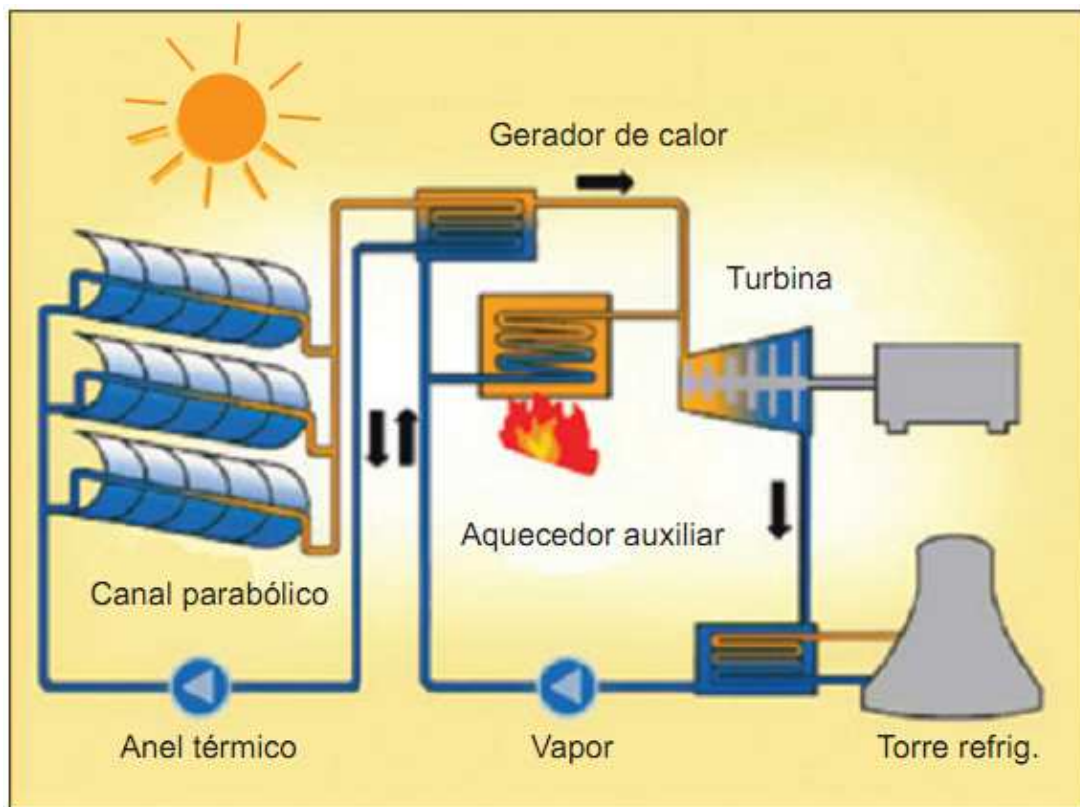


Figura 3-18 - Esquema de funcionamento do concentrador solar

Fonte: RODRIGUES; MATAJS, 2010

Nos períodos de baixa insolação e dias chuvosos pode-se utilizar um sistema auxiliar para fornecer energia para a geração de vapor. A escolha da fonte de energia auxiliar vai depender de cada caso.

Atualmente existem na Califórnia (EUA) usinas operando com capacidade de produção de até 350MW (RODRIGUES; MATAJS, 2010). Essas usinas por dependerem de elevadas temperaturas de trabalho necessitam de grandes áreas de instalação e são construídas normalmente em regiões secas.

O Brasil possui extensa região semi-árida no nordeste com radiação solar direta em torno de 2.200 kWh/m².ano na área da bacia do rio São Francisco e Sobradinho. Januária e Itacarambi, por exemplo, possuem excelentes condições topográficas, acesso a rede, temperatura ambiente moderada com poucas variações e ventos de baixa velocidade, podendo acomodar usinas solares de grande porte (FERNÁNDEZ-GARCIA *et al.*, 2010).

Torre Central : Da mesma forma que na tecnologia de cilindro parabólico o objetivo é gerar o vapor para ser utilizado na turbina que vai gerar a energia elétrica. Entretanto o que muda é a forma como a energia solar é captada e concentrada para aquecer o fluido de transferência de calor. A figura 3.19 mostra um exemplo de instalação com a torre central e um esquema básico de seu funcionamento.

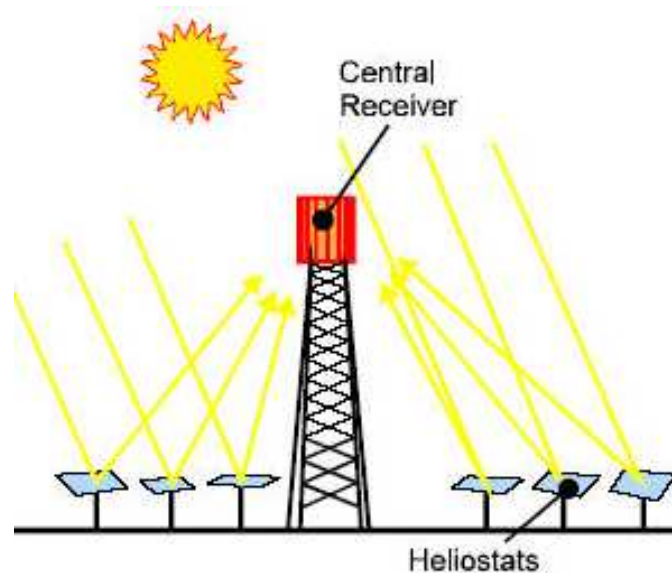


Figura 3-19 - Torre Central

Fonte: SOLAR PACES, 2010

A energia solar é captada através de espelhos com área aproximada entre 30 e 150 m² e em seguida refletida para o topo de uma torre de aproximadamente 90 m de altura onde a energia é concentrada no receptor central. O fluido de trabalho então recebe a energia térmica do concentrador central, podendo chegar a temperaturas de 900°C (ALEXOPOULOS; HOFFSCHMIDT, 2010). Em seguida o fluido de trabalho é

bombeado para a base da torre onde ocorre o processo de geração de vapor. E consequente produção de eletricidade.

A tecnologia de geração de energia elétrica a partir de a torre solar já é considerada economicamente viável (RODRIGUES; MATAJS, 2010). Na Espanha já está em operação uma planta de 10MW e existem mais duas em fase final de construção e na Alemanha começou a operar em 2009 uma planta de 1,5MW (ALEXOPOULOS; HOFFSCHMIDT, 2010).

Disco Parabólico : A tecnologia de disco parabólico difere um pouco das anteriores em função de gerar a eletricidade diretamente no próprio receptor. A figura 3.20 mostra uma instalação com a tecnologia de disco parabólico e um esquema de seu princípio de funcionamento.

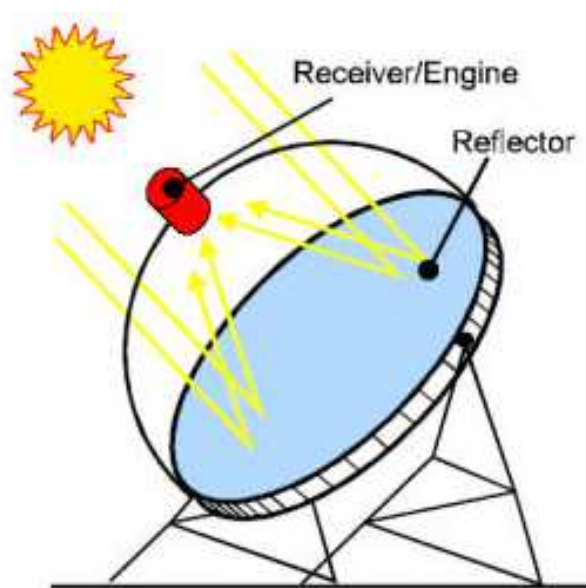


Figura 3-20 - Disco Parabólico

Fonte: SOLAR PACES, 2010

O princípio de funcionamento consiste na reflexão dos raios solares incidentes no coletor para o ponto focal do disco parabólico onde se encontra o receptor. A energia térmica é transferida para o fluido que transfere o calor a uma temperatura na faixa de 350 a 700°C (SOLAR PACES, 2010) diretamente para um motor *stirling* que é instalado no próprio receptor.

O motor *stirling* funciona a partir do ciclo *stirling* que é um ciclo termodinâmico em que fluidos compressíveis, como o ar, o hidrogênio, o hélio ou vapores são usados como fluidos de trabalho. O motor *stirling* é um motor de combustão externa, que pode ser acionado por várias fontes de calor, entre elas a energia solar. (KONGTRAGOOL; WONGWISES, 2003)

Esse sistema possui alta eficiência de conversão e por ser modular pode ser usado em sistemas isolados de baixa potência

4 - PRINCIPAIS COMPONENTES DO SISTEMA DE AQUECIMENTO SOLAR DE ÁGUA

4.1 Principais Componentes

O coletor solar é o responsável pelo aquecimento do fluido de trabalho que pode ser água, ar ou outro fluido térmico, através da conversão da radiação solar em energia térmica.

Um sistema de aquecimento de água utilizando energia solar é geralmente composto por três sistemas básicos: captação, armazenamento e consumo, conforme mostra a figura 4.1.

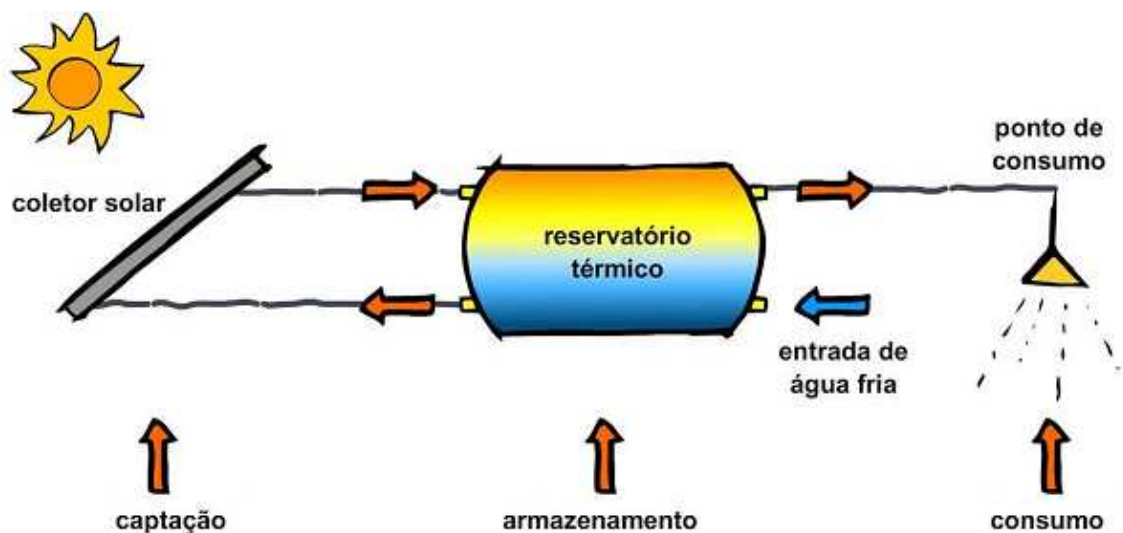


Figura 4-1- Sistema de Aquecimento Solar

Fonte: DASOL, 2008

O sistema de captação é composto pelo coletor solar e as tubulações que ligam o coletor com o reservatório. No caso de instalações maiores é utilizada uma bomba hidráulica para fazer a circulação do fluido de trabalho, normalmente a água.

O sistema de armazenamento tem como principal componente o reservatório térmico, responsável por acumular a água quente para ser usado no momento em que há demanda. Além do reservatório existem os sistemas auxiliares que contribuem com o

fornecimento de energia adicional em períodos de chuva, baixa insolação ou aumento da demanda. Normalmente é utilizado eletricidade ou gás no sistema auxiliar.

O sistema de consumo consiste na distribuição da água aquecida entre o reservatório térmico e o ponto de consumo. Conhecido também como circuito secundário.

Os principais componentes dos coletores solares planos são apresentados na figura 4.2 abaixo:

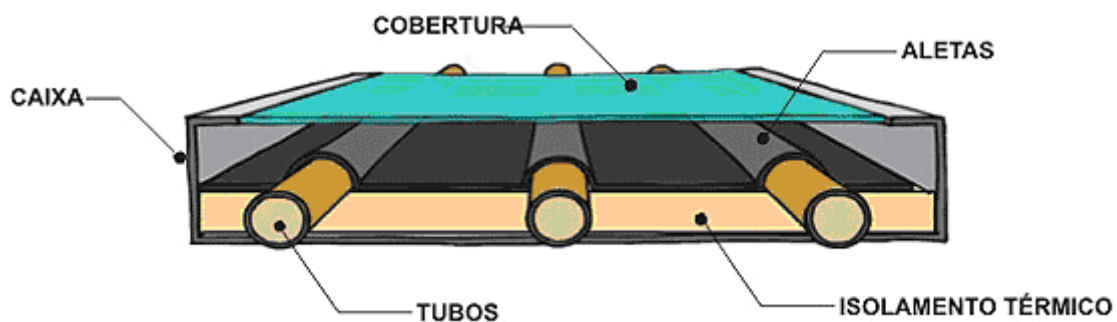


Figura 4-2 - Componentes dos coletores solares fechados

Fonte: SOLETROL, 2010

Caixa externa: Tem a função de suporte do sistema, normalmente é construída em alumínio, chapa dobrada ou material plástico resistente.

Isolamento térmico: Sua função é a redução das perdas de calor para o meio, os materiais mais utilizados para realizar o isolamento são: a lã de vidro ou de rocha e a espuma de poliuretano. A figura 4.3 mostra o isolamento térmico do coletor solar.

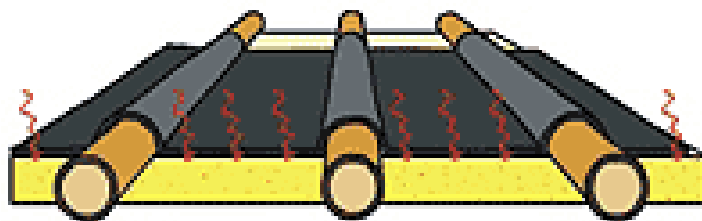


Figura 4-3- Isolamento térmico

Fonte: SOLETROL, 2010

Tubos (flauta / calhas superior e inferior): São interconectados de maneira a fazer com que o fluido escoa no interior do coletor. São fabricados em cobre devido à sua alta condutividade térmica e resistência à corrosão. Os tubos são mostrados na figura 4.4.

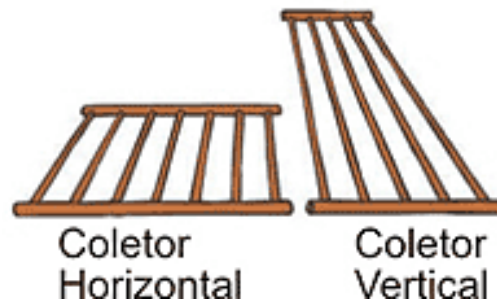


Figura 4-4- Tubos

Fonte: SOLETROL, 2010

Placa absorvedora (aletas): Possui a função de absorver e transferir a energia solar para o fluido de trabalho. São fabricadas em alumínio ou cobre e pintadas de preto fosco para aumentar a absorção da energia solar. A figura 4.5 mostra de forma esquemática o efeito de absorção da placa com e sem pintura.



Figura 4-5- Efeito da pintura da placa absorvedora

Fonte: SOLETROL, 2010

Como o objetivo dos sistemas de aquecimento solar é aumentar ao máximo a temperatura das placas, devem-se buscar materiais que atendam a essa necessidade. Para isso as placas devem absorver o máximo de energia possível na faixa de

comprimento de onda da banda solar e ao mesmo tempo minimizar a emissão de energia. A seletividade de tintas, recobrimento ou tratamento químico da superfície é definido pela razão entre a absortividade na banda solar pela emissividade na banda de emissão.

Cobertura transparente: Sua função é permitir a passagem da radiação solar e reduzir as perdas por convecção e radiação para o meio ambiente. São construídas em vidro, policarbonato ou acrílico. Os coletores solares utilizam vidro como cobertura por serem transparentes na banda solar e opaca na banda de emissão da placa. A figura 4.6 mostra a característica que é conhecida como efeito estufa.

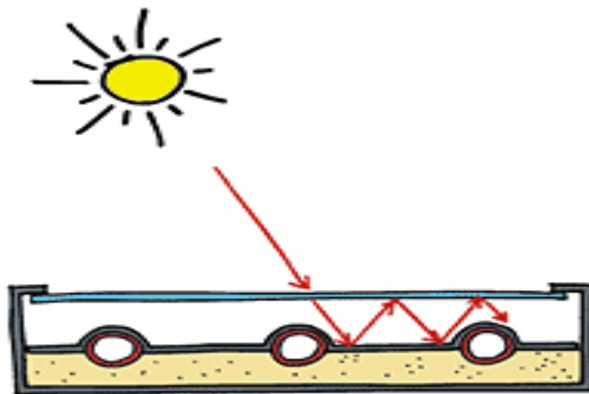


Figura 4-6- Efeito estufa

Fonte: SOLETROL, 2010

Vedação: Sua função é manter isolado da umidade externa.

4.2 Principais Tipos de Coletores Solares Utilizados para Aquecimento de Água

Coletor Aberto

Os coletores abertos mostrados na figura 4.7, são adequados para o aquecimento de piscinas que não exigem temperaturas muito elevadas, variando na faixa de 26 a 30°C.



Figura 4-7- Coletores solares abertos

Fonte: HELIOTEK, 2010

São fabricados normalmente com materiais resistentes ao cloro e a outros produtos químicos, como, por exemplo, polipropileno. O nome aberto se dá pelo fato de não possuírem cobertura transparente ou isolamento térmico. Apresenta bom rendimento para baixas temperaturas, mas o rendimento é reduzido à medida que a temperatura aumenta.

Coletor Plano

Os coletores planos ou fechados atingem temperaturas na faixa de 70 a 80°C e normalmente são usados para fins sanitários. A figura 4.8, mostra um exemplo de instalação que utiliza coletor fechado.

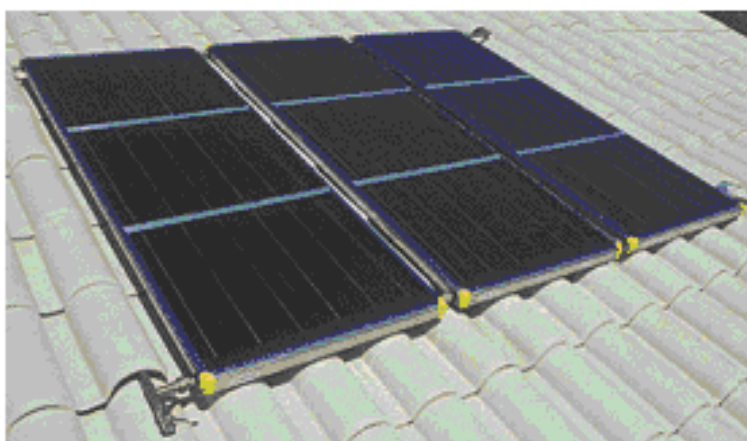


Figura 4-8- Coletor Solar Fechado

Fonte: SOLETROL, 2010

Coletores com tubo de vácuo

Os coletores tipo tubo de vácuo são utilizados em aplicações que exigem temperaturas mais elevadas na faixa de 110 a 150°C ou em regiões de baixa radiação solar. A figura 4.9, mostra um coletor com tubos de vácuo.



Figura 4-9- Coletor de tubos de vácuo

Fonte: ENSUN, 2010

Os coletores de tubo de vácuo são os mais utilizados no mundo. Isto se dá em função de sua utilização pela China, que possui aproximadamente 80 GW_{th} de capacidade instalada (SHC-IEA, 2010). Os tubos verticais são ligados entre si na parte superior do coletor, a água ou fluido de trabalho circula pelo conjunto de tubos e troca calor com água que circula na parte superior do coletor. A grande vantagem desse sistema é que o vácuo elimina as perdas por convecção melhorando o rendimento.

A eficiência térmica do coletor em função da aplicação

A eficiência térmica do coletor é medida pela razão entre a energia transferida para a água ou fluido de trabalho e a energia solar incidente na superfície da placa coletora.

$$\eta = \frac{Q_{util}}{Q_{incidente}} = \frac{Q_{util}}{G \cdot A_{ext}}$$

Onde:

η é a eficiência do coletor

Q_{util} é a energia transferida para a água [W]

G é a radiação global incidente no plano do coletor [W/m^2]

A_{ext} é a área da superfície externa do coletor [m^2]

A escolha do coletor mais apropriado à determinada instalação é feita baseada na temperatura de operação exigida. A figura 4.10 mostra as curvas características dos coletores e suas aplicações.

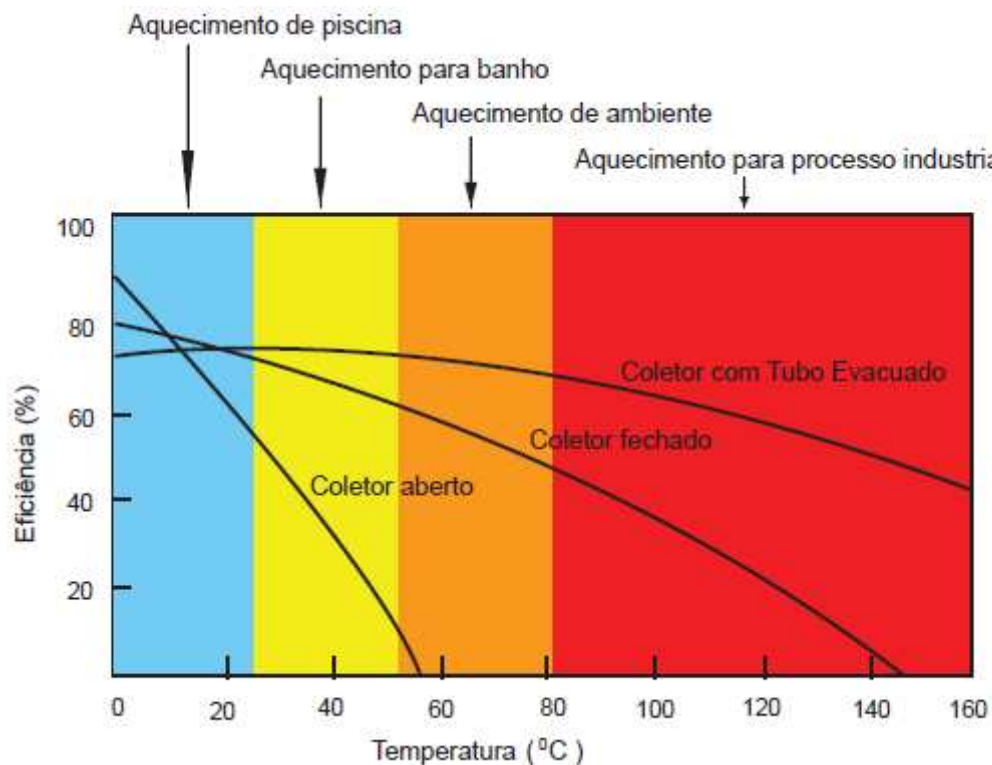


Figura 4-10- Curva característica dos coletores e aplicações

Fonte: DASOL, 2008

Os coletores abertos são adequados para uso em aquecimento de piscina que exigem temperaturas mais baixa na faixa de 30°C, a partir dessa temperatura o rendimento cai muito como pode ser visto na figura 4.10. Os coletores planos ou fechados se enquadram em uma faixa intermediária sendo os mais utilizados atualmente no Brasil. Em 2008 o Brasil possuía aproximadamente 2.400MW_{th} instalados, correspondente a 81% do total de coletores solares instalados (SHC-IEA, 2010).

Os coletores com tubo de vácuo apresentam um rendimento mais elevado inclusive em temperaturas mais altas.

Uma vez definida a quantidade necessária de coletores solares é necessário saber como eles serão integrados a edificação. Os coletores solares utilizados em obras de médio e grande porte, geralmente são os mesmos usados em obras de pequeno porte, podendo ser verticais ou horizontais. A orientação e a inclinação também seguem os mesmos princípios adotados para instalações de pequeno porte.

A instalação de coletores em residências unifamiliares normalmente é feita sobre o telhado com o ângulo de inclinação acompanhando a inclinação do telhado. No caso de prédios residenciais coletivos, normalmente a cobertura não possui telhado e a fixação dos coletores deve ser feita na própria laje. Por isso são usadas estruturas metálicas com a inclinação e orientação definida em projeto buscando o melhor rendimento do sistema de aquecimento solar.

Alguns aspectos devem ser observados em relação à estrutura de suporte dos coletores. A estrutura do local deve suportar o peso dos suportes, coletores e acessórios, o suporte deve resistir a cargas de vento, intempéries e corrosão, além de ser de fácil montagem e atender as especificações dos fabricantes de coletores.

Uma vez definido o ângulo de inclinação e a orientação do coletor deve-se definir a distância mínima entre eles para que não ocorra sombreamento e prejudique o rendimento do sistema. A figura 4.11 mostra a distância d que deve ser calculada entre duas baterias de coletores.

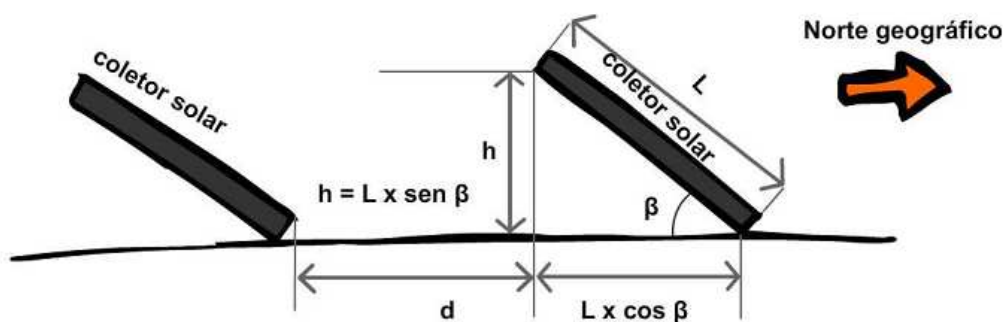


Figura 4-11- Distância mínima entre coletores

Fonte: DASOL, 2008

A distância horizontal d entre os coletores pode ser calculada através da seguinte equação:

$$d = h \times k$$

Onde:

h é a altura do coletor;

k é um fator que varia em função da latitude e pode ser observada na tabela 4.1.

Tabela 4.1- Fator k

Latitude (°)	5	0	- 5	- 10	- 15	- 20	- 25	- 30	- 35
k	0,541	0,433	0,541	0,659	0,793	0,946	1,126	1,347	1,625

Fonte: DASOL, 2008

Associação entre baterias de coletores

A associação entre coletores é um dos passos mais importantes em uma instalação de aquecimento solar de água. A forma como é feita a associação de coletores está diretamente ligada com a eficiência do sistema de aquecimento solar, pois se relaciona com a temperatura que se pretende atingir, a vazão de operação do sistema e o dimensionamento das tubulações e demais acessórios. Os coletores podem ser associados em série, em paralelo ou de forma mista, sendo parte em série e parte em paralelo.

A figura 4.12 apresenta as possíveis associações de coletores solares.

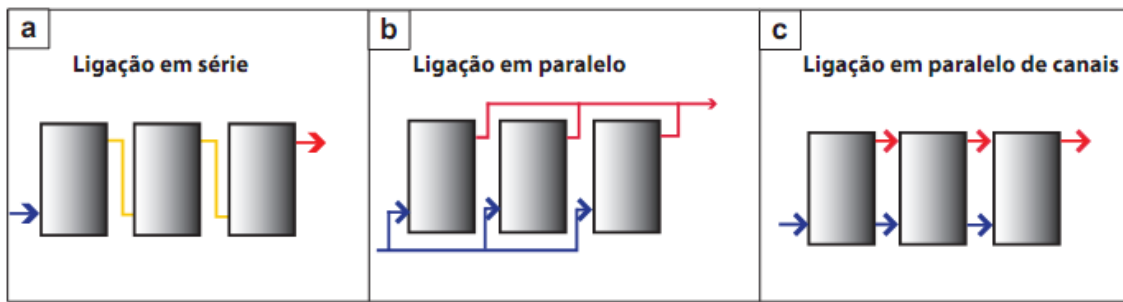


Figura 4-12- Associação de coletores solares

Fonte: RODRIGUES; MATAJS, 2010

Na ligação em série a saída do coletor é ligada na entrada do coletor seguinte. Na ligação em paralelo as entradas e saídas dos coletores são interligadas de maneira a formar um coletor único. A ligação em paralelo de canais exige que os coletores tenham duas entradas e duas saídas, pois as saídas do coletor são ligadas na entrada do coletor seguinte. Esse tipo de ligação evita a estagnação da água nos pontos de baixa pressão que ocorre na ligação em paralelo, além de possibilitar o equilíbrio do arranjo hidráulico.

A figura 4.13 mostra o comportamento da temperatura do fluido em uma bateria de coletores ligados em série.

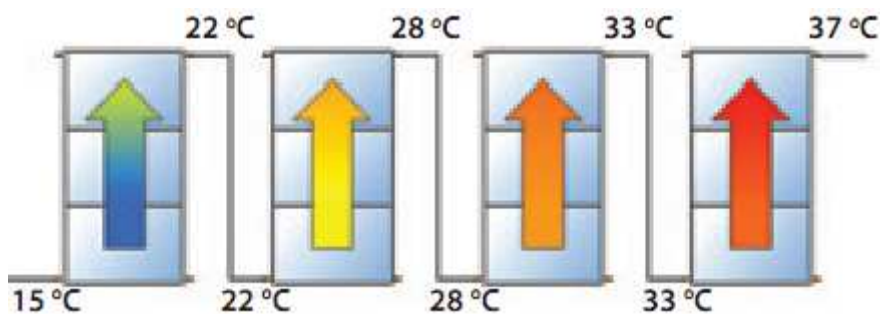


Figura 4-13- Comportamento da temperatura do fluido na associação em série

Fonte: RODRIGUES; MATAJS, 2010.

A temperatura do fluido de trabalho na entrada do coletor é igual à temperatura de saída do coletor anterior. Porém, observa-se que a diferença de temperatura entre a saída e a entrada de cada coletor vai diminuindo conforme o fluido se desloca no interior da bateria. O primeiro coletor, por exemplo, apresenta diferença de temperatura de 7°C entre a entrada e a saída, no segundo a diferença cai para 6°C, no terceiro para

5°C e no último a diferença é de apenas 5°C. Esse comportamento prejudica a eficiência do coletor fazendo com que o rendimento do sistema diminua. A perda de carga é maior que na associação em paralelo, mas a elevação da temperatura na bateria pode ser maior que 100%.

A figura 4.14 mostra o comportamento da temperatura do fluido em uma bateria de coletores solares ligados em paralelo de canais.

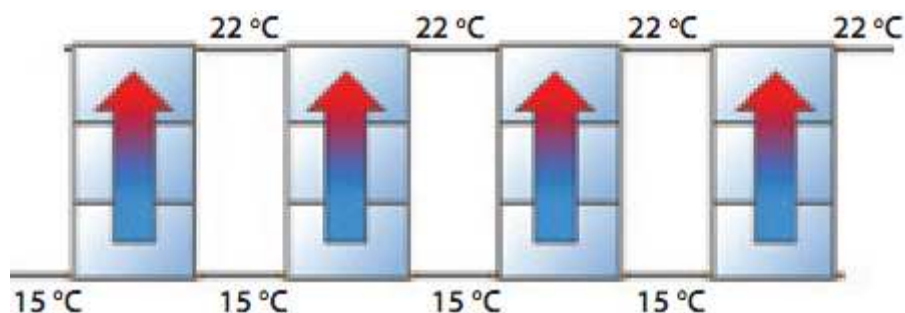


Figura 4-14- Comportamento da temperatura do fluido na associação em paralelo de canais

Fonte: RODRIGUES; MATAJS, 2010

Na associação em paralelo de canais a diferença de temperatura do fluido entre a entrada e a saída do coletor é a mesma em todos os coletores da bateria. O rendimento do sistema depende do tipo de coletor. A perda de carga é menor que na associação em série, mas a elevação da temperatura é menor, da ordem de 59%.

Nos dois casos de associação de coletores é recomendável que sejam interligados no máximo quatro coletores por bateria (RODRIGUES; MATAJS, 2010). No caso da associação em série a limitação se dá pelo rendimento do coletor e na associação em paralelo pelo arranjo hidráulico equilibrado.

Com o número de coletores necessários para o sistema de aquecimento solar definido é possível realizar associações mistas de coletores em série-paralelo para atender esse número.

Equilíbrio Hidráulico

A eficiência de uma bateria de coletores está associada à forma como os coletores são associados e a vazão do fluido de trabalho. Para equilibrar hidráulicamente uma instalação é necessário equalizar a vazão entre as baterias de coletores. A perda de carga no percurso do fluido de trabalho deve ser sempre a mesma, independente da bateria de coletores pela qual ele circule.

A figura 4.15 apresenta a maneira correta de fazer a instalação dos coletores solares utilizando a associação mista série-paralelo.

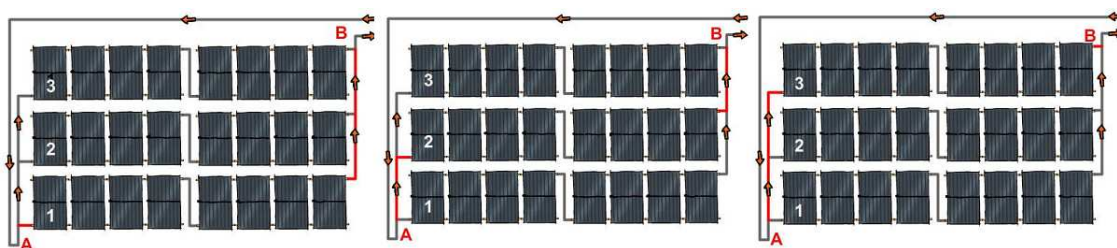


Figura 4-15- Equilíbrio hidráulico na bateria de coletores

Fonte: DASOL, 2008

Considerando os pontos A e B da figura 4.15, referentes a entrada e saída da associação mista de coletores respectivamente, pode-se observar que o comprimento dos tubos de entrada de água fria é igual ao comprimento dos tubos de água quente. Dessa forma, independente do percurso do fluido no interior da associação de coletores ele vai percorrer sempre dois trechos de tubulação. Os três possíveis percursos são mostrados em vermelho na figura 4.15.

Vazão do fluido de trabalho

A vazão total de operação do sistema é calculada em função da associação dos coletores solares. Deve-se determinar a área útil das baterias de coletores interligados em paralelo da seguinte forma:

$$A_u = N_c \times A_c \times N_f$$

Onde:

A_u é a área útil da bateria de coletores interligados em paralelo

N_c é o número de coletores da bateria

A_c é a área individual do coletor [m^2]

N_f é o número de filas de coletores

Uma vez definida a área útil da bateria de coletores (A_u) a vazão total de operação (Q_o) é calculada utilizando-se o valor da vazão de teste de eficiência dos coletores solares para banho que é de 72 litros por hora por metro quadrado (DASOL, 2008). Logo, tem-se:

$$Q_o = A_u \times 72$$

4.3 Reservatório Térmico

O caráter intermitente da radiação solar, oscilando entre dias ensolarados e nublados, períodos de chuva ou de baixa insolação, provoca certa defasagem entre o período de produção de água quente pelos coletores solares e o seu uso. O reservatório térmico faz a adequação entre a produção e o uso da água quente.

Em relação ao posicionamento os reservatórios térmicos podem ser horizontais ou verticais. Quanto à pressão de trabalho podem ser de alta ou baixa pressão. Podem operar funcionando em desnível ou em nível com a caixa de água fria. A troca de calor pode ocorrer em circuito direto, sem trocadores de calor, ou em circuito indireto, com trocadores de calor.

Principais componentes do reservatório térmico

A figura 4.16, mostra um reservatório térmico típico com seus principais componentes que serão detalhados em seguida.

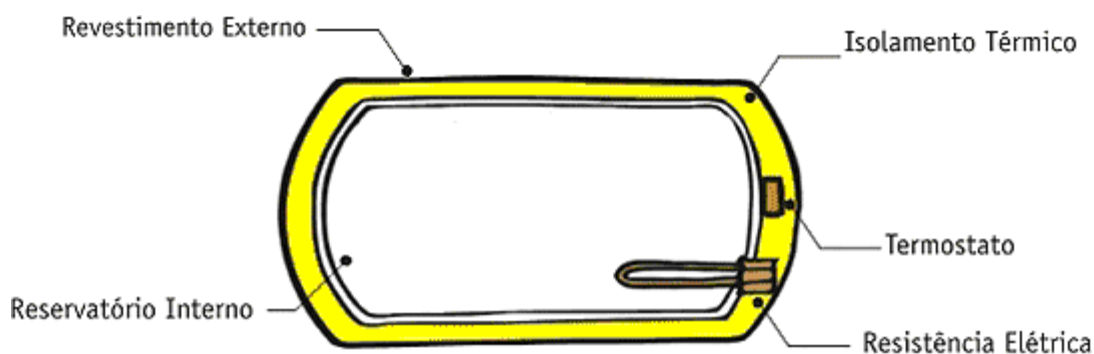


Figura 4-16- Reservatório Térmico

Fonte: SOLETROL, 2010

Corpo interno: Fica em contato direto com a água e deve ser fabricado com materiais resistentes a corrosão, como cobre ou aço inoxidável. Quanto maiores forem as pressões de trabalho, maior deverá ser a espessura da parede do corpo interno. A espessura para a parede de aço inoxidável varia entre 0,4 e 0,8 para reservatórios no mercado brasileiro (SOLETROL, 2010).

Isolante térmico: Reduz as perdas de calor, deve ser colocado sobre a superfície do corpo interno, normalmente utiliza-se a lã de vidro ou a espuma de poliuretano. Sua principal função é minimizar a transferência de calor da água para o ambiente.

Proteção externa: A sua principal função é a proteção do isolante térmico de danos decorrentes de intempéries, transporte e instalação. É construído em alumínio, aço galvanizado ou carbono pintado.

Estratificação nos reservatórios térmicos

A estratificação da água armazenada no reservatório consiste na formação de camadas, ou estratos, de água com diferentes temperaturas. A água mais quente, com menor densidade, tende a ocupar a parte superior do reservatório enquanto a água fria, mais densa, ocupa a parte inferior.

O desempenho do sistema de aquecimento solar depende da temperatura da água na entrada do coletor, quanto mais baixa a temperatura melhor o desempenho. Logo, a

estratificação do reservatório beneficia o desempenho do sistema de aquecimento solar, uma vez que, a água que vai para o coletor sai da base do reservatório. O posicionamento do reservatório na posição vertical favorece a estratificação, porém, nem sempre é possível devido a limitações arquitetônicas, devendo-se adotar então a posição horizontal.

Sistema auxiliar de aquecimento

O sistema auxiliar de aquecimento tem a função de complementar o aquecimento solar em períodos de baixa insolação ou consumo excessivo. Significa transferir a energia necessária para complementar o fornecimento de calor, a partir de uma fonte diferente do Sol. O sistema auxiliar deve manter a temperatura desejada da água do reservatório aproximadamente constante para uma determinada vazão. Logo, deve entrar em operação sempre que o termostato indicar temperatura abaixo do mínimo programado.

Existem diversos sistemas para fornecimento de energia auxiliar como, por exemplo, a eletricidade, o gás natural, o GLP, a bomba de calor, entre outros. Enfim, os sistemas convencionais de aquecimento podem ser usados como apoio ao sistema de aquecimento solar.

O sistema auxiliar elétrico, devido ao seu baixo investimento inicial e a disponibilidade de eletricidade, é o mais difundido no mercado brasileiro. É formado por uma ou mais resistências inseridas no reservatório e em contato direto com a água armazenada, pode ser acionado manualmente ou de forma automática com o uso de um termostato.

As instalações de médio porte com demanda de água quente variando entre 1.500 e 5.000 litros diários e as de grande porte que demandam mais de 5.000 litros diários necessitam de grandes volumes de reservatório térmico. (DASOL, 2010) Normalmente são usados mais de um reservatório térmico que devem ser associados.

Ligação em paralelo

A ligação de reservatórios térmicos em paralelo é recomendada apenas para situações em que é interligado um número pequeno de reservatórios. Para um número grande de reservatórios a interligação em paralelo torna-se tecnicamente e economicamente inviável. A figura 4.17 mostra a associação em paralelo de reservatórios, que tem por característica possuírem a mesma temperatura. Logo, deve-se ter uma equalização entre o fluxo de entrada e saída dos reservatórios térmicos para que se tenha o equilíbrio térmico entre eles. Para que isso ocorra é necessário existir a simetria das tubulações e conexões além da altura em relação ao piso. Qualquer diferença afeta a distribuição homogênea da água causando diferenças nas temperaturas de armazenamento de cada reservatório.

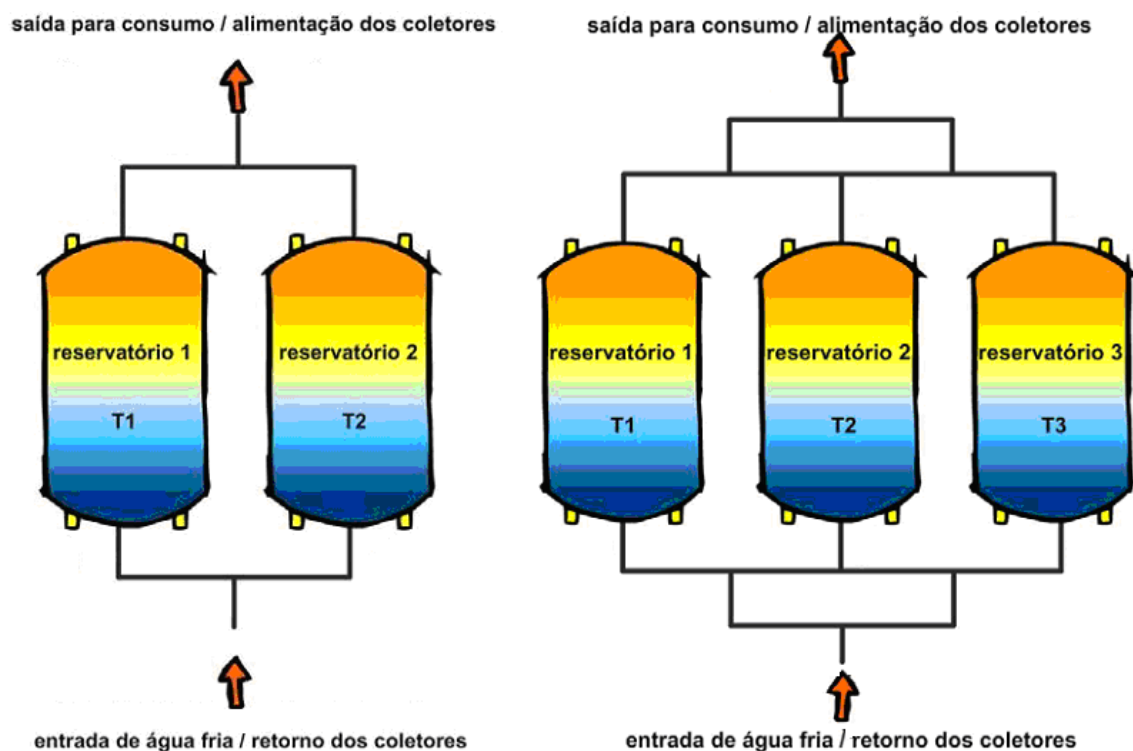


Figura 4-17- Associação em paralelo de reservatórios térmicos

Fonte: RODRIGUES; MATAJS, 2010.

De acordo com a figura 4.17, pode-se observar que conforme for aumentando o número de reservatórios a complexidade da instalação das tubulações é cada vez maior. Isso pode torna inviável esse tipo de interligação.

Ligação em série

É o tipo de ligação mais utilizado em instalações de médio e grande porte. Favorece a estratificação térmica da água e possui fácil instalação. A figura 4.18 mostra a associação em série de dois reservatórios térmicos.

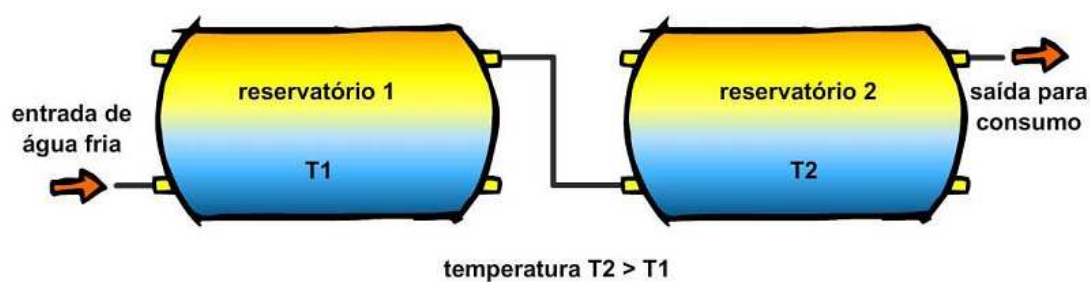


Figura 4-18- Associação em série de reservatórios térmicos

Fonte: RODRIGUES; MATAJS, 2010

A entrada de água fria deve ser feita pelo reservatório 1 e a saída para consumo pelo reservatório 2.

É muito comum em sistemas de aquecimento solar de médio e grande porte a associação de reservatórios térmicos com sistema de apoio como caldeiras e aquecedores de passagem. Segue abaixo dois exemplos utilizando aquecedores de passagem.

O sistema apresentado na figura 4.19 é normalmente usado quando as resistências elétricas dos reservatórios são substituídas por aquecedores de passagem.

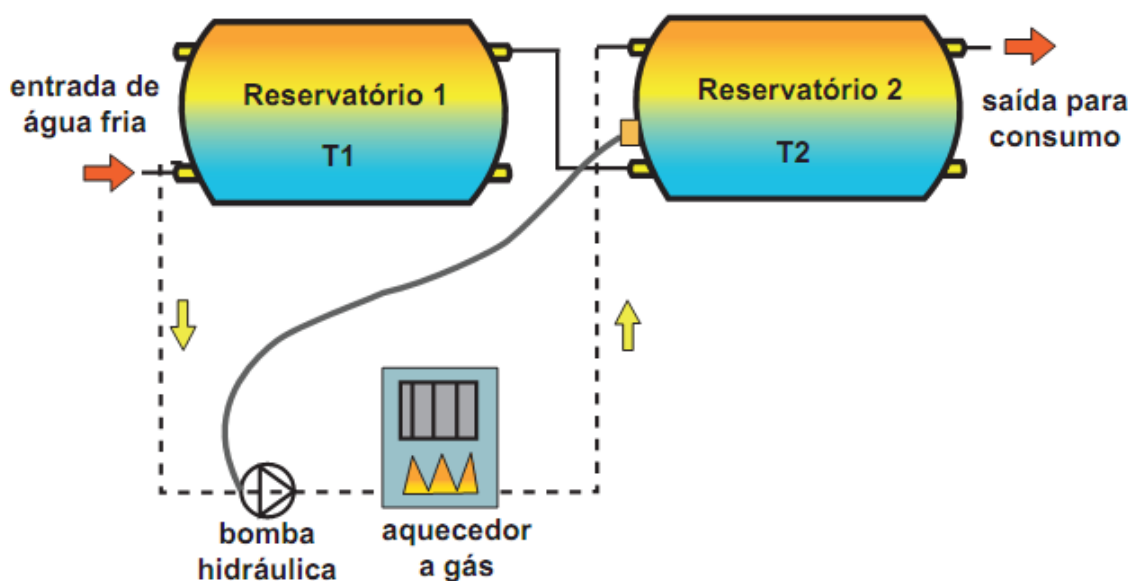


Figura 4-19- Associação entre reservatório térmico e aquecedor de passagem

Fonte: RODRIGUES; MATAJS, 2010

O sistema auxiliar é instalado entre a entrada de água fria do primeiro reservatório e a entrada de água quente do último reservatório. O termostato localizado no último reservatório térmico é responsável pelo acionamento do sistema.

O sistema auxiliar também pode ser instalado na saída de água quente para consumo, como mostrado na figura 4.20. Nesse caso o aquecedor deve ser dimensionado para atender a vazão máxima de consumo, pois deve fornecer água quente instantaneamente.

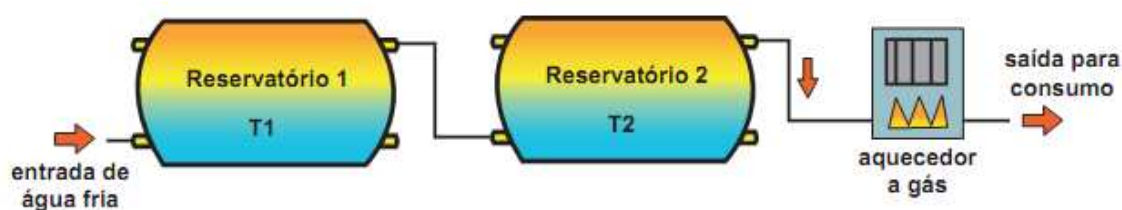


Figura 4-20- Sistema auxiliar em série com a saída de consumo

Fonte: RODRIGUES; MATAJS, 2010

5 - PRINCIPAIS PARÂMETROS ENVOLVIDOS NA AVALIAÇÃO DO USO DA ENERGIA SOLAR EM SUBSTITUIÇÃO A ENERGIA CONVENCIONAL - ESTUDO DE CASO

Os principais parâmetros envolvidos na avaliação do uso da energia solar, para aquecimento de água em prédios residenciais, visando à substituição das fontes convencionais de energia, serão analisados neste capítulo através um estudo de caso.

Para isso será realizado o dimensionamento do sistema de aquecimento solar e seu sistema complementar de energia, em seguida a viabilidade econômica da substituição do atual sistema de aquecimento de água do prédio pelo sistema solar.

Modelo de simulação

O estudo de caso será realizado com o apoio do modelo Retscreen, que é um software de análise de projetos de energia limpa. Possui um banco de dados climáticos internacional com mais de 1.000 estações de monitoramento terrestre, além de um conjunto de dados meteorológicos e de energia solar fornecido por satélites da NASA. O software é utilizado para avaliar a produção e economia de energia, os custos durante o tempo de vida e a análise financeira para vários tipos de tecnologias eficientes ou renováveis. Por viabilizar soluções de energia limpa, o Retscreen contribui para a redução de emissão de gases causadores do efeito estufa. Estima-se que em 2013 o Retscreen tenha incentivado a instalação de pelo menos 24GW de capacidade de energia limpa em todo o mundo (RETSCREEN, 2011).

O Retscreen é desenvolvido e mantido pelo Governo do Canadá através do Centro de Pesquisa Canmet Energy, em Quebec e tem o suporte de uma rede internacional de especialistas da indústria, do governo e do mundo acadêmico. Os seus principais parceiros são: Administração Nacional de Aeronáutica e Espaço (NASA), Parceria Energia Renovável e Eficiência Energética (REEEP), Programa do Ambiente das Nações Unidas (UNEP) e Fundo Global para o Meio Ambiente (GEF). O software é disponibilizado gratuitamente pelo governo do Canadá.

5.1 Caracterização do Estudo de Caso

Localização

A edificação estudada é um prédio residencial de 17 andares com 34 apartamentos, sendo 2 por andar, localizado na zona sul da cidade do Rio de Janeiro. Atualmente o prédio conta com um sistema de aquecimento central de água utilizando gás natural canalizado. A figura 5.1 mostra a vista aérea do prédio em estudo.



Figura 5-1- Foto do prédio

Fonte: GOOGLE, 2011

O sistema de aquecimento de água atual

Atualmente o prédio conta com um sistema de aquecimento de água central a gás. A figura 5.2 apresenta o esquema do sistema de aquecimento atual.

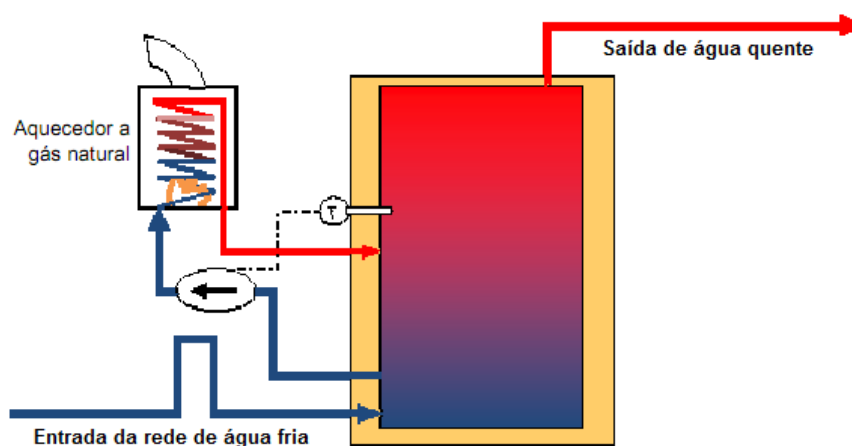


Figura 5-2- Sistema conjugado de aquecimento a gás

Fonte: COMGÁS, 2009

O sistema conta com um reservatório térmico de 2.000 litros e dois aquecedores de passagem. Esse tipo de sistema possui o mesmo princípio de funcionamento dos sistemas de acumulação, uma vez que mantém um volume de água quente armazenada no reservatório para ser usado imediatamente. Uma característica desse tipo de configuração é a possibilidade de instalar o aquecedor de passagem distante do reservatório de acordo com a configuração do ambiente.

O sistema com aquecedor de passagem é mais eficiente que o de acumulação. No aquecedor de acumulação quando o queimador é desligado, o ar ambiente circula pelo interior do reservatório através da tubulação destinada a passagem dos gases queimados trocando calor com a água do reservatório. Como no sistema conjugado não há entrada de ventilação no reservatório esse tipo de perda não ocorre. A tabela 5.1 mostra o consumo atual de gás natural no prédio ao longo do ano de 2010.

Tabela 5.1- Consumo atual de gás natural

Mês	Consumo de gás natural (m³)			Gasto com gás natural (R\$)
	Total	Cocção	Aquec. água	Aquec. água
Jan	962	289	673	3.941,68
Fev	553	166	387	2.265,85
Mar	511	153	358	2.093,76
Abr	809	243	566	3.314,78
Mai	1.047	314	733	4.289,96
Jun	1.196	359	837	4.900,47
Jul	1.461	438	1.023	5.986,27
Ago	1.467	440	1.027	6.010,86
Set	1.593	478	1.115	6.527,13
Out	1.334	400	934	5.465,90
Nov	1.080	324	756	4.425,17
Dez	1.399	420	979	5.732,23
Anual	13.412	4024	9.388	54.954,06

Fonte: Elaboração própria

A tabela mostra o consumo de gás total proveniente da conta da concessionária, a parte usada para cocção, para aquecimento de água e também o custo atual de aquecimento de água. Foi adotado o consumo de 30% para cocção, estimado em função do consumo médio do fogão a gás e do número de apartamentos do prédio.

A tabela 5.2 mostra a tarifa de gás natural da CEG para o setor residencial do Rio de Janeiro vigente no mês de janeiro de 2011.

Tabela 5.2- Tarifa de gás natural residencial

Tarifa de gás natural residencial	
m ³ /mês	R\$/m ³
0 a 7	3,3984
8 a 23	4,5111
24 a 83	5,5303
acima de 83	5,8534

Fonte: CEG, 2011

Temperatura ambiente

A cidade do Rio de Janeiro está localizada a -22,92° de latitude e a -43,17° longitude com temperatura ambiente média de 23,7°C e temperatura mensal variando de acordo com a tabela 5.3 abaixo.

Tabela 5.3- Temperatura ambiente média na cidade do Rio de Janeiro

Mês	Temperatura (°C)
Jan	26,2
Fev	26,5
Mar	26,0
Abr	24,5
Mai	23,0
Jun	21,5
Jul	21,3
Ago	21,8
Set	21,8
Out	22,8
Nov	24,2
Dez	25,2
Anual	23,7

Fonte: NASA, 2011

Radiação solar incidente

A figura 5.3 mostra a radiação solar média diária incidente na cidade do Rio de Janeiro ao longo do ano de acordo com a inclinação do plano do coletor.

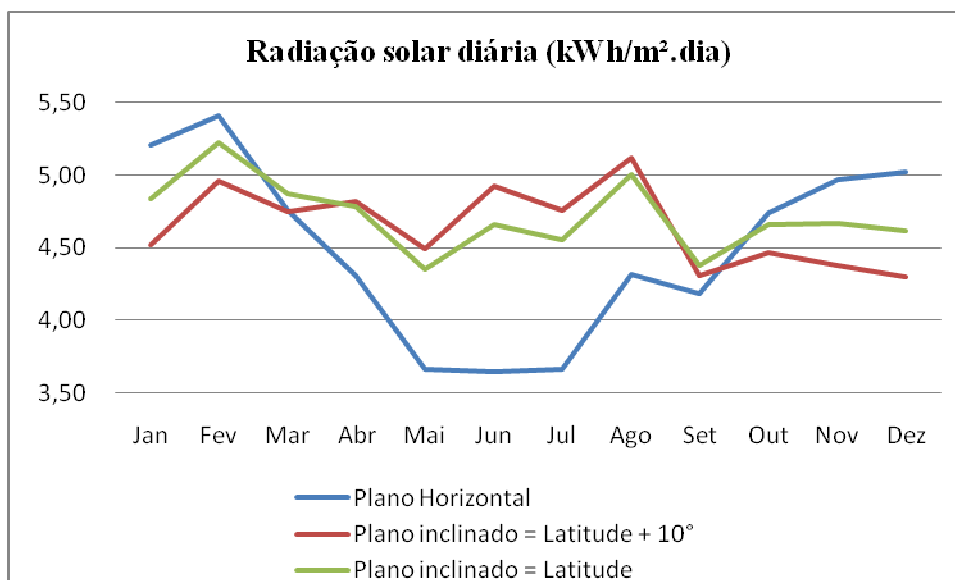


Figura 5-3- Radiação solar diária na cidade do Rio de Janeiro

Fonte: NASA, 2011

O gráfico da figura 5.3 mostra a radiação incidente no plano horizontal e no plano inclinado. Sendo que para o plano inclinado foram considerados dois ângulos de inclinação distintos. O primeiro com ângulo de inclinação coincidindo com o módulo da latitude mais 10° que beneficia os meses de inverno. No segundo caso a inclinação coincide com o módulo da latitude, o que favorece a média anual. Em ambos os casos a orientação do coletor foi considerada na direção do norte geográfico.

A radiação solar incidente no plano do coletor varia em função do ângulo de inclinação e da orientação do coletor em relação ao norte geográfico. A inclinação ideal dos coletores solares seria aquela que pudesse acompanhar a posição do Sol em relação à Terra. Porém, seria muito complexo alterar a inclinação de todos coletores de uma instalação solar ao longo do ano devido a problemas que podem surgir nas tubulações de alimentação e retorno dos coletores. Dessa forma deve-se escolher uma inclinação fixa para os coletores.

Para o estudo de caso foi considerada a inclinação com ângulo de $32,9^\circ$ que corresponde a latitude da cidade do Rio de Janeiro mais 10° . Com essa inclinação a radiação solar incidente média diária é de $4,65 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{dia}$.

5.2 Dimensionamento do Sistema de Aquecimento Solar

Dimensionamento da demanda de água quente no edifício

Para o presente trabalho foi adotado o método do volume médio que consiste em fazer uma estimativa do consumo diário de água quente por pessoa. A adoção de determinado valor de consumo de água quente por pessoa deve levar em conta algumas variáveis como, por exemplo, localização geográfica, classe social, características de uso, perfil dos usuários, entre outros.

A norma NBR 12269 determina o consumo diário de água quente por pessoa variando entre 66 a 120 litros para chuveiro e 6,0 a 9,6 litros para lavatório. As recomendações técnicas para dimensionamento de sistemas de aquecimento solar da Associação Brasileira de Engenharia de Sistemas Prediais (ABRASIP) em conjunto com a Associação Brasileira de Refrigeração, Ar Condicionado, Ventilação e Aquecimento (ABRAVA) adotam como consumo diário de água quente por pessoa 80 litros para o chuveiro, 10 litros para a cozinha e 5 litros para lavatório.

A tabela 5.4 mostra os valores típicos de consumo diário de água quente por usuários adotados para o cálculo da demanda de água quente em edifício.

Tabela 5.4- Consumo de água quente por pessoa em função do ponto de consumo

Ponto de consumo de água quente	Consumo diário por pessoa (litros)
Chuveiro	80
Lavatório	5
Cozinha	10
Consumo diário total	95

Fonte: ABRASIP/ABRAVA, 2010

Considerando que o estudo de caso está sendo realizado na cidade do Rio de Janeiro e que o prédio estudado não possui água quente na cozinha, a hipótese adotada ao longo desse trabalho será de 85 litros por pessoa, respeitando a recomendação da norma NBR 12269.

Uma vez definido o volume diário de água quente por usuário deve-se definir o número de usuários no edifício. Para isso a recomendação da ABRASIP/ABRAVA é de considerar um morador por quarto mais um morador por apartamentos para unidades de até 3 quartos e cinco moradores para unidades com quatro quartos ou mais, conforme mostrado na tabela 5.5.

Tabela 5.5- Número de moradores em função do número de quartos na unidade residencial

Número de quartos por residência	Número de habitantes
1 quarto	2
2 quartos	3
3 quartos	4
4 quartos ou mais	5

Fonte: ABRASIP/ABRAVA, 2010

Neste trabalho será considerado em média o número de 4 pessoas por apartamento, segundo levantamento realizado no local.

O dimensionamento da demanda de água quente em edificações residenciais coletivas deve levar em consideração o fator de ocupação em função do número de unidades habitacionais conforme mostrado na tabela 5.6.

Tabela 5.6- Fator de ocupação de edificações residenciais

Número de unidades habitacionais	Fator de ocupação
Até 9 unidades habitacionais	1
De 10 a 19 unidades habitacionais	0,9
De 20 a 39 unidades habitacionais	0,8
40 ou mais unidades habitacionais	0,7

Fonte: ABRASIP/ABRAVA, 2010

Os valores adotados são apresentados na tabela 5.7, que indica que o volume diário de água quente consumida pelo prédio foi calculado em 9.248 litros.

Tabela 5.7- Demanda de água quente do estudo de caso

Consumo diário por morador (litros)	5	8
Moradores por apartamento		4
Consumo diário por apartamento (litros)	40	3
Número de apartamentos	4	3
Fator de ocupação	,8	0
Volume diário de água quente (litros)	.248	9

Fonte: Elaboração própria

Dimensionamento do reservatório térmico

O cálculo do volume do reservatório térmico responsável pelo atendimento de todas as unidades residenciais do prédio pode ser calculado a partir da seguinte fórmula:

$$V_{armaz.} = \frac{V_{consumo} \times (T_{consumo} - T_{\text{água.fria}})}{(T_{armaz} - T_{\text{água.fria}})}$$

Onde:

V_{armaz} é o volume do sistema de armazenamento [m³]

$V_{consumo}$ é o volume de consumo diário [m³]

$T_{consumo}$ é a temperatura de consumo de utilização [°C]

T_{armaz} é a temperatura de armazenamento da água [°C]

$T_{\text{água.fria}}$ é a temperatura da água fria [°C]

Para este estudo de caso, foram adotadas as temperaturas de 40°C para o consumo de água quente e 45°C para o armazenamento. A temperatura da água fria foi considerada igual 23,7°C que é a temperatura ambiente média anual do Rio de Janeiro. Esse valor está coerente com o encontrado no modelo Retscreen, onde a temperatura da água de entrada varia no intervalo de 22,9 °C e 24,7 °C. A tabela 5.8 mostra o valor do volume do reservatório e dos parâmetros adotados para o dimensionamento.

Tabela 5.8- Parâmetros adotados para o dimensionamento do volume do reservatório térmico

Consumo diário de água quente (litros)	9 .248
Temperatura de consumo °C	4 0
Temperatura de armazenamento °C	4 5
Temperatura do ambiente °C	2 3,7
Volume do reservatório térmico (litros)	7 .077

Fonte: Elaboração própria

O volume do reservatório dimensionado é de 7.077 litros.

Esse valor corresponde a aproximadamente 77 % do volume de água consumida por dia, atendendo assim, as exigências da NBR 15569 que sugere que o volume do reservatório térmico seja maior ou igual a 75% do volume de água quente consumida diariamente pelo prédio.

Caso seja utilizada a configuração da instalação com reservatórios térmicos independentes para o sistema solar e para o sistema a gás, o dimensionamento do volume do reservatório necessário para o sistema de energia solar deve levar em consideração o volume do reservatório utilizado para o sistema de aquecimento auxiliar. Sendo assim o volume calculado anteriormente seria o volume total dos reservatórios de água quente, ou seja, reservatório do sistema solar mais reservatório do sistema auxiliar. O anexo C mostra como fabricantes de sistemas de aquecimento solar fazem esse dimensionamento.

Cálculo da energia necessária para o aquecimento de água do prédio

Uma vez definida a demanda diária de água quente deve-se calcular a energia necessária para aquecer água do reservatório, independente da fonte de energia.

$$E_{\text{útil}} = m \times c_p \times \Delta T = \rho \times V \times c_p \times (T_{\text{reserv.}} - T_{\text{amb}})$$

Onde:

$E_{\text{útil}}$ é a energia útil em kcal/dia

V é o volume diário de água a ser aquecida (litros)

ρ é a densidade da água (1kg/l)

C_p é o calor específico da água (1 kcal/kg. °C)

T_{reserv} é a temperatura de armazenamento da água (45 °C)

T_{amb} é a temperatura ambiente média anual (Rio de Janeiro 23,7°C)

Sendo assim a energia útil necessária para aquecer o volume de água armazenada é:

$$E_{\text{útil}} = 1 \times 9.248 \times 1 \times (45 - 23,7) = 196.982 \text{ kcal/dia ou } 229 \text{ kWh/dia}$$

A figura 5.4 mostra o comportamento da demanda de energia para aquecimento de água ao longo do ano. A variação se dá em função da oscilação da temperatura média mensal.

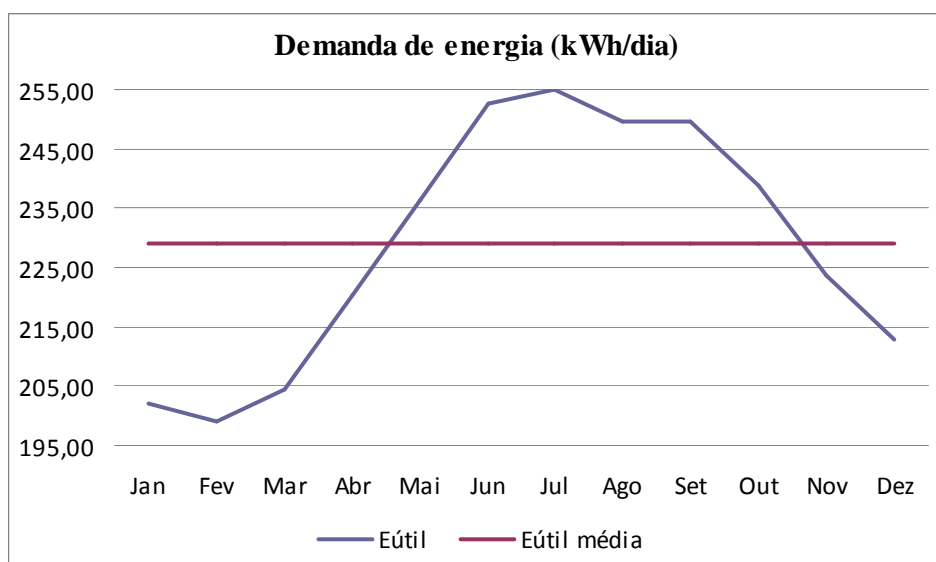


Figura 5-4- Variação da demanda de energia para aquecimento de água ao longo do ano

Fonte: Elaboração própria

Cálculo da área de coletores solares

Uma vez definida a demanda diária de água quente do prédio e a energia necessária para aquecê-la, deve-se determinar a área de coletores para fornecer a energia solar de forma total ou parcial.

Cabe ressaltar que o cálculo da área coletora varia ao longo do ano em função da variação da radiação solar e da temperatura ambiente. A área coletora pode ser determinada da seguinte forma:

$$A_{\text{coletora}} = E_{\text{útil}} / I_G \times \eta_c$$

Onde:

A_{coletora} é a área de coletores solares;

I_G é a irradiação global média diária, para o local da instalação, em kWh/m².dia;

$E_{\text{útil}}$ é a energia útil em kWh/dia;

η_c é a eficiência térmica do coletor solar

Para o cálculo da área coletora é necessário conhecer o valor da eficiência térmica do coletor, a tabela 5.9 mostra as principais características do coletor adotado no estudo de caso.

Tabela 5.9- Características do coletor solar adotado no estudo de caso

Fabricante	Heliotek
Marca	Heliosonic
Modelo	MC20C
Área	2 m ²
FRUL	5,825
FR($\tau\alpha_p$)	0,744
η	60%

Fonte: INMETRO, 2011

Considerando o rendimento de 60% do coletor e os cálculos feitos anteriormente da demanda de energia e irradiação solar no local da instalação, pode-se calcular o valor médio da área de coletores.

$$A_{\text{coletora}} = E_{\text{útil}} / I_G \times \eta_c = 229 / 4,65 \times 0,60 = 82 \text{ m}^2$$

A figura 5.5 mostra como a área coletora necessária para atender a demanda de energia varia ao longo dos meses do ano em função principalmente da quantidade de energia incidente e da quantidade de energia demandada para o aquecimento da água. A energia demandada é função dos hábitos de uso, considerados constantes, e da variação da temperatura ambiente.

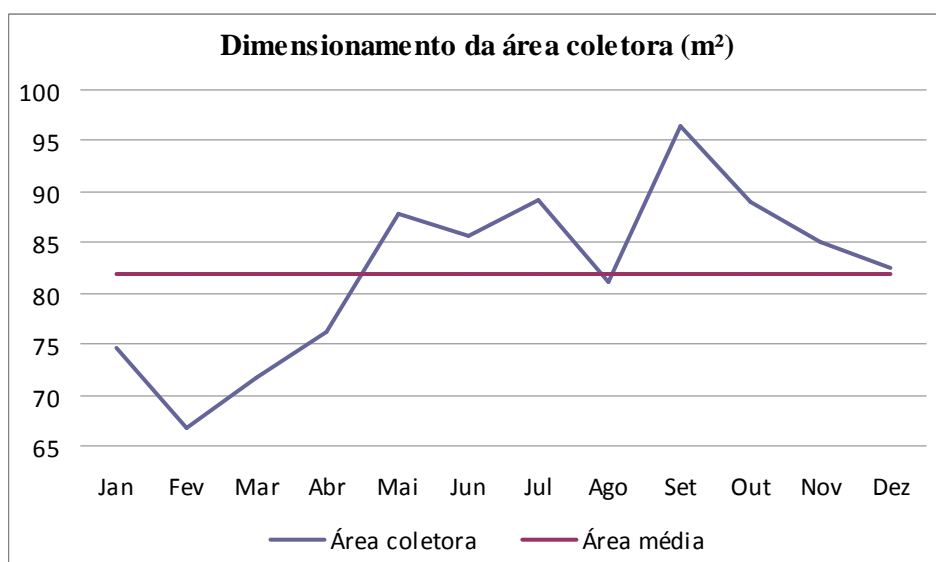


Figura 5-5- Dimensionamento da área coletora a cada mês

Fonte: Elaboração própria

Sistema Auxiliar

O dimensionamento para atender 100% da demanda de energia torna o sistema superdimensionado nos meses em que ocorre maior radiação solar, o que faz com que a eficiência do sistema diminua. Além disso, a maior produção de energia está associada ao aumento da área de coletores solares e consequentemente maior custo de investimento. A solução normalmente adotada na prática é o dimensionamento do sistema solar de aquecimento de água para atender a demanda de energia de forma parcial.

Nos meses de menor insolação ou aumento da demanda de água quente é necessário usar uma fonte auxiliar de energia para complementar o aquecimento da água. Normalmente o sistema auxiliar em edifícios residenciais utiliza a eletricidade ou gás.

O sistema auxiliar de aquecimento adotado para o estudo de caso utiliza o gás natural como fonte de energia. Foi adotado um aquecedor a gás natural com classificação “A” do INMETRO e rendimento de 82%. O anexo B apresenta os principais componentes encontrados no sistema de aquecimento solar com sistema auxiliar alimentado por GN.

5.3 Análise da Viabilidade Econômica

Premissas adotadas

Foram adotadas as seguintes premissas para a análise da viabilidade econômica:

Localização da instalação: Rio de Janeiro, RJ

Irradiação global média: 4,65 kWh/m².dia

Temperatura ambiente média: 23,7°C

Dias de operação por semana: 7 dias

Custo do gás natural: 5,8534 R\$/m³

Custo do GLP: 4,0382 R\$/kg

Custo da energia elétrica: 0,49523 R\$/kWh

Rendimento do aquecedor a gás: 82%

Demanda de água quente: 9.200 litros

Volume do reservatório térmico: 7.000 litros

Temperatura da água quente: 45°C

Sistema auxiliar de aquecimento: gás natural

Orientação do coletor solar: norte (ângulo azimutal de 180°)

Inclinação do coletor solar: 32,9° (referente a latitude local + 10°)

Área coletora: 82 m²

Taxa de desconto: 30%¹

Total do investimento: R\$ 87.700,00

Tempo de vida útil do projeto: 20 anos

Investimento com o sistema proposto

A tabela 5.10 apresenta o valor do investimento no sistema de aquecimento solar.

¹ Financiamento através da Caixa Econômica Federal através do CONSTRUCARD, linha de financiamento para compra de materiais de construção com juros de 1,54% a.m. + TR.

Tabela 5.10- Investimento no sistema de aquecimento solar

Coletor solar	28.700,00
Reservatório	25.000,00
Equipamentos extras (termostatos, bombas circulação)	4.000,00
Material de instalação (tubos, conexões e registros)	15.000,00
Mão de Obra	15.000,00
Total de investimento	87.700,00

Fonte: CALLORE, 2011

O custo do coletor solar é de 350 R\$/m², correspondendo a aproximadamente 33% do investimento. Foi considerada a utilização das tubulações de água quente existentes, assim como o aquecedor a gás usado no sistema de apoio.

Fração Solar

A determinação do custo de operação do sistema de aquecimento solar depende do consumo de energia atingido pelo sistema auxiliar, que é o responsável por fornecer energia complementar ao sistema de aquecimento solar. Porém, para calcular a energia consumida pelo sistema auxiliar, nesse caso gás natural, é necessário determinar a fração solar do sistema, que varia durante os meses do ano com maior e menor insolação.

A fração solar corresponde à parcela de energia solar utilizada para o aquecimento de um determinado volume de água. É definida como a razão entre a energia térmica fornecida ao sistema pelos coletores (Q_{solar}) e a demanda de energia total para aquecer o volume de água (Q_{total}) (DUFFIE; BECKMAN, 1991).

$$F_{mês} = Q_{solar} / Q_{total}$$

O cálculo da fração solar depende de dois parâmetros adimensionais e empíricos X e Y mostrados abaixo.

$$X = A_c \cdot F_R U_L \cdot (T_{Ref} - T_{amb}) \cdot \Delta t_i / Q_{total}$$

$$Y = A_c \cdot F_R (\tau_c \alpha_p) \cdot H_T \cdot N / Q_{total}$$

Onde:

A_c é a área total de coletores solares (m^2), calculada na etapa de dimensionamento;

$F_R U_L$ é o produto do fator de remoção e coeficiente global de perdas térmicas do coletor ($W/m^2 \cdot ^\circ C$), encontrado nos ensaios do INMETRO;

T_{Ref} é a temperatura de referencia considerada constante e igual a $100^\circ C$;

T_{amb} é a temperatura ambiente média para o mês em questão, $^\circ C$;

Δt_i é a duração do mês, em segundos;

Q_{total} é a demanda total de energia para aquecimento do volume de água (Joule);

$F_R(\tau_c \alpha_p)$ é o produto do fator de remoção, transmissividade do vidro e absortividade da tinta dos coletores, para o ângulo médio de incidência da radiação direta ($W/m^2 \cdot ^\circ C$);

H_T é a radiação solar diária em média mensal incidente no plano do coletor (J/m^2);

N é o número de dias do mês.

O parâmetro X está relacionado com as perdas térmicas do coletor solar e o parâmetro Y está relacionado com a energia solar absorvida pela placa. Logo, devem-se buscar valores mínimos para X e máximos para Y .

A fração solar pode ser calculada através da seguinte equação:

$$f = 1,029.Y - 0,065.X - 0,245.Y^2 + 0,0018.X^2 + 0,0215.Y^3$$

A fração solar é diretamente proporcional a área de coletores solares instalados, ou seja, o aumento da área coletora faz com que a fração solar aumente até um determinado ponto onde ocorre o seu valor máximo. Através da figura 5.6 pode-se observar que a partir desse ponto o aumento da área coletora não melhora a fração solar.

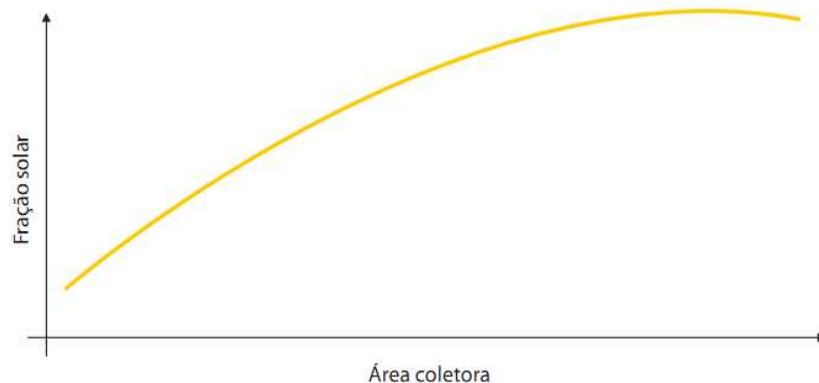


Figura 5-6- Variação da fração solar em função da área coletora

Fonte: RODRIGUES; MATAJS, 2010

O aumento da área coletora com o objetivo de aumentar a fração solar nos meses de menor incidência de radiação solar provocaria uma produção excessiva de energia nos meses de maior radiação. Além disso, poderia causar uma estagnação no fluxo de água dos coletores uma vez que haveria uma resistência térmica elevada nos coletores devido à elevação da temperatura. Outro problema seria a redução na eficiência do sistema o que causaria custos adicionais maiores que a produção adicional de energia.

Portanto, o aumento da fração solar a partir do aumento da área coletora faz com que a eficiência do sistema se reduza. A figura 5.7 mostra o comportamento da fração solar e da eficiência do sistema solar em função da variação da área coletora. Pode-se observar que existe um ponto que maximiza o sistema solar.

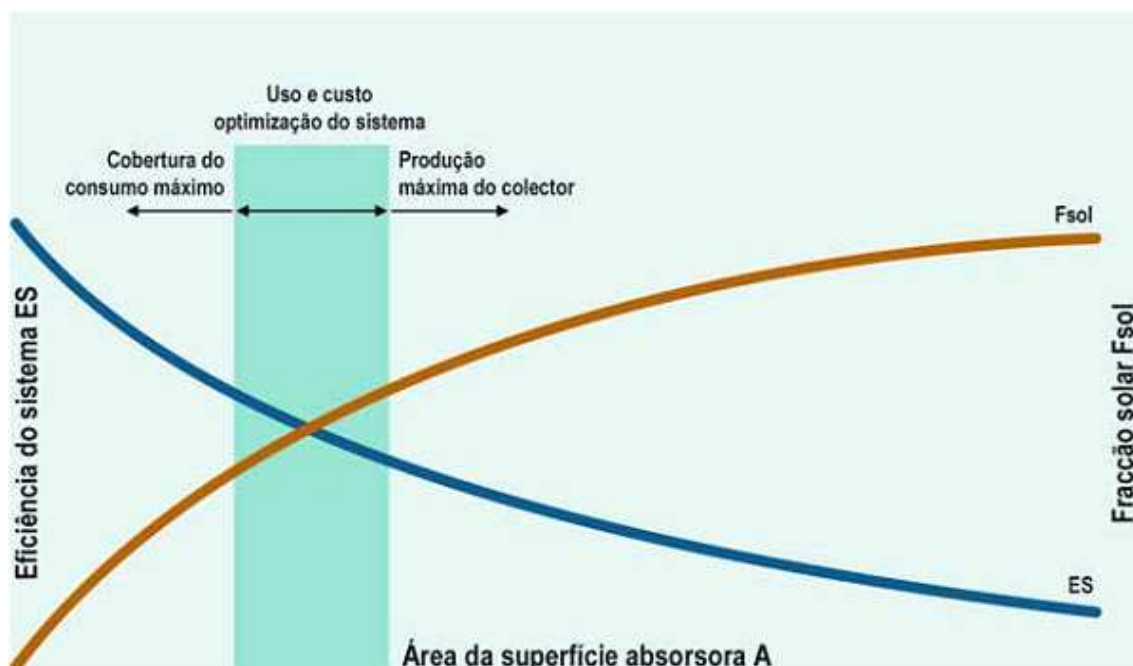


Figura 5-7- Fração solar e eficiência do sistema

Fonte: GREENPRO, 2004

A fração solar ideal deve ficar entre 60 e 80% (RODRIGUES, 2010), sendo o restante da energia fornecida pelo sistema auxiliar. Deve-se também respeitar os valores mínimos da fração solar estabelecidos pelas leis municipais de determinadas cidades. No Rio de Janeiro, por exemplo, a lei 5184 de janeiro de 2008 torna obrigatório o uso de sistema de aquecimento solar nos prédios públicos construídos a partir de 2008 e determina que seja atendida a fração solar mínima de 40%.

A fração solar calculada através do Retscreen é de 59%, o que significa que o sistema solar contribui em média com 59% da demanda total de energia necessária para aquecer o volume de água. Os outros 41% restantes são fornecidos pelo sistema de aquecimento auxiliar.

Custos com o sistema de aquecimento solar

O custo do sistema solar consiste no custo com o consumo de energia do sistema auxiliar e o custo com a operação e manutenção, que apesar de algumas vezes ser considerado desprezível, foi adotado o valor de 2% ao ano sobre o investimento total.

A partir do valor da fração solar pode-se calcular a energia necessária para complementar o sistema de aquecimento através da seguinte equação:

$$Q_{\text{auxiliar}} = (1 - f) * Q_{\text{total}}$$

Onde:

Q_{auxiliar} é a energia auxiliar do sistema de aquecimento (kWh);

f é a fração solar mensal;

Q_{total} é a energia total necessária para aquecer o volume de água dimensionado.

A figura 5.8 mostra o consumo de gás natural do sistema atual e do sistema proposto. Os valores foram calculados a partir do Retscreen.

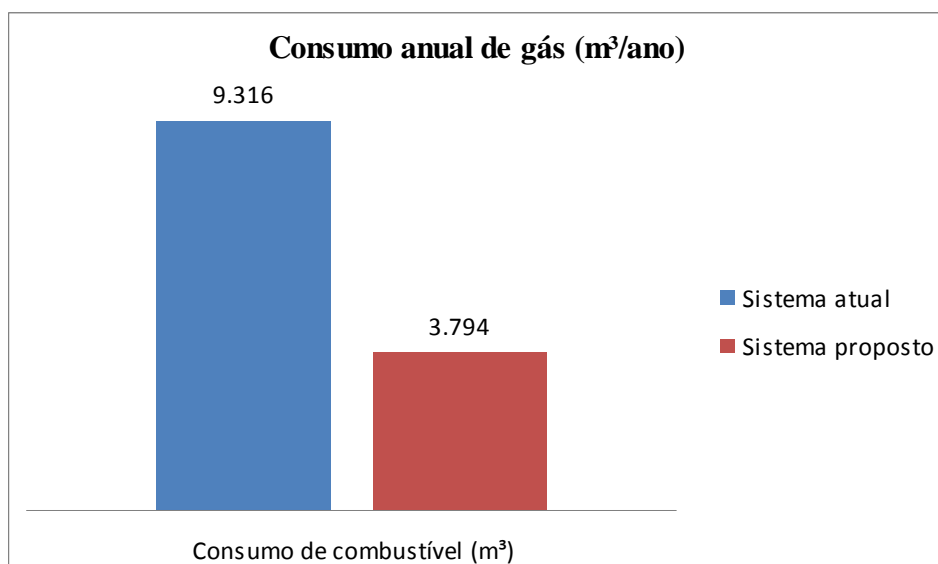


Figura 5-8- Consumo anual de gás natural

Fonte: Elaboração própria

O consumo do sistema atual é de 9.316 m³ de gás por ano. Com a instalação do sistema de aquecimento solar associado ao gás natural o consumo de gás foi reduzido para 3.794 m³ por ano. A economia é da ordem de 5.522 m³ por ano que corresponde a 59%.

A figura 5.9 mostra o custo anual com gás no sistema atual e no sistema proposto.

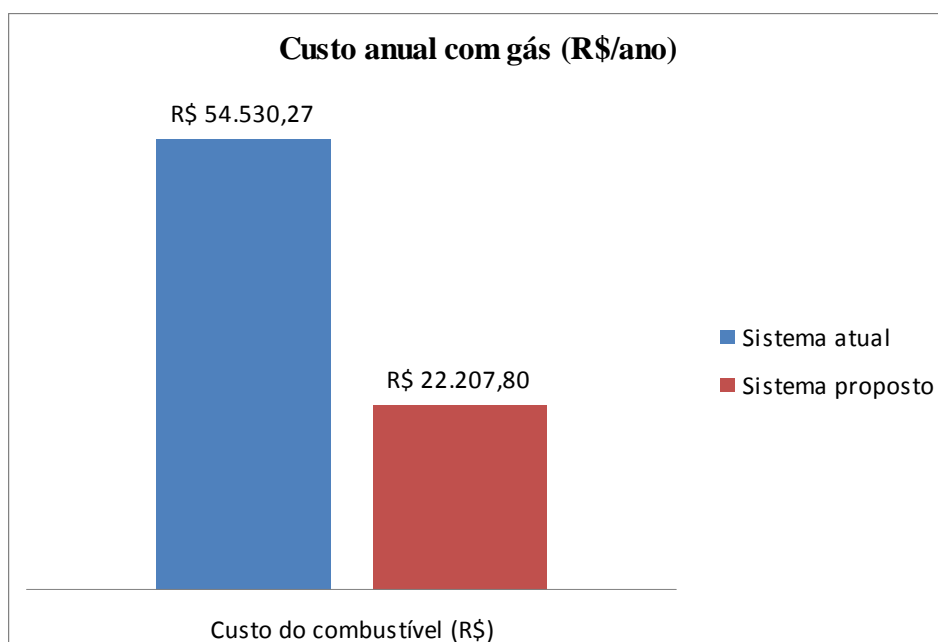


Figura 5-9- Custo anual com gás natural

Fonte: Elaboração própria

O sistema atual gera um gasto anual de R\$ 54.530,27 com gás natural, enquanto que com o sistema proposto esse valor cai para R\$ 22.207,80 ao ano. A economia é da ordem de R\$ 32.322,47 ao ano que corresponde a 59%.

O custo anual de manutenção do sistema solar associado ao gás natural é da ordem de R\$ 1.574,00 o que corresponde a 2% do valor do investimento inicial que é de R\$ 87.700,00. Portanto, o gasto anual com o sistema solar é de aproximadamente R\$ 23.781,80 que corresponde ao gasto com gás e manutenção do sistema.

Resultados da simulação

A análise da viabilidade econômica de sistemas de aquecimento solar de água tem como objetivo identificar a melhor configuração de projeto para atender a demanda de água quente com o melhor retorno do investimento, utilizando-se conceitos como: o

método do valor presente líquido (VPL), o método da taxa interna de retorno (TIR) e o método do pay back.

O método do Valor Presente Líquido (VPL) para avaliação dos custos e benefícios de uma determinada solução ao longo do tempo será utilizado para decidir se o uso do sistema de aquecimento solar é a alternativa mais viável para atender a demanda por água quente do edifício.

O cálculo do VPL é feito de maneira que todos os benefícios e custos do projeto em diversos instantes de tempo sejam trazidos para o presente. Sendo a alternativa que possuir o maior valor presente líquido a mais atraente.

Outro critério que deve ser analisado é a taxa interna de retorno (TIR) que corresponde a uma taxa de juro que torna nulo o valor presente líquido do projeto dentro de um período de tempo determinado. O projeto será viável se a TIR for superior à taxa mínima atratividade desejada.

O método do Pay Back Simples mostra o momento em que acontece o retorno do investimento inicial. O projeto será viável se o prazo de retorno do investimento estiver dentro do período previsto, que normalmente é o tempo de vida útil do equipamento.

A tabela 5.11 mostra o resultado da simulação realizada através do Retscreen.

Tabela 5.11- Resultados da simulação do caso base no Retscreen

Fração solar media	59%
Economia Gerada (R\$/ano)	32.322,47
Economia Gerada (%)	59%
VPL (20 anos) - (R\$)	9.735,00
TIR (20 anos)	33,4%
Payback (anos)	3

Fonte: Elaboração própria a partir do Retscreen

Os resultados encontrados no estudo de caso realizado mostram a viabilidade do projeto de substituição do sistema de aquecimento de água a gás natural pelo sistema de aquecimento solar com apoio a gás natural. O custo operacional de aquecimento de água foi reduzido em 59%, o que gera um fluxo de caixa capaz de proporcionar uma taxa interna de retorno de 33,4% e um valor presente líquido de R\$ 9.735,00, com retorno do investimento em 3 anos.

5.4 Análise de Sensibilidade

A análise de sensibilidade será usada para identificar quais variáveis são mais relevantes para avaliar a rentabilidade do projeto. Portanto, será simulada a variação de alguns parâmetros do sistema para identificar sua influência no resultado final, ou seja, como irão variar o VPL, a TIR e o tempo de retorno do investimento. Em alguns casos será necessário o aumento da área coletora solar para atender as solicitações que serão apresentadas abaixo. Neste caso será adotado o valor de R\$ 350,00 por metro quadrado de coletor solar (CALLORE, 2011).

Variação da área coletora

A variação da área coletora interfere diretamente na produção de energia do sistema solar. A produção de energia solar está diretamente relacionada com a área coletora disponível da instalação. Consequentemente quanto maior a área coletora maior o investimento inicial do sistema.

Cabe ressaltar que em alguns casos o aumento da área coletora ficaria limitado à área disponível na cobertura de cada prédio ou prejudicado por eventuais áreas de sombreamento causadas por prédios vizinhos. Neste estudo de caso a área disponível na cobertura do prédio é de aproximadamente 700m².

A tabela 5.12 mostra o impacto da variação da área coletora no sistema de aquecimento solar.

Tabela 5.12 – Impacto da variação da área coletora

Área Coletora (m ²)		VPL	TIR	Payback	Invest. Adicional		Economia Anual Adicional / ano	
		(R\$)	(%)	(Ano)	(R\$)	(%)	(R\$)	(%)
Base	82	9.735,00	33,4	3	87.700,00*	-	32.322,00**	-
+ 30%	108	16.692,00	35,3	2,8	9.100,00	10	4.934,00	15
+ 50%	124	18.382,00	35,5	2,8	14.700,00	17	7.183,00	22
+ 100%	164	17.515,00	34,6	2,9	28.700,00	33	11.234,00	35

* Investimento inicial da instalação

** Economia no estudo de caso base

Fonte: Elaboração própria a partir do Retscreen

Pode-se observar na tabela 5.12 que conforme a área coletora é incrementada ocorre maior economia de recursos. Isto acontece porque o aumento da área coletora permite que o sistema utilize mais energia solar para aquecer a água em vez de utilizar o combustível de o sistema auxiliar. Como o custo do sistema de aquecimento solar é composto pelo custo de operação do sistema auxiliar mais o custo de manutenção, quanto menos for utilizado o sistema auxiliar menor será o custo do sistema solar e consequentemente maior a economia.

A princípio o aumento da área coletora apresenta resultados positivos do ponto de vista econômico, com menor tempo de retorno do investimento e maior VPL e TIR. Porém, a partir de certo nível de aumento da área coletora os resultados começam a diminuir. Isso pode ser visto na tabela 5.12 no caso do aumento de 100% na área coletora onde o tempo de retorno passa a aumentar e o VPL e a TIR diminuem.

Variação da inclinação do coletor solar

Foi considerado, no estudo de caso, um ângulo de inclinação do coletor de 32,9° que corresponde a latitude local mais 10°. Essa inclinação favorece a captação de energia nos meses de inverno. A tabela 5.13 mostra o impacto da alteração da inclinação do coletor solar.

Tabela 5.13 – Impacto da inclinação do coletor solar

Inclinação do coletor		VPL	TIR	Payback	Economia / ano	
		(R\$)	(%)	(Ano)	(R\$)	(%)
Base	32,9°	9.735,00	33,4	3	32.322,00*	-
	22,9°	11.245,00	33,9	2,9	436,00	1%

* Economia no estudo de caso base

Fonte: Elaboração própria a partir do Retscreen

Pode-se observar que variação da inclinação do coletor solar proporcionou uma pequena economia, da ordem de 1%. Isto é explicado pelo fato de a variação de inclinação do coletor interferir mais no perfil da curva de captação da energia solar, isto é, captar mais energia no período de maior necessidade de aquecimento do que propriamente no aumento dessa energia captada ao longo do ano.

Variação da Fração Solar

A fração solar do sistema, ou seja, a parcela de energia proveniente dos coletores solares pode ser alterada aumentando a área coletora da instalação. Este aumento gera um acréscimo no investimento inicial do projeto. A tabela 5.14 mostra o impacto da variação da fração solar no sistema.

Tabela 5.14 – Impacto da variação da fração solar

Fração Solar	VPL	TIR	Payback	Invest. Adicional		Economia Adicional / ano	
	(R\$)	(%)	(Ano)	(R\$)	(%)	(R\$)	(%)
Base - 60%	9.735,00	33,4	3	87.700,00*	-	32.322,00**	-
70%	17.368,00	35,4	2,8	10.500,00	12	5.574,00	17
80%	17.515,00	34,6	2,9	28.700,00	33	11.234,00	35
90%	8.697,00	31,9	3,1	54.600,00	62	16.504,00	51
100%	4.675,00	30,9	3,2	74.900,00	85	22.176,00	69

* Investimento inicial da instalação

** Economia no estudo de caso base

Fonte: Elaboração própria a partir do Retscreen

A princípio o aumento da fração solar para 70% e 80% gera resultados positivos, pois apresenta menor tempo de retorno e maiores VPL e TIR. Com o aumento da fração solar para 90% e 100% o tempo de retorno aumenta e o VPL e a TIR diminuem. Logo,

a fração solar ideal está na faixa de 70% a 80%, conforme determinado por RODRIGUES (2010) que adota como ideal a faixa entre 60% e 70%.

Variação da fonte de energia

O estudo de caso foi realizado em um prédio com sistema central de aquecimento a gás natural. Pode-se analisar como seria o resultado do projeto se a fonte de energia convencional fosse outra, como por exemplo, eletricidade ou gás GLP. Além disso, foi analisada a possibilidade de diferentes combinações de fontes auxiliares.

O custo da eletricidade adotado foi de 0,49523 R\$/kWh conforme tarifa residencial, para consumo acima de 300kWh por mês, da concessionária Light. Para o GLP o custo foi de 4,0382 R\$/kg de acordo com a CEG, tarifas vigentes no mês de janeiro de 2011. Para o GC foi adotado o valor da conta de gás do prédio em estudo no valor de 5,89 R\$/m³.

A tabela 5.15 mostra o comportamento de um projeto em função da adoção de diferentes configurações de sistema de aquecimento.

Tabela 5.15 – Comportamento de diferentes sistemas de aquecimento solar de água

Sist. Atual	Custo Atual	Sistema Auxiliar	Custo solar	Economia		VPL	TIR	Payback
	(R\$)		(R\$)	(R\$)	(%)	(R\$)	(%)	(Ano)
GN	54.498,00	GN	22.195,00	32.322,00	59	9.735,00	33,4	3
		GLP	11.555,00	42.943,00	79	45.016,00	45,6	2,2
		Elet.	17.514,00	36.984,00	68	25.256,00	38,8	2,6
GLP	28.370,00	GN	22.195,00	6.175,00	22	-76.944,00	-2,7	27
		GLP	11.555,00	16.816,00	59	-41.617,00	14,9	6,3
		Elet.	17.514,00	10.856,00	25	-61.380,00	6,5	11
Elet.	43.463,00	GN	22.195,00	21.268,00	49	-28.419,00	19,8	4,9
		GLP	11.555,00	31.908,00	73	6.906,00	32,4	3,1
		Elet.	17.514,00	25.762,00	59	-11.953,00	25,8	3,8

Fonte: Elaboração própria a partir do Retscreen

A primeira coluna apresenta o sistema de aquecimento atual, que pode ser GN, GLP ou eletricidade. O prédio do estudo de caso utiliza o gás natural. A segunda coluna

apresenta o custo para aquecer o volume de água adotado no prédio em estudo. Pode-se observar que a opção mais viável é o GLP, seguida da eletricidade e por fim do GN. Cabe ressaltar que na maioria das áreas urbanas atendidas com gás natural não é permitida a instalação do GLP.

Em seguida são analisadas as possíveis configurações de sistemas de aquecimento solar. Em relação ao estudo de caso, onde o prédio é atendido por GN, a melhor opção seria o uso do GLP como combustível do sistema auxiliar. Esta opção apresenta o menor custo operacional e consequentemente os melhores indicadores financeiros, maior VPL, maior TIR e o menor tempo de retorno do investimento.

Em prédios atendidos por GLP ou eletricidade a melhor opção para o sistema auxiliar também é o GLP. Nos dois casos o uso de GN no sistema auxiliar inviabilizaria o projeto.

O uso da eletricidade no sistema auxiliar seria inviável em prédios com sistema a gás GLP e em prédios com sistemas elétricos de aquecimento é menos atraente que o GLP.

Variação regional

Caso a mesma instalação fosse realizada em outras regiões os resultados seriam diferente dos apresentados para o caso do Rio de Janeiro. A tabela 5.16 mostra a simulação realizada para o Rio de Janeiro, Natal, Belo Horizonte e Porto Alegre.

Tabela 5.16 - Simulação da Variação Regional

Cidade	VPL	TIR	Payback
	(R\$)	(%)	(Ano)
Rio de Janeiro	9.735,00	33,4	3
Natal	12.533,00	34,4%	2,9
Belo Horizonte	7.111,00	32,5%	3,1
Porto Alegre	18.004,00	36,3%	2,8

Fonte: Elaboração própria a partir do Retscreen

Pode-se observar que o tempo de retorno do investimento ficou em torno de 3 anos em todos os casos. A taxa interna de retorno também não apresentou grandes variações, oscilando entre 32,5% em Belo Horizonte e 36,3% em Porto Alegre. O VPL porém, apresentou maior variação que foi de R\$ 9.735,00 no Rio de Janeiro e R\$ 18.004,00 em Porto Alegre.

Variação da taxa de desconto

Os impactos da variação da taxa de desconto do projeto pode ser vista na tabela 5.17.

Tabela 5.17 - Impacto da variação da taxa de desconto

Taxa de desconto	VPL	TIR	Payback
	(R\$)	(%)	(Ano)
30%	9.735,00	33,4	3
25%	28.485,00	33,4%	3
20%	55.393,00	33,4%	3
15%	96.230,00	33,4%	3

Fonte: Elaboração própria a partir do Retscreen

A variação da taxa de desconto tem impacto direto no valor do VPL. A taxa de desconto usada no estudo de caso é a taxa disponível no mercado para pessoa física, através da linha de financiamento para materiais de construção da Caixa Econômica.

6 - CONCLUSÕES

A energia solar no Brasil tem um enorme potencial de aproveitamento, porém seu uso ainda é tímido comparado com os números de outros países. Existem países que apesar de não possuírem o mesmo potencial de energia solar que o Brasil possui estão mais avançados em termos de mercado.

Quando substitui a energia elétrica contribui com a redução da demanda no horário de ponta do setor elétrico, uma vez que é nesse horário que ocorre a maior demanda por água quente para banho. Isso, sem falar nas vantagens proporcionadas pela geração distribuída de energia, que dispensa o uso das linhas de transmissão e distribuição e todas as suas perdas. Entretanto seria necessária a criação de políticas públicas para estimular a substituição dos sistemas.

A substituição da energia convencional utilizada para aquecimento de água por energia solar mostra-se como uma opção viável para o desenvolvimento do mercado nacional de energia solar. De acordo com o estudo de caso real realizado, o investimento no sistema de aquecimento solar foi de R\$ 87.700,00, o tempo de retorno do investimento foi de 3 anos, com taxa interna de retorno de 33,4% e valor presente líquido de R\$ 9.735,00. Os valores foram simulados com taxa de desconto de 30% ao ano, referente à taxa de juros disponível no mercado para financiamento de material de construção.

Quando as fontes a serem substituídas forem os combustíveis fósseis, como por exemplo, o gás natural ou o GLP, a contribuição se dá por conta dos efeitos que esses gases trazem para o meio ambiente.

O sistema de aquecimento solar deve ser dimensionado para atender parcialmente a demanda de energia. Um sistema com fração solar de 100% estaria superdimensionado nos meses de maior radiação solar. O estudo demonstrou que os melhores resultados do ponto de vista econômico são para valores de fração solar entre 70% e 60%. Para esses valores o VPL foi de aproximadamente R\$ 17.000,00, a TIR ficou em torno de 35% e o tempo de retorno de aproximadamente 3 anos. Para a fração

solar de 100% o VPL cai para R\$ 4.675,00, a TIR foi reduzida para 30,9% e tempo de retorno aumentou para 3,2 anos.

O estudo mostrou que a escolha do sistema auxiliar ao aquecimento solar pode modificar consideravelmente os resultados da simulação. O sistema auxiliar que mostrou o melhor resultado foi o alimentado por GLP com custo de R\$ 11.555,00 por ano, seguido da energia elétrica com R\$ 17.514,0 e do GN com R\$ 22.195,00.

O uso do GN como sistema auxiliar só é viável quando o prédio já é alimentado com GN como no estudo de caso. Nos casos em que o prédio é alimentado com GLP ou energia elétrica o GN como fonte auxiliar de energia não é viável apresentando VPL negativo de R\$ - 41.617,00 e R\$ - 28.149,00 respectivamente.

Quando a energia elétrica é a fonte auxiliar, o sistema solar é viável apenas quando a energia solar substitui instalações que eram alimentadas por GN, para este caso o VPL é de R\$ 25.256,00. Para instalações alimentadas por GLP ou energia elétrica o VPL é negativo com valor de R\$ - 61.380,00 e R\$ - 11.953,00 respectivamente.

O uso do GLP como fonte auxiliar viabiliza a instalação do sistema solar nos três casos estudados, prédios alimentados com GLP, GN ou eletricidade. O melhor caso é quando a fonte convencional substituída pelo sistema solar é o GN com VPL de R\$ 45.016,00, quando a fonte convencional é o próprio GLP o VPL é de R\$ 41.617,00 e no caso de instalações alimentadas por energia elétrica o VPL é de R\$ 6.906,00.

A viabilidade de instalações de sistema de aquecimento solar deve levar em consideração a região de utilização. O estudo mostrou que a mesma instalação do estudo de caso poderia fornecer resultados diferentes em outras regiões do país. O VPL, por exemplo, que foi de R\$ 9.735,00 para o Rio de Janeiro poderia chegar a R\$ 18.004,00 em Porto Alegre.

A taxa de desconto utilizada no estudo de caso é a taxa disponível no mercado para pessoa física, uma vez que, normalmente o investimento em sistema de aquecimento solar é feito pelo usuário final do sistema. A criação de programas para incentivo da

energia solar com linhas de financiamento com taxas mais atrativas certamente impulsionaria o mercado de aquecimento solar.

Existem algumas limitações do estudo de caso em função de algumas variáveis. A área útil dos prédios é limitada em função do espaço físico da cobertura e sombreamento causado por prédios vizinhos. Em relação ao energético usado como fonte auxiliar, nem sempre é possível utilizar a fonte de energia desejada, em função de restrições legais ou falta de infra-estrutura para o fornecimento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A. FERNÁNDEZ-GARCÍA, E. ZARZA, L. VALENZUELA, M. PÉREZ, **Parabolic-trough solar collectors and their applications**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, n. 14, p. 1695-1721, 2010

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Disponível em <[http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/03-Energia_Solar\(3\).pdf](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/03-Energia_Solar(3).pdf)> Acesso em Dez. 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENGENHARIA DE SISTEMAS PREDIAIS (ABRASIP). Disponível em: <[HTTP://www.abrasip.com.br](http://www.abrasip.com.br)>. Acesso em Dez. 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (ABNT NBR 15569). **Sistema de Aquecimento Solar de Água em Circuito Direto – Projeto e Instalação**, 2008.

B. KONGTRAGOOL; S. WONGWISES, **A review of solar-powered *Stirling* engines and low temperature differential *Stirling* engines**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, n.7, p. 131-154, 2003.

BANCO CENTRAL DO BRASIL. Disponível em <<http://www.bcb.gov.br/>> . Acesso em Jan de 2011.

BAPTISTA, A. S. C., **Análise da Viabilidade Econômica da Utilização de Aquecedores Solares de Água em Resorts no Nordeste do Brasil**. 2006. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2006. Disponível em <<http://www.ppe.ufrj.br>>. Acesso em Nov. 2010.

CEG. Disponível em: <<http://portal.gasnatural.com/servlet/ContentServer?gnpage=4-60-2¢ralassetname=4-60-1-1-7-0>>. Acesso em Jan. 2011

CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE SALVO BRITO (CRESESB). Disponível em <<http://www.cresesb.cepel.br>>. Acesso em Out. 2010.

CHAGURI JUNIOR, J . J. **Sistemas Prediais de Aquecimento de Água a Gás: Parâmetros de Dimensionamento e Gerenciamento**. Dissertação (Mestrado em Energia) – EP/FEA/IEE/IF da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2009

COMGÁS. **Manual de Instalações – Sistema de Aquecimento Solar e Gás Natural**. Jul 2009. Disponível em: <<http://catedradogas.iee.usp.br/outrosartigos.htm>>. Acesso em Nov. 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE AQUECIMENTO SOLAR (DASOL). Disponível em: <<http://www.dasolabrava.org.br>>. Acesso em Out. 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE AQUECIMENTO SOLAR (DASOL). **Manual de Capacitação em Projetos de Sistemas de Aquecimento Solar**. 2008.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE AQUECIMENTO SOLAR (DASOL). **PAC Solar: O que o aquecimento solar pode fazer pelo Brasil**. São Paulo, 2010. Disponível em <<http://www.dasolabrava.org.br>>.

DUFFIE, J.A., BECKMAN, W.A. **Solar engineering of thermal processes**. 2 Ed. New York, John Wiley & Sons, 1991.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balanço Energético Nacional 2009 (BEN)**. Brasil, 2010. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br>>

ENSUN. Disponível em <<http://www.ensunchina.en.alibaba.com>>. Acesso em Dez 2010.

FAIMAN, D., HAZAN, H., LAUFER, I., **Reducing the heat loss at night from solar water heaters of the integrated collector–storage variety**. Solar Energy Vol. 71, No. 2, pp. 87–93, 2001

GREENPRO. **Energia Solar Fotovoltaica – Manual Sobre Tecnologias, Projectos e Instalações**, 2004. Disponível em: <<http://www.greenpro.de/index.html>>. Acesso Nov. 2010.

HELIOTEK. **Sistema Heliotek de Aquecimento Solar**. Manual. Disponível em: <<http://www.heliotek.com.br>>. Acesso Dez. 2010.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL (INMETRO). **Sistemas e Equipamentos para Aquecimento Solar de Água** Disponível em <<http://www.inmetro.gov.br/consumidor/pbe/ColetoresSolares.pdf>>. Acesso em Dez. 2010.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acessado em Jan. 2011.

LABSOLAR. Disponível em: <<http://www.labsolar.ufsc.br>>. Acesso em Nov. 2010.

LAMBERTS, R., DUTRA, L., PEREIRA, F.O.R., 2004, **Eficiência energética na arquitetura**. 2 ed. São Paulo, Pro Livros.

LIGHT. **Projeto de Instalação de Aquecimento Solar em Comunidades de Baixo Poder Aquisitivo**. Rio de Janeiro 04/12/2006.

OLIVEIRA FILHO, K.S.; SARAIVA, M.F.O. **O Sol: a nossa estrela**. Porto Alegre: Departamento de Astronomia do Instituto de Física da UFRGS, 2005. Disponível em: <<http://astro.if.ufrgs.br/esol/esol.htm>>

PEREIRA, E. M. D.; DUARTE, L. O. M.; PEREIRA, L. T.; FARIA, C. F. da C. Energia Solar Térmica. In: TOLMASQUIM, M. T. (org), 2003, **Fontes Renováveis de Energia no Brasil**. Ed. Interciência, Rio de Janeiro, 2003.

POHL, C., 2010. **Key Factors for Photovoltaic Industry Development in Germany**.

MICROGERAR 2010, São Paulo

PROCEL. **Avaliação do Mercado de Eficiência Energética no Brasil – Pesquisa de Posse de Equipamentos e Hábitos de Uso – Ano Base 2005 – Classe Residencial Relatório Brasil.** Ed. 2007

PROCOBRE. Instituto Brasileiro do Cobre. **Aquecimento Solar de Água.** Disponível em: <http://www.procobre.org/pr/aplicacoes_do_cobre/energia_solar.html> . Acesso em Dez. 2010.

PROJETO PLANTE UMA ÁRVORE. Disponível em: <<http://projetoplanteumarvore.blogspot.com/2010/10/desidratacao-de-frutas-e-legumes-com.html>> Acesso em Dez. 2010.

RETSCREEN INTERNATIONAL. Disponível em: <[HTTP://www.etscreen.net](http://www.etscreen.net)>. Acesso em Nov. 2010.

RODRIGUES D. - MATAJS R. **Um banho de sol para o Brasil.** São Paulo. Vitae Civilis, 2005.

RODRIGUES, D., MATAJS, R. **Introdução ao Sistema de Aquecimento Solar.** Vitae Civilis, Ekos Brasil, São Paulo, 2010.

S. ALEXOPOULOS; B. HOFFSCHMIDT, **Solar tower power plant in Germany and future perspectives of the development of the technology in Greece and Cyprus.** Renewable Energy, n.35, p. 1352-1356, 2010

SANTIAGO, B. – **Estações do Ano e Eclipses.** Disponível em <<http://www.if.ufrgs.br/oei/santiago/fis2005/textos/eclipses.htm>>. Acesso em Dez. 2010.

SEMPRE SUSTENTÁVEL. Disponível em: <<http://www.sempresustentavel.com.br>>. Acesso em Dez. 2010.

SENTELHAS, P.C., ANGELOCCI, L.R., 2009. **Radiação Solar – Balanço de Energia**. Meteorologia Agrícola, aula 5. ESALQ/USP

SOCIEDADE BRASILEIRA DA FÍSICA (SBF). Disponível em <<http://pion.sbfisica.org.br/pdc/index.php/por>>. Acesso em Dez. 2010.

SOLAR HEATING & COOLING PROGRAMME - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (SHC-IEA). **Solar Heat Worldwide – Markets and Contribution to the Energy Supply 2008**. Ed. 2010. Disponível em: <<http://www.iea-shc.org>>

SOLAR HEATING & COOLING PROGRAMME - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (SHC-IEA). **Recommendation: Converting solar thermal collector area into installed capacity (m² to kWth)**. 2004. Disponível em: <<http://www.iea-shc.org>>

SOLAR PACES. Disponível em <<http://www.solarpaces.org>>. Acesso em Dez. 2010.

SOLARCOOKING. Disponível em: <<http://www.solarcooking.org>>. Acesso em Nov. 2010

SOLARES. Disponível em: <<http://www.solares-online.com.br>>. Comunicação pessoal em Fev de 2011.

SOLETROL. Disponível em: <<http://www.soletrol.com.br>>. Acesso em Nov. 2010.

SWERA. **Data for Solar and Wind Renewable Energy**. Disponível em <http://swera.unep.net/typo3conf/ext/metadata_tool/archive/browse/255.pdf?Image=View+Image>. Acesso em Jan. 2011.

TRANSEN. Disponível em: <<http://www.transsen.com.br/>>. Acesso em Nov. 2010.

WIKIPÉDIA. **A Enciclopédia Livre**. Disponível em <<http://pt.wikipedia.org>>. Acessado em Jan. 2011.

ANEXO A - PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO SISTEMA DE AQUECIMENTO SOLAR POR TERMOSSIFÃO

Sistema de Aquecimento Solar de Pequeno Porte

Os sistemas de aquecimento solar de pequeno porte utilizam o princípio do termossifão, que permite a circulação da água de forma natural, sem a necessidade de utilizar bombas hidráulicas. Por oferecerem ao consumidor baixo custo, eficiência e confiabilidade é o sistema de aquecimento solar mais utilizado no Brasil. Segundo a ABRAVA 90% dos sistemas de aquecimento solar de água no Brasil utilizam o sistema de termossifão.

O princípio de funcionamento do termossifão

A base do funcionamento do sistema de termossifão é a mudança de densidade da água. Conforme pode ser visto na figura abaixo, ao aumentar a temperatura da água sua densidade diminui. Isso explica o fato de a água quente, que possui uma densidade menor que a água fria, ficar concentrada na parte de cima do reservatório.

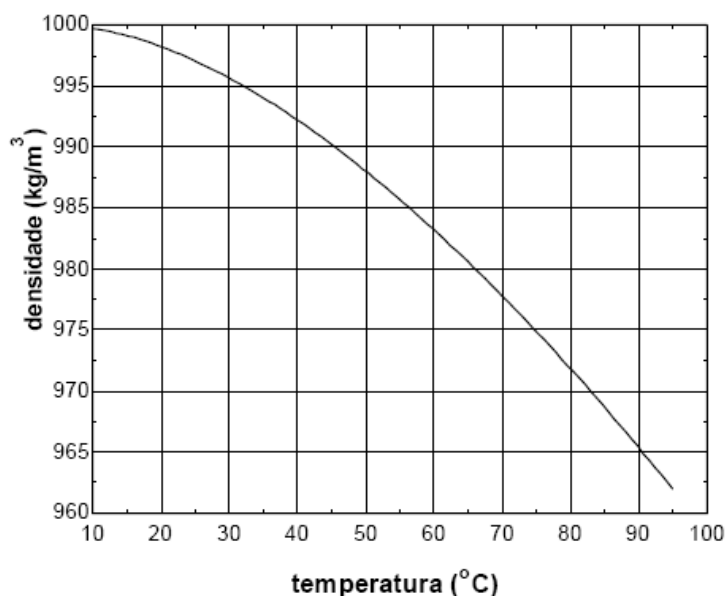


Figura: Variação da densidade da água em função da temperatura

Fonte: DASOL, 2008

Para melhor entendimento do funcionamento do termossifão será apresentada a fórmula da pressão manométrica estática, que mostra que a pressão manométrica estática é proporcional ao produto da densidade do fluido pela aceleração da gravidade e pela altura. Logo:

$$P = \text{dens} \times g \times h$$

Onde:

P: pressão manométrica estática dada em (Pascal)

dens: densidade do fluído (no caso a água) dada em (kg/m^3)

g: aceleração da gravidade dada em (m/s^2)

h: altura da coluna em (m)

A figura abaixo mostra uma instalação hidráulica que ajuda no entendimento do princípio do termossifão. A figura (a) mostra a pressão estática que é pressão fornecida pelas colunas A e B sobre o ponto C. Pode-se observar, de acordo com a fórmula, que as pressões A e B são iguais, pois possui a mesma densidade, a mesma altura e estão sujeitas a mesma aceleração da gravidade.

Ao fornecer energia à coluna A conforme a figura (b) e (c), a água em seu interior começa a aquecer e sua densidade diminui, consequentemente a pressão que a coluna exerce diminui como se pode verificar pela fórmula. Como a redução da densidade provoca a redução da pressão da coluna A e a coluna B continuou inalterada, haverá uma diferença de pressão. Como a coluna A ficou com uma pressão menor, será empurrada pela coluna B até que uma nova situação de equilíbrio se estabeleça.

Ao colocarmos um reservatório no sistema, como pode ser visto na figura (d), o circuito se fecha e cria um fluxo contínuo de água. A água circula do reservatório para a coluna B e em seguida para a coluna A onde é aquecida e empurrada novamente para o reservatório.

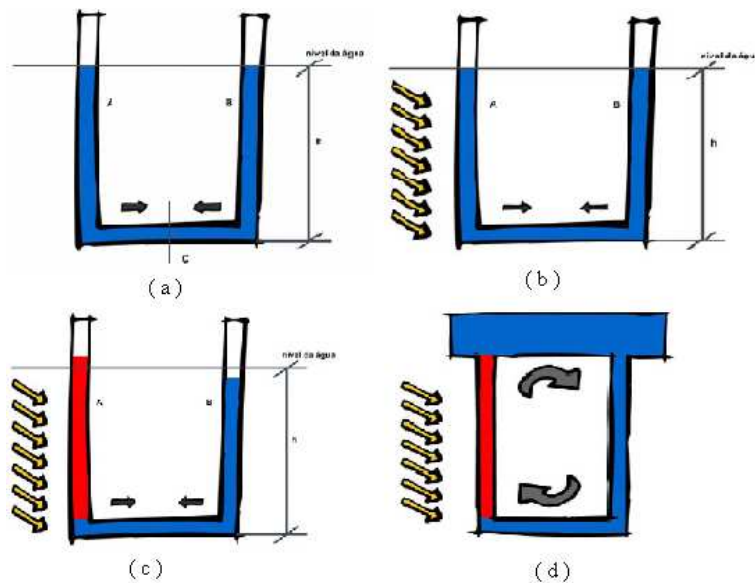


Figura: Princípio de funcionamento do termossifão

Fonte: DASOL, 2008

Tipos de sistemas que utilizam o princípio do termossifão

Os sistemas que utilizam o princípio do termossifão podem ser do tipo integrado, acoplado (ou compacto) ou convencional.

Termossifão integrado

No sistema integrado, o coletor e o reservatório formam uma única peça. Sua maior desvantagem é a perda de energia durante a noite, quando ocorre a troca de calor entre a água aquecida durante o dia e o ambiente que se encontra a uma temperatura mais baixa. Isso ocorre devido à falta de isolamento térmico.(FAIMAN *et al.*, 2001)

A figura abaixo mostra alguns modelos de sistemas de aquecimento integrados.

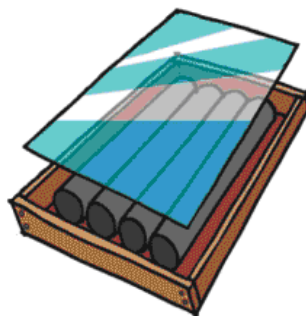


Figura: Aquecedor solar integrado

Fonte: Soletrol, 2010

Termossifão convencional

Com o objetivo de reduzir as perdas foi desenvolvido o sistema conhecido hoje como sistema convencional, onde o reservatório é separado dos coletores. A figura 3.15 mostra um sistema convencional típico.

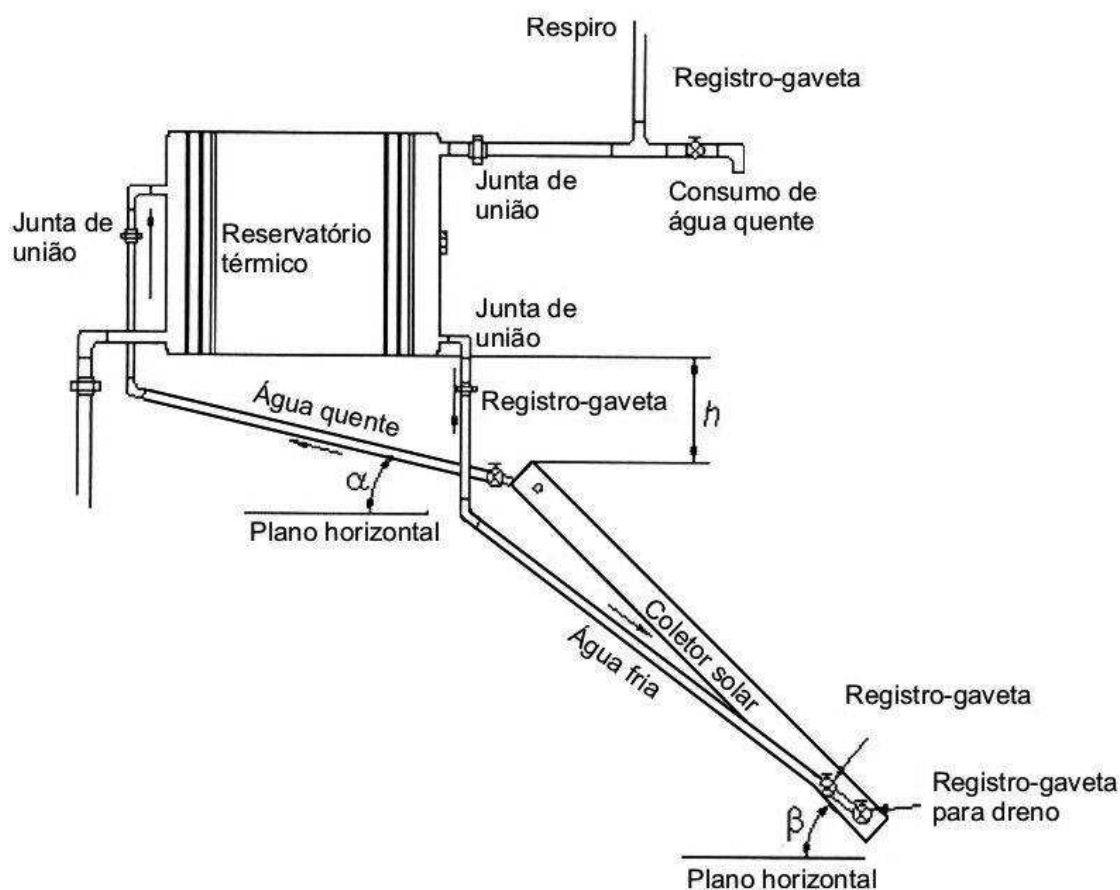


Figura: Sistema convencional de aquecimento de água

Fonte: ABNT – NBR 15569

Termossifão acoplado

Os sistemas acoplados ou compactos apresentam separação física entre o reservatório e o coletor, apesar de os componentes ficarem próximos um do outro. Sua principal vantagem é redução de erros e custos de instalação. Entretanto sua grande área de exposição e o pequeno desnível entre o coletor e o reservatório reduzem a sua eficiência térmica, causando grandes perdas no período da noite. É uma boa solução

para conjuntos habitacionais que demandam menos de 200 litros de água aquecida por dia.



Figura: Sistema acoplado

Fonte: TRANSEN, 2010

Princípios para garantir o funcionamento do termossifão

O sistema de circulação natural é o mais indicado para residências unifamiliares. Porém, cabe ressaltar algumas restrições que o sistema possui. Para instalações com demanda de água superior a 1.200 litros ou arranjos de coletores com área acima de 12 m² o sistema de circulação natural não é recomendado (RODRIGUES; MATAJS, 2010).

Além das restrições citadas anteriormente o sistema de circulação natural enfrenta mais três desafios para garantir o funcionamento do termossifão. São eles: as perdas de carga no sistema, os sifões e o acúmulo de ar na tubulação e as medidas para o termossifão. A seguir será detalhado cada um deles.

Perdas de carga no sistema

Como a força motriz do termossifão é pequena, não devem ser usados tubos de diâmetro muito pequeno e nem trechos de tubulações muito longos com excessos de curvas e conexões.

Tabela – Diâmetro e comprimento da tubulação em função do volume do reservatório

Volume Diário de Água Quente (litros)	Distância Topo/Fundo (metros)									
	0.1		0.2		0.3		0.4		0.5	
	Diâmetro da tubulação de interligação (mm)									
	22	28	22	28	22	28	22	28	22	28
	Comprimento Max. Equivalente na Interligação RT/COLETORES/RT (metros)									
200	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
300	24	25	25	25	25	25	25	25	25	25
400	17	25	20	25	23	25	25	25	25	25
500	13	25	15	25	18	25	20	25	22	25
600	10	25	12	25	14	25	16	25	18	25
700	NR	23	10	25	12	25	13	25	15	25
800	NR	19	NR	22	NR	25	11	25	12	25
1000	NR	11	NR	14	NR	17	NR	20	NR	23

Nota: NR = Não recomendado; RT = Reservatório Térmico

Fonte: RODRIGUES; MATAJS, 2010

A partir do volume do reservatório e do desnível entre o coletor e o reservatório, conhecido como distância do topo ao fundo, deve-se consultar a tabela acima a fim de determinar a o comprimento máximo equivalente da interligação entre o coletor solar e o reservatório térmico. Deve-se observar que o comprimento varia em função do diâmetro da tubulação e da distância do topo ao fundo, ou seja, do topo do coletor ao fundo do reservatório térmico.

Um detalhe importante é que para cada conexão existe um comprimento equivalente que deve ser somado ao comprimento da tubulação para que se possa ter o comprimento total de tubulação da instalação, ou comprimento máximo equivalente. Como exemplo tem-se que para um cotovelo de 90° o comprimento equivalente é de 1,2 metros, para uma curva de 45° tem-se 0,5 metros e para um tê 2,4 metros (RODRIGUES; MATAJS, 2010).

Os sifões e o acúmulo de ar na tubulação

O termossifão não pode ter pontos onde o ar ou o vapor de água fiquem presos. O sistema não tem força para empurrar as bolhas, que podem crescer e interromper a circulação na tubulação. A tubulação deve ser disposta de forma ascendente, principalmente no trecho entre a saída do coletor solar e o reservatório térmico.

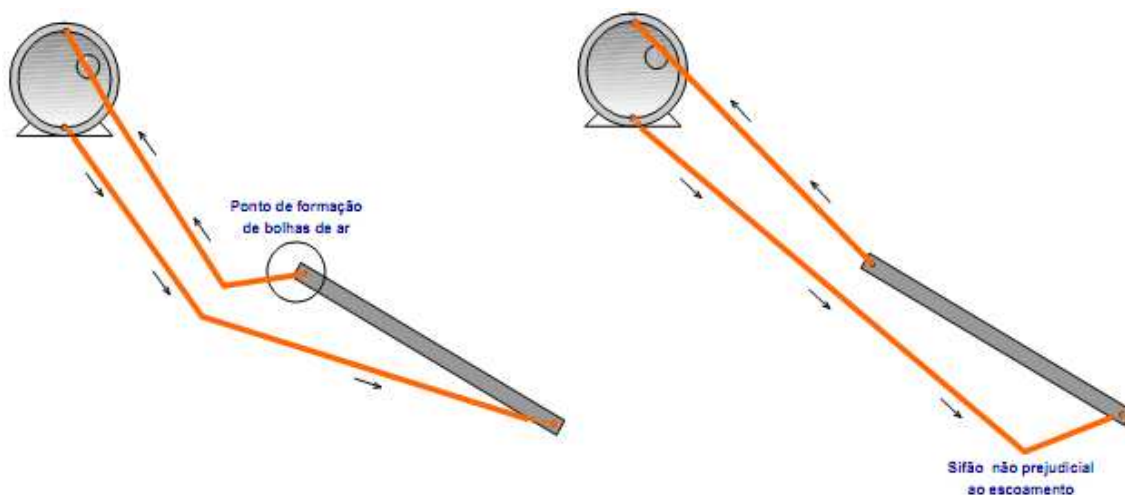


Figura: Formação de sifões na tubulação

Fonte: RODRIGUES; MATAJS, 2010

O primeiro mostra um ponto de formação de bolhas, caso existisse um respiro ou eliminador de ar no local o ar não ficaria retido, como não há para onde o ar sair, ocorre a formação de bolhas. O sifão nem sempre é prejudicial, se houver para onde o ar sair (sempre para cima) não haverá problema algum para o sistema. O segundo exemplo mostra um sifão que não causaria nenhum problema, qualquer bolha de ar voltaria para o reservatório térmico ou subiria pelos coletores para chegar ao reservatório e ser eliminado através do respiro.

As medidas para o sistema termossifão

Para o correto funcionamento do termossifão deve-se ficar atento a algumas medidas entre caixa de água fria, o reservatório térmico e os coletores. A figura abaixo mostra as medidas recomendadas para uma boa instalação.

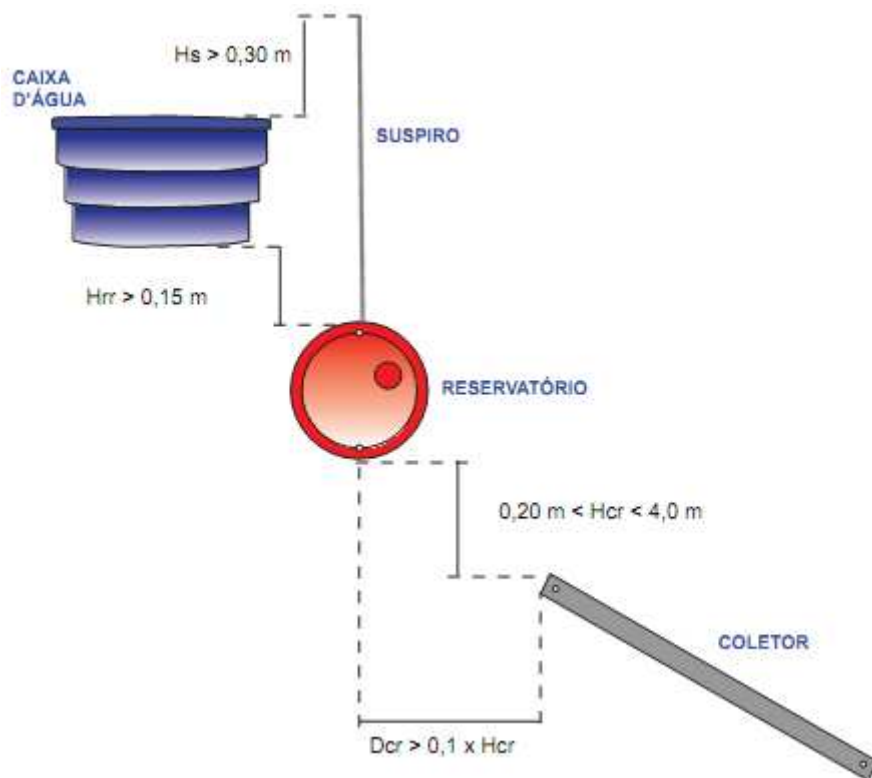


Figura: Medidas para o sistema termossifão

Fonte: RODRIGUES; MATAJS, 2010

Onde as legendas da figura significam:

H_s : Altura do suspiro em relação à tampa de água fria

H_{rr} : Altura entre o fundo da caixa de água fria e reservatório térmico

H_{cr} : Altura entre o fundo do reservatório térmico e parte superior dos coletores

D_{cr} : Distância entre a parte central do reservatório térmico e parte superior dos coletores

O sistema de aquecimento solar deve ser instalado o mais próximo possível do ponto de consumo para que se tenha um tempo de espera reduzido. O tempo de espera é período que a água gasta para sair do reservatório térmico e chegar até o ponto de consumo, considerando que toda a tubulação está com água fria.

Em sistema de circulação natural ou termossifão pode ocorrer o fluxo reverso durante a noite, ou seja, ocorre a inversão da circulação da água. Isso ocorre porque à noite a temperatura da água no interior dos coletores é menor que no restante do sistema

devido à troca de calor que ocorre com o ambiente. Nesse caso, a coluna de água dentro do coletor torna-se mais densa que a coluna de água que liga o reservatório ao coletor fazendo com que ocorra um fluxo no sentido oposto. O fluxo reverso pode ser minimizado e até eliminado seguindo as recomendações de distância entre o topo dos coletores solares e a base do reservatório térmico, é o H_{cr} mostrado na figura.

Sistema de Aquecimento Solar de Médio e Grande Porte

Os sistemas de aquecimento solar de médio e grande porte são instalações que exigem um grau significativo de exigência técnica, pois agregam muitas variáveis que vão além da correta instalação de coletores solares e reservatórios térmicos.

Princípio de Funcionamento do Sistema de Circulação forçada

O sistema de circulação forçada é usado em sistemas de médio e grande porte ou em casos em que não se consegue atender os parâmetros necessários ao funcionamento do sistema de termossifão. Além dos equipamentos necessários à instalação do sistema de termossifão, o aquecimento solar por circulação forçada possui moto-bomba, controlador diferencial de temperatura e o quadro de comando conforme mostrado na figura abaixo.

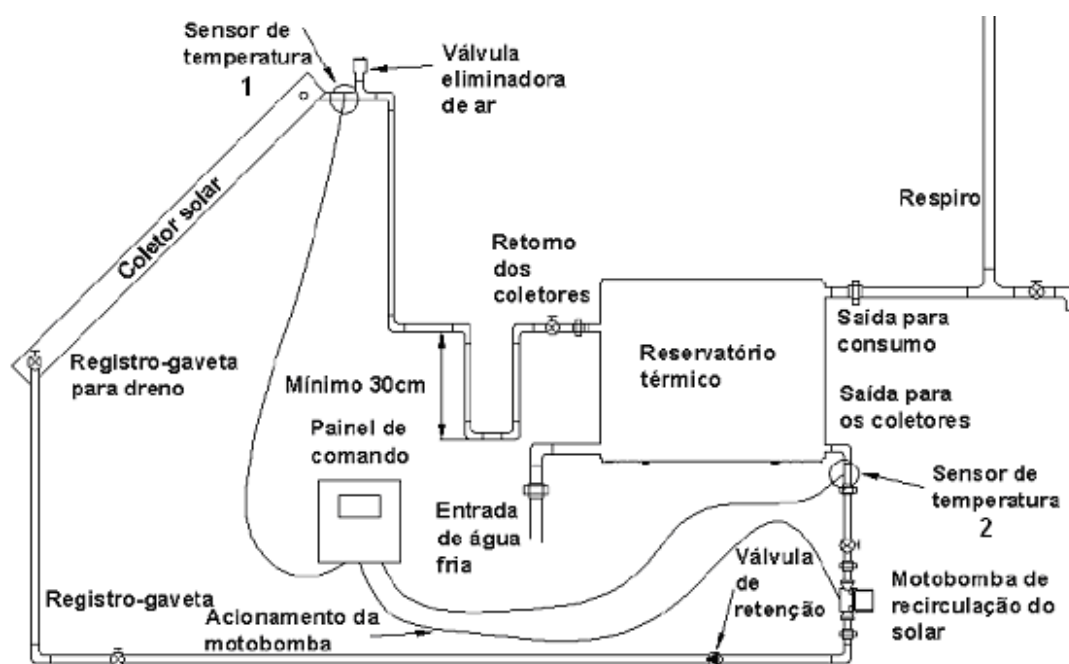


Figura: Sistema de aquecimento de água por circulação forçada

Fonte: ABNT – NBR 15569

O controlador diferencial de temperatura tem a função de comandar a moto-bomba, que é responsável pela circulação do fluido pelas tubulações do sistema. A moto-bomba é acionada quando o controlador diferencial registra uma diferença de temperatura, pré estabelecida, entre os sensores mostrados na figura acima, sendo desligada quando está essa diferença de temperatura atinge o valor estabelecido. O sensor 1 mede a temperatura na saída do reservatório e o sensor 2 na saída do coletor.

Como o sistema de circulação forçada não precisa obedecer às diferenças de altura necessária no sistema de termossifão, o sistema funciona basicamente pela ação da moto-bomba e do controlador diferencial de temperatura.

Um projeto de aquecimento solar de grande porte pode ser dividido em quatro etapas: reservatórios térmicos, coletores solares, hidráulica e comando e controle.

ANEXO B - PRINCIPAIS COMPONENTES ENCONTRADOS NO SISTEMA DE AQUECIMENTO SOLAR COM SISTEMA AUXILIAR ALIMENTADO POR GN

A tabela abaixo apresenta os principais componentes encontrados no sistema de aquecimento solar associado ao gás natural. Além disso, a tabela apresenta a função de cada componente do sistema.

Item	Componente	Função
1	Coletor Solar	Converter a energia radiante em energia térmica
2	Reservatório térmico	Acumular energia térmica na forma de água aquecida
3	Controlador diferencial de temperatura	Controlar o funcionamento da moto-bomba hidráulica do sistema de aquecimento (possui funções de segurança)
4	Sensor de temperatura	Medir a temperatura da água em pontos específicos
5	Reservatório de expansão	Proteger o sistema contra variações de pressão e expansão volumétrica durante o funcionamento do sistema
6	Válvula de alívio de pressão	Aliviar automaticamente a pressão do sistema caso a pressão máxima seja atingida
7	Válvula de retenção	Não permitir o movimento reverso da água
8	Válvula eliminadora de ar	Permitir a saída de ar do sistema
9	Válvula quebra vácuo	Aliviar pressões negativas formadas durante o funcionamento do sistema, permitindo a entrada de ar
10	Dreno	Possibilitar o escoamento ou drenagem da água do sistema
11	Moto-bomba	Promover a circulação forçada da água pelo sistema
12	Tubos e conexões	Interconectar os componentes e transportar água pelo sistema
13	Isolamento térmico	Minimizar perdas térmicas dos componentes e acessórios do sistema
14	Respiro	Equalizar pressões positivas e negativas do sistema e permitir a saída de ar e vapor
15	Aquecedor de passagem a gás natural	Suprir a demanda térmica complementar do sistema
16	Central de aquecimento a gás natural	Suprir a demanda térmica complementar do sistema
17	Sistema conjugado de aquecimento a gás natural	Suprir a demanda térmica complementar do sistema

Fonte: COMGÁS, 2009

ANEXO C - DIMENSIONAMENTO DO RESERVATÓRIO DO SISTEMA A GÁS

O sistema de aquecimento solar com reservatório térmico a gás separado do solar

A figura abaixo mostra a representação do sistema de aquecimento solar com sistema auxiliar a gás natural. Nota-se que o reservatório do sistema auxiliar a gás fica separado do reservatório do sistema solar.

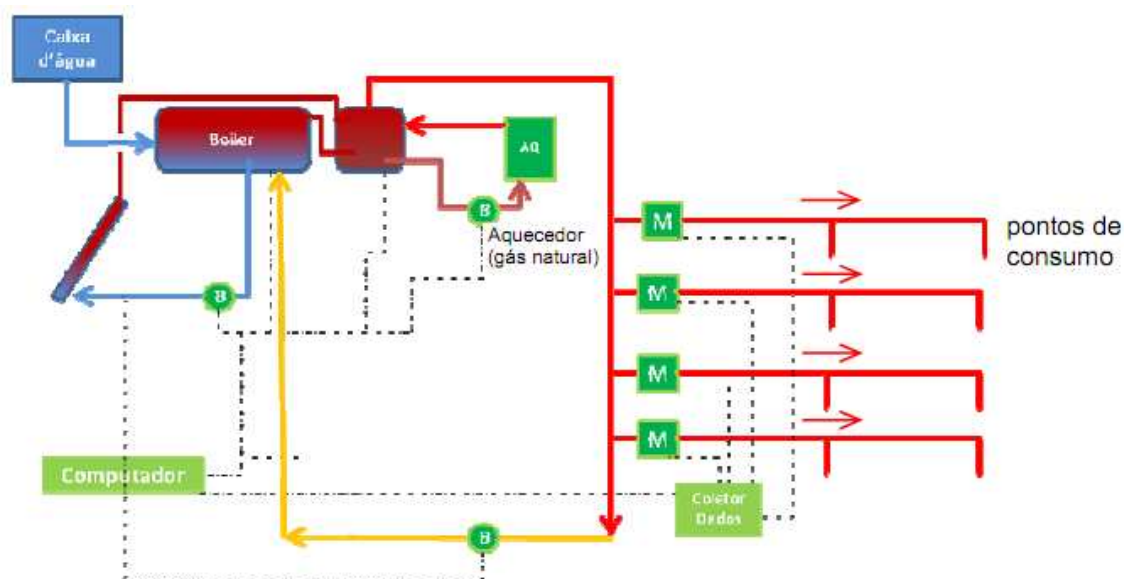


Figura – Sistema de aquecimento solar associado ao gás natural

Fonte: COMGÁS, 2009

Esta configuração adota reservatórios independentes, sendo um responsável pelo armazenamento da água quente vinda do coletor solar e o outro para o sistema de aquecimento central a gás natural usado como sistema auxiliar.

Etapas para o dimensionamento de o sistema auxiliar com reservatório térmico independente

Volume de água quente em uma hora do período de maior consumo

Para calcular o volume de água quente em uma hora no período de maior consumo é necessário utilizar um fator de simultaneidade. Este fator é utilizado em

trechos de rede de água que alimenta vários pontos de consumo e tem a função de otimizar a rede. Porém, segundo Chaguri (2009) não é fácil definir qual o fator de simultaneidade a ser adotado, pois, em cada subsistema do sistema predial de aquecimento de água existe uma metodologia de aplicação do fator de simultaneidade. De acordo com Chaguri (2009) um estudo de caso realizado para um condomínio de apartamentos na cidade de São Paulo durante um ano e dois meses adotou o fator de simultaneidade de 23%.

O volume de água quente consumido na hora de pico pode ser definido pela seguinte equação:

$$V_{\text{pico}} = V_{\text{diário}} \times FS$$

Onde:

V_{pico} é o volume de água quente máximo consumido em uma hora (litros);

$V_{\text{diário}}$ é o volume de água quente consumido diariamente (litros);

FS é o fator que representa a simultaneidade de uso em uma hora.

Volume mínimo de água quente armazenada

Uma vez calculado o volume de água consumido na hora de maior consumo, deve-se definir o volume a ser armazenado. Para isso pode-se utilizar a seguinte equação:

$$V_{\text{armaz. gás}} = V_{\text{pico}} \times F_{\text{armaz}}$$

Onde:

$V_{\text{armaz. gás}}$ é o volume de armazenamento do sistema a gás (litros);

V_{pico} é o volume de água quente máximo consumido em uma hora (litros);

F_{armaz} fator de minoração para determinar o volume mínimo de armazenamento.

A tabela abaixo apresenta o fator de armazenamento em função do volume de água quente consumida na hora de maior consumo.

Tabela – Fator de armazenamento

Volume na hora de maior consumo (l)	Fator de armazenamento (Farmaz)
0 a 1.500	1/3
1.501 a 6.000	1/4
6.001 a 12.000	1/5
12.001 a 20.000	1/6
acima de 20.001	1/7

Fonte: COMGÁS, 2009 apud Apostila de Treinamento – Engenheiro Jorge Chaguri

Cálculo da potência necessária para o aquecedor a gás natural

Para determinar a potência do aquecedor a gás natural é necessário definir o volume de água para recuperação do sistema na hora mais crítica. O volume de recuperação do sistema é calculado como a diferença entre o volume máximo de água quente consumido na hora mais crítica e o volume de armazenamento do sistema de aquecimento a gás, dado pela seguinte equação:

$$V_{\text{recup}} = V_{\text{pico}} - V_{\text{armaz. gás}}$$

Onde:

V_{recup} é o volume para recuperação do sistema na hora mais crítica (l/h);

V_{pico} é o volume de água quente máximo consumido em uma hora (l);

$V_{\text{armaz. gás}}$ é o volume de armazenamento do sistema de aquecimento a gás (l).

Desta forma o volume de recuperação do sistema na hora mais crítica é:

Determinado o volume de recuperação do sistema na hora mais crítica é necessário calcular a potência útil do aquecedor a gás. O cálculo pode ser feito através da seguinte equação:

$$Q = V_{\text{recup.}} \times c \times (T_{\text{armaz}} - T_{\text{água fria}})$$

Onde:

Q é a potência útil do aquecedor a gás (kcal/h);

$V_{\text{recup.}}$ é o volume para recuperação do sistema na hora mais crítica (l/h);

c é o calor específico da água (1 kcal/kg °C);

T_{armaz} é a temperatura de armazenamento da água (°C);

$T_{\text{água fria}}$ é a temperatura da água fria do local de instalação (°C).