



**Universidade do Estado do Rio de Janeiro**

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Engenharia

Adriano Gatto Lemos de Souza

**Desenvolvimento de software para projeto de sistemas centralizados de aquecimento solar de água**

Rio de Janeiro

2009

Adriano Gatto Lemos de Souza

**Desenvolvimento de software para projeto de sistemas centralizados de aquecimento solar de água**



Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Área de concentração: Fenômenos de Transporte.

Orientador: Prof. Dr. Manoel Antonio da Fonseca Costa Filho

Rio de Janeiro

2009

CATALOGAÇÃO NA FONTE  
UERJ/REDE SIRIUS/CTC/B

S729

Souza, Adriano Gatto Lemos de.

Desenvolvimento de software para projeto e sistemas centralizados de aquecimento solar de água / Adriano Gatto Lemos de Souza.– 2009.

129f.: il.

Orientador: Manoel Antonio da Fonseca Costa Filho.

Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Engenharia Mecânica - Teses. 2. Água – Aquecimento - Teses. 3. Energia – Fontes alternativas - Teses. I. Costa Filho, Manoel Antonio da Fonseca. II. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Faculdade de Engenharia. III. Título.

CDU 621.1:697.5

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta dissertação.

---

Assinatura

---

Data

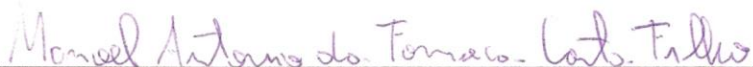
Adriano Gatto Lemos de Souza

**Desenvolvimento de software para projeto e sistemas centralizados de aquecimento solar de água**

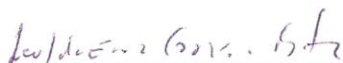
Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Fenômenos de Transporte.

Aprovado em 19 de março de 2009

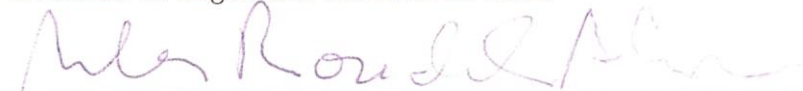
Banca Examinadora:




Prof. Dr. Manoel Antonio da Fonseca Costa Filho (Orientador)  
Faculdade de Engenharia Mecânica da UERJ



Prof. Dr. Leopoldo Eurico Gonçalves Bastos  
Faculdade de Engenharia Mecânica da UERJ



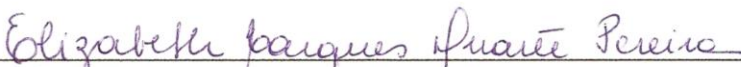
Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Mila Rosendal Avelino  
Faculdade de Engenharia da UERJ



Prof. Dr. Norberto Mangiavacchi  
Faculdade de Engenharia da UERJ



Prof. Dr. José da Rocha Miranda Pontes  
Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ



Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Elizabeth Marques Duarte Pereira  
Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

Rio de Janeiro

2009

## **AGRADECIMENTOS**

Ao professor Dr. Manoel Antonio da Fonseca Costa Filho, pela orientação, apoio e incentivo no durante o desenvolvimento desta dissertação.

À Financiadora de Estudos e Projetos - FINEP, de cujos recursos financeiros permitiu a realização desta dissertação.

Aos membros da banca Prof. Dr. Leopoldo Eurico Gonçalves Bastos, Prof<sup>a</sup>. Dra. Mila Rosendal Avelino, Prof. Dr. Norberto Mangiavacchi, Prof. Dr. José da Rocha Miranda Pontes e Prof<sup>a</sup>. Dra. Elizabeth Marques Duarte Pereira por terem aceitado a participar da avaliação deste trabalho.

Aos professores, funcionários e colegas do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade do Estado do Rio de Janeiro, sempre prestativos, que em muito colaboraram como apoio nos momentos das mais diversas dificuldades.

Aos meus pais, Carmen e Josélio que por natureza e amor, se doaram inteiros e renunciaram aos seus sonhos, para que, muitas vezes, pudesse realizar os meus.

À minha esposa Ingrid pelo amor e compreensão ao longo deste belo e difícil processo de crescimento pessoal.

À Deus pelo sopro da vida, pela luz no meu caminho, pela certeza da minha vitória.

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho ao meu filho Gabriel por representar a fonte das minhas inspirações, a força na busca dos meus ideais e o caminho para minhas futuras gerações de errantes que sonham com as grandes conquistas.

Quem deve ser levado em conta não é aquele que censura, que denuncia os tropeços dos fortes ou as limitações dos beneméritos, o valor pertence ao homem que está de fato na arena, cujo rosto está desfigurado pela poeira, pelo suor e pelo sangue, que luta valentemente, que erra, falha e torna a falhar, que conhece os grandes entusiasmos, as grandes dedicações, que se empenha numa causa justa, que quando vence, conhece finalmente a vitória das grandes realizações e, na pior das hipóteses, se fracassa será enquanto se aventura magnificamente de modo que seu lugar nunca será junto àquelas almas timoratas que não conhecem a vitória nem a derrota.

*Theodoro Roosevelt*

## RESUMO

SOUZA, Adriano Gatto Lemos de. *Desenvolvimento de software para projeto e sistemas centralizados de aquecimento solar de água*. 2009. 129f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

O presente trabalho consiste no desenvolvimento de um software para projeto otimizado de sistemas de aquecimento de água mediante a utilização da energia solar. Trata-se de uma ferramenta computacional destinada a auxiliar as empresas de engenharia em projetos de sistemas de aquecimento solar (SAS) utilizando dados de desempenho de equipamentos comerciais provenientes do Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE) e dados de radiação solar provenientes do Atlas Solarimétrico Brasileiro. No desenvolvimento do software foram utilizadas metodologias e relações práticas buscando a otimização técnica e econômica da instalação. O software disponibiliza aos projetistas a possibilidade de simular instalações com até quatro coletores em série buscando um melhor balanço hidráulico e, conseqüentemente, um melhor desempenho da instalação. A metodologia de projeto utilizada foi o F-Chart, acrescido da análise econômica com informações relevantes sobre a rentabilidade e o risco do investimento. O software foi desenvolvido inicialmente em uma planilha do EXCEL para posteriormente ser implementado em C++. A validação do software foi feita através de estudos comparativos com um exemplo do livro de Duffie e Beckman (1991) e um projeto realizado na UFRGS onde foram usados os programas Termodim e Radiasol, ambos desenvolvidos pela mesma Universidade. O software apresentou um pequeno desvio em relação às simulações anteriores que devem merecer investigações futuras no sentido de identificar as suas causas. Assim como o F-Chart, o software desenvolvido nesta dissertação denominado Helios-Chart deverá ser utilizado para sistemas diretos ativos de instalações de médio e grande porte.

Palavras-chave: Energia Solar; Análise Econômica; Aquecimento Solar de Água; Coletor Solar.



## ABSTRACT

SOUZA, Adriano Gatto Lemos de. *Software development for projects and centralized systems of solar water heating*. 2009. 129f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

This current paper refers to the development of a piece of software for optimized project of water heating systems by means of the utilization of solar energy. It is a computer tool created to help engineering companies with solar heating systems projects (SAS), using commercial equipment performance data from the Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE) - Brazilian Labeling Program - and solar radiation data from the Atlas Solarimétrico Brasileiro – Brazilian Solar Energy Atlas. Throughout the development of the software some methodologies have been used as well as practical relationships aiming at the optimization of the installation with the binomial economy-reliability. The software makes available to designers the possibility of simulating installations with up to four collectors in series, aiming at better hydraulic balance and, consequently, better installation performance. The project methodology used was F-Chart, followed by an economic analysis with relevant information about profitability and investment risk. The software was initially developed on an EXCEL plan, being then implemented in C++. Validation of the software has been performed by means of comparative studies of an example from Duffie and Beckman's book (1991) and a project carried out at UFRGS (Federal University of Rio Grande do Sul), in which the programs Termodim e Radasol were used, both developed by that university. The software has presented a small deviation in relation to previous simulations, which needs to be investigated in the future in order to identify its causes. As well as F-Chart, the software developed in this dissertation, called Helios-Chart, will have to be used for active direct systems of medium to large-sized installations.

Keywords: Solar Energy; Economic Analysis; Solar Water Heating Solar Collector.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Potencial energético brasileiro. Fonte: ( <a href="http://catedradogas.iee.usp.br/palestras/palestra_carlosfaria.pdf">http://catedradogas.iee.usp.br/palestras/palestra_carlosfaria.pdf</a> ) .....	10
Figura 2 – Seção típica de um coletor de superfície plana. Fonte: (Arruda, 2004). .....	13
Figura 3 - $K_{\tau\alpha}$ para três tipos de coletores estacionários. Fonte: (Dijkers, 1990). .....	16
Figura 4 – Esquema de instalação de um sistema passivo direto com fonte de energia auxiliar interna ao reservatório de armazenamento de água quente. Fonte: (Lima, 2003). .....	25
Figura 5 – Esquema de instalação de um sistema direto passivo com fonte de energia auxiliar externa ao reservatório de armazenamento de água quente. Fonte: (Lima, 2003). .....	25
Figura 6 – Esquema simplificado de um sistema passivo indireto. Fonte: (Lima, 2003). .....	26
Figura 7 – Esquema simplificado de um sistema ativo direto. Fonte: (Lima, 2003). .....	27
Figura 8 – Esquema simplificado de um sistema ativo indireto com trocador de calor localizado externamente ao reservatório térmico. Fonte: (Lima, 2003). .....	27
Figura 9 – Principais regiões do sol. Fonte: (Oliveira, 1997). .....	30
Figura 10 – Granulação fotosférica. Fonte: (Oliveira, 1997). .....	30
Figura 11 – Eclipse Solar de 1999 na Romênia, com uma imagem ultravioleta tirada pelo satélite SOHO/NASA-ESA. Fonte: (URL: <a href="http://www.williams.edu/Astronomy/eclipse/eclipse1999/1999total/index.html">http://www.williams.edu/Astronomy/eclipse/eclipse1999/1999total/index.html</a> ).....	31
Figura 12 – Ciclos de variação da constante solar.....	32
Figura 13 – Heliógrafo de Campbell- Stokes. Fonte: (Laboratorio de Evaluación Solar, 2006). .....	35
Figura 14 – Piroheliômetro montado em base telescópica. Fonte: (Oliveira, 1997). .....	36
Figura 15 – Piranômetro com termopilha. Fonte: (CRESESB, 2003). .....	37
Figura 16 – Piranômetro com elemento bimetálico (Robitzch-Fuess), também conhecido como actinógrafo. Fonte: (CRESESB, 2003). .....	38
Figura 17 – Piranômetro fotovoltaico. Fonte: (Oliveira, 1997). .....	39
Figura 18 – Coordenadas geográficas. Fonte: ( <a href="http://br.geocities.com/fbdiniz/disc/latitude/latitude.html">http://br.geocities.com/fbdiniz/disc/latitude/latitude.html</a> ).....	41
Figuras 19 – Declinação. Fonte: ( <a href="http://www.if.ufrgs.br/oei/santiago/fis2005/textos/sistcrds.htm">http://www.if.ufrgs.br/oei/santiago/fis2005/textos/sistcrds.htm</a> ).....	41
Figura 20 – Ângulos solares derivados. Fonte: (ARRUDA, 2004). .....	43

Figura 21 – Esquema de incidência de radiação em uma superfície. Fonte: (adaptada de Duffie e Beckman, 1991).	49
Figura 22 – Radiação solar global diária – média anual típica (MJ/m <sup>2</sup> .dia). Fonte: (Tiba, 2000)	52
Figura 23 – Insolação média anual diária (em horas) no território brasileiro. Fonte: (Tiba, 2000).	52
Figura 24 – Representação das estações do ano e do movimento da Terra em torno do sol. Fonte: (adaptado de Magnoli et al. , 1998 apud ANEEL, 2005).	53
Figura 25 – Balanço de Energia no Reservatório.	59
Figura 26 – Associação de coletores solares: a) em paralelo; b) em série. Fonte: (Arruda, 2004)	62
Figura 27 – Resumo da história do método F-Chart.	67
Figura 28 – Seção transversal de uma tubulação. Fonte: (Arruda, 2004).	76
Figura 29 – Analogia entre a resistência térmica e a elétrica. Fonte: (Arruda, 2004).	76
Figura 30 – Rotina de cálculo da radiação mediante da localidade e refletância do entorno.	85
Figura 31 – Rotina de cálculo do número de reservatórios em função do número de usuários e características de consumo.	86
Figura 32 – Rotina de cálculo do fluxo de calor através das tubulações.	87
Figura 33 – Rotina de cálculo do fluxo de calor através das tubulações – continuação.	87
Figura 34 – Rotina de cálculo da demanda de água quente e dos parâmetros para N coletores conectados em série.	89
Figura 35 – Rotina de cálculo da fração solar da instalação.	90
Figura 36 – Rotina de cálculo de índices para a análise econômica.	91
Figura 37 – Tela do Menu Principal do software.	92
Figura 38 – Tela de cálculo da radiação solar do software.	93
Figura 39 – Tela de dimensionamento do reservatório e número de coletores.	93
Figura 40 – Tela de resultados do dimensionamento de instalações solares térmicas.	94
Figura 41 – Gráfico da fração solar.	98
Figura 42 – Gráfico da fração solar.	99
Figura 43 – Comparação gráfica dos resultados gerados pelo Helios-Chart e pelo Radasol.	100
Figura 44 – Comparação gráfica dos resultados gerados pelo Helios-Chart com Duffie, Beckman e Klein (1977).	101

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química principal do sol.....	29
Fonte: (URL://br.geocities.com/kawakami_enc/carater.htm)	
Tabela 2 – Dia médio para cada mês do ano. Fonte: (Klein, 1977) .....	44
Tabela 3 – Refletância de Materiais. Fonte: (Siscos, 1998). .....	48
Tabela 4 - Consumo Diário de Água Quente por Dia. Fonte: (ABNT – NBR 7198) .....	53
Tabela 5 - Consumo médio de água aquecida em ambientes residenciais. Fonte: (IBAM/PROCEL – Manual de Prédios eficientes em energia elétrica).....	54
Tabela 6 – Vazões unitárias dos pontos de utilização. Fonte: (NBR 5626) .....	54
Tabela 7 – Faixa de parâmetros usados no desenvolvimento da Carta-F. Fonte: (Duffie e Beckman) .....	68
Tabela 8 – Adimensionais e variáveis empregadas no estudo de transferência de calor. Fonte: (ARRUDA, 2004). .....	71
Tabela 9 – Coeficientes da Equação 51. Fonte: (ARRUDA, 2004). .....	72
Tabela 10 – Valores da condutividade térmica de alguns materiais. Fonte: (ARRUDA, 2004). .....	76
Tabela 11 – Parâmetros dos coletores usados em Duffie e Beckman (1991).....	96
Tabela 12 – Cálculo da fração solar pelo Helios-Chart.....	96
Tabela 13 – Dados do exemplo de Duffie e Beckman (1991).....	97
Tabela 14 - Dados do trabalho de Kehl (2004). .....	97
Tabela 15 – Valores da fração solar. ....	98
Tabela 16 – Valores da fração solar. ....	99
Tabela 17 - Comparação de resultados gerados pelo Helios-Chart e gerados pelo Radasol. ....	100
Tabela 18 - Comparação de resultados gerados pelo Helios-Chart com Duffie, Beckman e Klein (1977). ....	101

## LISTA DE SÍMBOLOS

- $A$ : área da seção transversal da tubulação ( $m^2$ );
- $A_c$ : área coletora solar total ( $m^2$ );
- $A_{cu}$ : área unitária do coletor solar [ $m^2$ ];
- $A_S$ : área da abertura a qual a placa absorvedora recebe irradiação do coletor [ $m^2$ ];
- $\partial A$ : Elemento de área ( $m^2$ );
- $A_r$ : ano de recuperação do capital;
- $A_s$ : ano em que o valor parcial recuperado é maior que o investimento na instalação do SAS analisado;
- $c_p$ : calor específico do fluido a pressão constante [J/kg.K];
- $d$ : dia do ano, sendo igual à unidade, em 1º de janeiro;
- $d_i$ : Diâmetro interno da tubulação (m);
- $E_{AF}$ : energia da água fria (entalpia) que reabastece o reservatório (kJ);
- $EU_{SR}$ : energia solar captada no coletor que chega até o reservatório (kJ);
- $EU_E$ : energia útil da fonte auxiliar de calor (kJ);
- $E_{AQ}$ : energia da água quente que sai para o consumo (kJ);
- $E_{FR}$ : calor cedido ao ambiente (kJ);
- $E_{RC}$ : energia perdida na circulação de água quando o coletor está a uma temperatura abaixo da temperatura do reservatório (kJ);
- $e$ : espessura do material (m);
- $f$ : fração solar mensal;
- $F_R$ : fator de remoção de calor do coletor;
- $F'$ : fator de eficiência térmica do coletor;
- $F''$ : fator de fluxo;
- $F_R U_L$ : produto do fator de remoção de calor pelo coeficiente global de perdas térmicas dos coletores solares, correspondentes à inclinação da curva de eficiência térmica instantânea [ $W/m^2C$ ];
- $F_{RI} U_{LI}$ : produto do fator de remoção de calor pelo coeficiente global de perdas térmicas de um coletor solar [ $W/m^2C$ ];
- $F_R(\tau_c \alpha_p)\theta$ : produto do fator de remoção, transmitância do vidro e absorvância da tinta dos

coletores, para o ângulo médio de incidência da radiação direta;

$F_{RI}(\tau\alpha)_1$  : produto do fator de remoção, transmitância do vidro e absorvância da tinta de um coletor;

$FL$  : fluxo de caixa líquido (R\$);

$G_T$ : energia solar incidente no plano coletor [ $W/m^2$ ];

$g$  : aceleração da gravidade ( $m/s^2$ );

$Gr$ : número de Grashof;

$\bar{H}_o$  : radiação solar média mensal diária extraterrestre [ $J/m^2$ ];

$\bar{H}$  : radiação solar média global incidente no plano horizontal [ $J/m^2$ ];

$\bar{H}_d$  : radiação difusa média diária incidente no plano horizontal [ $J/m^2$ ];

$\bar{H}_T$  Radiação solar global incidente sobre uma superfície inclinada em média diária mensal [ $J/m^2$ ];

$h_c$  : Coeficiente de transmissão de calor convectivo ( $W/^\circ C.m^2$ );

$i$ : ano ( $i=0, 1, \dots, N$ );

$j$  : taxa anual de juros (%);

$K_{\tau\alpha}$  : fator de correção do ângulo de incidência da radiação direta;

$\bar{K}_T$  : índice de claridade médio mensal;

$k$ : coeficiente de condutividade térmica do material ( $W/m.^{\circ} C$ );

$L_{mês}$  – Energia necessária para aquecer o volume de água ao final do mês [ $kWh/mês$ ];

$L$  : dimensão característica ( $m$ );

$\dot{m}$  : vazão mássica [ $kg/s$ ];

$m_{AF}$  : massa de água fria que entra no reservatório no intervalo  $\Delta t$  (kg);

$m_R$  : massa de água no interior do reservatório (kg);

$m_{AQ}$  : massa de água quente que sai para o consumo no intervalo  $\Delta t$  (kg);

$m_c$  : massa de água que circula na instalação quando o coletor está a uma temperatura abaixo da temperatura do reservatório (kg);

$Mr$  : mês de recuperação do capital;

$n$ : número de dias do mês;

$n_i$ : tempo-limite;

$N$ : número de coletores solares conectados em série;

$N_{ut}$ : número de utilizações diárias;

$N_{us}$ : número de usuários;

$N_{RES}$ : número de reservatórios;

$Nu$ : número de Nusselt;

$P_{AQ}$ : potência do aquecedor a gás natural (fonte auxiliar) (W);

$Pr$ : número de Prandtl;

$Ped$ : número de Peclet;

$PPB$ : período de payback descontado;

$\dot{Q}_u$ : taxa de energia absorvida pela água [W];

$Q_{ut}$ : vazão no ponto de utilização (l/s);

$Q_{total}$ : energia necessária para o aquecimento da água do sistema [J];

$Q_{aux}$ : energia fornecida por um sistema auxiliar de energia [J];

$R_B$ : Razão entre a radiação direta diária média em uma superfície inclinada e de uma superfície horizontal, no mês considerado;

$Re$ : Número de Reynolds;

$R_T$ : Resistência térmica ( $^{\circ}C/W$ );

$R_{Tot}$ : Resistência térmica total nas paredes para o comprimento  $L$  ( $^{\circ}C/W$ );

$T_{pm}$ : temperatura média do absorvedor [ $^{\circ}C$ ];

$T_{ar}$ : temperatura média do ar [ $^{\circ}C$ ];

$T_{amb}$ : temperatura ambiente média para o mês ( $^{\circ}C$ );

$T_s$ : Temperatura na superfície da tubulação ( $^{\circ}C$ );

$T_e$ : temperatura do fluido na entrada do coletor [ $^{\circ}C$ ];

$T_s$ : temperatura do fluido na saída do coletor [ $^{\circ}C$ ];

$T_{consumo}$ : temperatura da água quente que sai do reservatório para consumo [ $^{\circ}C$ ];

$T_{AF}$ : temperatura da água fria que abastece os reservatórios [ $^{\circ}C$ ];

$TR_e$ : temperatura da água na entrada do reservatório ( $^{\circ}C$ );

$TR_s$ : temperatura da água na saída do reservatório ( $^{\circ}C$ );

$T_{AQ}$ : temperatura da água quente sai para o consumo ( $^{\circ}C$ );

$TR$ : temperatura média no interior do reservatório ( $^{\circ}C$ );

$T_{REF}$ : temperatura de referência, considerada constante, e igual a 100°C;  
 $t$  : índice correspondente à propriedades do tubo;  
 $TIR$ : taxa interna de retorno (%);  
 $Termoi$  : equações baseadas nos polinômios de Lagrange ( $i = 1, 2, 3, 4$ );  
 $TRC$ : Tempo de recuperação do capital;  
 $t_{ut}$ : tempo de uso do ponto (s);  
 $t_i$ : período de tempo;  
 $UL$ : coeficiente global de transferência de calor [ $W/m^2.K$ ];  
 $U_R$  : coeficiente global de transferência de calor do reservatório ( $W/°C$ );  
 $u$ : taxa de ocupação (%);  
 $V_{total/ponto}$ : volume total dimensionado por ponto (l);  
 $V_{dia}$  : volume diário de água quente (l);  
 $V_{RES}$  : volume do reservatório de água quente (l);  
 $V_{ar}$ : velocidade do ar ( $m/s$ );  
 $V_{ag}$  : Velocidade da água ( $m/s$ );  
 $V_f$ : benefícios gerados com a instalação do SAS (R\$);  
 $VPL$ : valor presente líquido (R\$);  
 $V_o$  : valor do investimento inicial para a instalação do SAS (R\$);  
 $V_p$  : valor anual parcial recuperado (R\$);  
 $V_r$  : valor mensal parcial recuperado (R\$);  
 $w$ : índice correspondente à propriedades da água;  
 $x$  : Distância da seção até a fonte de calor;  
 $x_0$ : Ponto onde a temperatura é conhecida;  
 $X_i$  : taxa de juros considerada para o termo  $i$ ;  
 $Y_i$  : VPL considerado para o termo  $i$ .



*Letras gregas:*

$\alpha$ : absorvância do coletor solar;

$\alpha_d$ : difusividade térmica ( $m^2/s$ );

$\alpha_s$ : ângulo de altitude solar [ $^\circ$ ];

$\beta_r$ : coeficiente de expansão térmica volumétrico do ar [ $K^{-1}$ ];

$\beta$ : inclinação do coletor [ $^\circ$ ];

$\beta_k$ : coeficiente de expansão volumétrica ( $1/s$ );

$\delta$ : declinação do sol [ $^\circ$ ];

$\gamma$ : ângulo azimutal da superfície [ $^\circ$ ];

$\lambda$ : Longitude geográfica [ $^\circ$ ];

$\eta_{AQ}$ : rendimento do aquecedor a gás natural;

$\tau$ : transmitância do coletor solar;

$\phi$ : Latitude geográfica [ $^\circ$ ];

$\eta_c$ : eficiência do coletor solar [%];

$\eta_c$ : eficiência do coletor solar [%];

$\theta_z$ : ângulo zenital [ $^\circ$ ];

$\theta$ : ângulo de incidência da radiação direta [ $^\circ$ ];

$\mu$ : viscosidade absoluta ( $N.s/m^2$ );

$\nu$ : viscosidade cinemática ( $m^2/s$ );

$\rho_{ag}$ : massa específica da água, considerada igual a 1000 [ $kg/m^3$ ];

$\rho_{ar}$ : massa específica do ar [ $kg/m^3$ ];

$\rho_g$ : reflectância (albedo) da vizinhança nas proximidades do coletor solar;

$\omega_s$ : ângulo horário do pôr-do-sol local, em graus [ $^\circ$ ];

$\omega'_s$ : ângulo horário do pôr-do-sol no dia médio do mês ( $^\circ$ );

$\omega$ : ângulo horário [ $^\circ$ ];

$\omega$ : ângulo horário [ $^\circ$ ];

$Z$ : Altitude ( m ).

$\Delta T_R$ : variação da temperatura média do reservatório no intervalo de tempo  $\Delta t$  ( $^{\circ}\text{C}$ );

$\Delta E_R$ : variação da energia total no reservatório (kJ).

## SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO</b> .....	1
<b>Motivação</b> .....	1
<b>Objetivos</b> .....	5
<b>Metodologia</b> .....	6
<b>A Energia no Brasil</b> .....	7
<b>1. REVISÃO DE BIBLIOGRAFIA</b> .....	11
<b>1.1 Sistema de aquecimento solar de água em habitações</b> .....	11
1.1.1 Coletor solar .....	12
1.1.1.1 <i>Equação de Hottel-Whilier</i> .....	13
1.1.1.2 <i>Eficiência térmica do coletor</i> .....	14
1.1.1.3 <i>Fator de eficiência térmica do coletor (<math>F'</math>)</i> .....	16
1.1.1.4 <i>Fator de remoção de calor do coletor (<math>FR</math>)</i> .....	17
1.1.1.5 <i>Fator de fluxo (<math>F''</math>)</i> .....	17
1.1.1.6 <i>Energia útil no coletor (<math>Q_u</math>)</i> .....	18
1.1.1.7 <i>Correção para a curva de eficiência</i> .....	18
1.1.2 Reservatório de água quente .....	19
1.1.3 Fonte auxiliar de energia .....	20
1.1.4 Tubulações e isolamento térmico .....	21
1.1.5 Tipos de sistemas .....	23
1.1.6 Manual de Instalações Térmicas Solares .....	28
<b>1.2 Radiação Solar</b> .....	28
<b>1.3 Solarimetria</b> .....	35
<b>1.4 Radiação Solar Incidente</b> .....	40
1.4.1 Coordenadas Geográficas .....	40
1.4.2 Declinação $\square \delta$ .....	41
1.4.3 Ângulos Solares Derivados .....	42

1.4.4 Estimativa da Radiação solar.....	44
1.5 Atlas Solarimétrico Brasileiro .....	49
<b>2. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>53</b>
2.1 <b>Demanda de Água Quente</b> .....	<b>53</b>
2.1.1 Cálculo do volume total dimensionado por ponto $V_{total/ponto}$ .....	53
2.1.2 Cálculo da demanda mensal de energia $L_{mês}$ .....	56
2.2 <b>Reservatórios Térmicos</b> .....	<b>56</b>
2.3 <b>Arranjo de Coletores Solares</b> .....	<b>61</b>
2.3.1 Arranjos de coletores solares em série .....	62
2.4 <b>Método F-Chart</b> .....	<b>63</b>
2.5 <b>Perdas térmicas nos reservatórios e tubulações</b> .....	<b>70</b>
2.6 <b>Análise Econômica</b> .....	<b>78</b>
2.6.1 Valor Presente Líquido (VPL).....	78
2.6.2 TIR (Taxa Interna de Retorno) .....	79
2.6.3 Tempo de Recuperação do Capital (TRC) .....	81
2.6.4 Período de Payback Descontado (PPB).....	82
2.7 <b>Software Helios-Chart</b> .....	<b>83</b>
2.8 <b>Interface Gráfica do Software Helios-Chart:</b> .....	<b>92</b>
<b>3. RESULTADOS</b> .....	<b>95</b>
3.1 <b>Fração solar</b> .....	<b>95</b>
3.1.1 Comparação com Duffie & Beckman (1991).....	95
3.1.2 Comparação com Kehl (2004).....	97
3.2 <b>Radiação solar</b> .....	<b>100</b>
<b>4. CONCLUSÕES</b> .....	<b>103</b>
<b>5. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>104</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>105</b>

## INTRODUÇÃO

### Motivação

Historicamente, o sistema energético brasileiro, pela forma como foi constituído, vem, de longo tempo, enfrentando dificuldades de viabilização por falta de recursos econômicos. O financiamento de obras para o aumento de sua capacidade de geração de energia demanda vultosos recursos para financiar estudos e arrojadas obras. Além disso, os recursos energéticos primários, antes amplamente disponíveis, acham-se sob ruidosa preocupação política por motivos técnicos de longo prazo, preocupantes, razão por que podemos considerá-los em linha de escassez. Em face disto, programas de economia e uso racional de energia vêm surgindo, crescentemente, para que os estados brasileiros busquem aumento da disponibilidade energética, sem a necessidade de realizar grandes investimentos de capital.

Neste contexto, entre as opções por energéticos não convencionais para aquecimento de água, a energia solar mediante utilização de coletores, possui lugar de destaque. Suas características específicas são: a possibilidade de aquecimento de água em localidades onde a energia elétrica ainda não está disponível, o caráter modular, a facilidade de instalação e de manutenção e sua característica renovável e não poluidora. Esse conjunto de elementos favoráveis unido ao encarecimento da tarifa de energia elétrica, induzem a uma ampliação do número de aplicações dos Sistemas de Aquecimento Solar (SAS), economicamente viáveis. Com isto, o mercado para esta tecnologia tende a aumentar, possibilitando, através da economia de escala, diminuição em seus custos, o que viabilizará seu uso. E para os lugares atendidos pela energia elétrica, um bom argumento para que se programe sua economia de uso.

O uso da água quente tem um caráter modular e descentralizado, permitindo a instalação de pequenas unidades de aquecimento próximas ao consumo. É um dado muito favorável, pois diminui as perdas no transporte da energia e possibilita a instalação de sistemas dimensionados para as atuais e reais necessidades locais. E, caso a demanda de água quente aumente, é possível incrementar, paulatinamente, a capacidade de aquecimento dos sistemas. Desta forma, diminuem-se os investimentos iniciais na instalação.

Existem certas localidades que, por dificuldades técnicas ou por inviabilidade econômica, não serão atendidas a curto ou médio prazo, através do sistema energético convencional. Isoladas, estas regiões são privadas de uma série de benefícios que o acesso à

energia pode trazer, entre eles o aquecimento de água. Nestes casos, soluções alternativas são relevantes, como a focalizada neste trabalho.

Considera-se, então, que além de economicamente competitivo, o SAS poderá atingir resultados enormemente satisfatórios se projetados sob a ótica otimizada de um software.

Fatores que têm contribuído para o crescimento do mercado são: a divulgação dos benefícios do uso da energia solar; a isenção de impostos que o setor obteve; financiamentos, como o da Caixa Econômica Federal, aos interessados em implantar o sistema; e a necessidade de reduzir os gastos com energia elétrica durante o racionamento em 2001 (ABRAVA, 2002). Também são crescentes as aplicações em conjuntos habitacionais e casas populares, como nos projetos Ilha do Mel, Projeto Cingapura, Projeto Sapucaias em Contagem, Conjuntos Habitacionais SIR e Maria Eugênia (COHAB) em Governador Valadares (ABRAVA, 2002). Outro elemento propulsor dessa tecnologia é a Lei nº 10.295, de 17 de outubro de 2001, que dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia e a promoção da eficiência nas edificações construídas no País.

Por ser uma fonte de energia renovável, que não agride o meio ambiente, a energia solar é freqüentemente citada em discussões sobre futuras alternativas energéticas. A pauta política do sistema de gestão energética está carregada desse conteúdo. E as pautas técnicas também. Todavia não há ainda um plano de ação capaz de definir e apontar diretrizes de viabilização do aproveitamento da energia solar. Referimo-nos a financiamento para aquisição de meios: levantamento de dados sobre as necessidades existentes, estratégias de aplicação de recursos, orientação de usuários mediante formação de consciência crítica sobre a aquisição e o uso, custos da aquisição da energia solar em locais em que a energia convencional ainda não chegou, capacitação de empresas instaladoras e fiscalização dos procedimentos. É importante, pois, conhecer cada detalhe relacionado com a utilização desta tecnologia e torná-lo assunto das pautas gerenciais dos usos alternativos de energias potenciais não poluentes.

Incentivos vindos de órgãos financiadores de vários países muito têm contribuído para a difusão e popularização desta tecnologia de uso da energia solar. O objetivo tem sido alcançado. Instalações experimentais espalham-se por muitas regiões do planeta. Isto possibilitou que instaladores e pesquisadores adquirissem experiências, enquanto estudavam soluções para problemas relativos ao uso da energia renovável.

Por oportuno, enquanto resolviam problemas conceituais próprios de uma tecnologia emergente, iam observando as técnicas que estavam sendo implantadas por meio de instalações experimentais. Tais observações resultaram em dados técnicos de procedência segura, reunidos em trabalhos que já foram consolidados e incorporados à literatura científica

de uso da energia solar.

A tecnologia solar para aquecimento de água possui um grande e eminente potencial. No entanto, para consolidar-se e ampliar sua participação na produção energética global, ela precisa primeiro vencer algumas barreiras. Portanto, é importante projetar usando uma ferramenta computacional para a otimização no dimensionamento e instalação de sistemas que sejam confiáveis e que apresentem o menor custo possível.

As leis implantadas pelas prefeituras estimulam o crescimento do mercado de coletores solares, mas, principalmente, incentivam a energia solar como fonte de calor do presente e do futuro do Brasil. Atualmente existem 30 leis aprovadas em diversas cidades como São Paulo, Marília (SP), Campo Grande (MS), Vitória (ES), Niterói (RJ), entre outras. Além disso, 94 projetos de leis tramitam em outras cidades do país que serão votadas ainda este ano (ABRAVA, 2009).

Segundo a Associação Brasileira das Empresas de Conservação de Energia (ABESCO), entre 2007 e 2008, o mercado de aquecimento solar cresceu 35%, sendo que neste último ano o crescimento atingiu 17%. O crescimento mundial, de acordo com o diretor do DASOL/ABRAVA, vem sustentando uma média anual nos últimos quatro anos de 20%. O Brasil conta com aproximadamente 4,5 milhões de metros quadrados de coletores solares instalados e no mundo já são mais de 200 milhões de metros quadrados de coletores solares (DASOL/ABRAVA, 2008).

O aquecimento solar proporciona economias diretas no bolso do consumidor. Sistemas SAS, se bem projetados e instalados, podem economizar mais de 80% da energia necessária para aquecer água, o que representa em uma família de classe média, cerca de 30% da conta de energia. No caso da família de baixa renda, o uso do aquecimento solar reduz em mais de 50% a conta de energia das famílias (DASOL/ABRAVA, 2008)

Em 2009, o governo brasileiro tornará obrigatória a etiqueta do Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO) para sistemas de aquecimento solar. Ou seja, todo e qualquer produtor desta tecnologia terá de se submeter aos ensaios de qualidade. Tal prática melhora o mercado, aumenta a qualidade dos projetos e instalações, permite uma adequada evolução tecnológica das fábricas, reduz o custo final do sistema, protege o consumidor e fortalece a cultura de massa quanto à energia solar.

## **Objetivos**

Esta dissertação tem como tema central o desenvolvimento de um software para o projeto otimizado de sistemas centralizados de aquecimento solar de água.

A seguir são apresentados os principais objetivos do software desenvolvido:

- 1) Calcular a disponibilidade da radiação solar para 567 localidades brasileiras e limítrofes com o território nacional. A radiação mensal será calculada em função da inclinação que maximiza a radiação média anual ou a radiação média dos meses de inverno, a critério do projetista;
- 2) Calcular o volume de armazenamento para suprimento da demanda média mensal de água quente;
- 3) Calcular o número de coletores planos em função da área coletora total e do fabricante e modelo previamente selecionado;
- 4) Calcular a fração solar para determinada localidade em função da configuração do sistema. As configurações serão de coletores conectados somente em paralelo ou em série e paralelo (associação mista de coletores). Neste último caso, serão admitidos até quatro coletores em série.
- 5) Realizar a análise financeira do investimento na implantação do SAS.

Esta dissertação poderá ser utilizada também como material de referência, voltado àqueles que desejam iniciar-se nesta área temática ou que necessitem de informações específicas sobre o dimensionamento, instalação e utilização de SAS.

## **Metodologia**

No capítulo 1, desenvolve-se a apresentação do trabalho. O contexto focado é o cenário energético brasileiro, elemento motivador que levou ao desenvolvimento do software *Helios-Chart* e a metodologia utilizada para alcançar os objetivos propostos.

No capítulo 2 apresenta-se um resumo da teoria envolvida na estimativa da radiação solar e nas formas de medi-la, assim como os tipos de configurações de instalações de SAS, discutindo-se as bases teóricas utilizadas para o desenvolvimento do *Helios-Chart* que, em função da estimativa da energia disponível no plano de inclinação dos coletores, calcula a área coletora, a fração solar, o volume do tanque de armazenamento e apresenta uma análise

econômica do investimento do SAS.

No capítulo 3 apresenta-se a metodologia utilizada para o desenvolvimento do software *Helios-Chart*.

No capítulo 4 apresenta-se a validação do software através de estudos comparativos com um exemplo do livro de Duffie e Beckman (1991) e um projeto elaborado por Kehl (2004), realizado na UFRGS onde foram usados os programas Termodim e Radasol, ambos desenvolvidos pela mesma Universidade.

No capítulo 5 concluí-se a dissertação através de deduções lógicas baseadas e fundamentadas no texto e decorrentes do trabalho. Por fim, faz-se as recomendações e sugestões resultantes que deverão ser objetos de trabalhos futuros.

No capítulo 6 apresentam-se as referências bibliográficas usadas no desenvolvimento desta dissertação.

## **A Energia no Brasil**

Segundo a Eletrobrás (BRASIL, 2004), no ano de 2004, o consumo de energia elétrica no setor residencial foi de 78,5 TWh, crescendo 3,0% em relação ao consumo de 2003 e atendendo a cerca de 46,8 milhões de consumidores. O setor residencial responde por 24% do consumo total de energia elétrica no país e, dentro deste setor, tem-se uma participação média de 26% do consumo total atribuído ao aquecimento de água, segundo a PROCEL (BRASIL, 2005). Portanto, conclui-se facilmente que apenas o aquecimento de água para banho em residências brasileiras é responsável por mais de 6,0% de todo o consumo nacional de energia elétrica.

Uma das alternativas para diminuir o consumo de energia elétrica para aquecimento de água, como citado acima, será popularizar o uso da energia solar para o aquecimento de água. O mercado mundial de aquecedores solares começou a crescer a partir da década de 70, mas expandiu significativamente durante a década de 90 e como resultado deste crescimento, houve um aumento substancial de aplicações, da qualidade e modelos disponíveis (ABRAVA, 2007). Sem levar em conta o Brasil, os principais países que empregam a tecnologia de aquecimento solar são China, Espanha, Israel, Grécia, Áustria, Austrália, Turquia, Estados Unidos, Japão, Dinamarca, Alemanha, etc. São 45 países ao todo que representam aproximadamente 59% da população global e cerca de 90 % do mercado de aquecimento solar mundial. (ABRAVA, 2008).



O Brasil possui a sétima maior área de coletores solares instalados do mundo: 3,1 milhões de metros quadrados com 84% no setor residencial, 15% no setor terciário (hotéis e serviços) e 1% no setor industrial (Porto, 2007).

De acordo com o Centro de Estudos de Energia Solar da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (Green Solar, PUC Minas), no ranking dos países com maior área de coletores instalados por habitante, o Brasil ocupa a 20ª colocação, com 1,27 metros quadrados por cem mil habitantes. Já Belo Horizonte, alcança um índice equivalente ao 3º melhor resultado global, com 56,6 metros quadrados por cem mil habitantes.

A taxa média de crescimento anual da área coletora instalada no Brasil é de 14%, enquanto no Canadá é de 50%, na Alemanha 39%, na França e Grécia, 34%.

As medidas de incentivo empregadas nesses países contemplam:

- Campanhas promocionais;
- Redução de impostos (IR, IPI);
- Financiamentos específicos facilitados;
- Depreciação acelerada para investimentos (indústrias e grandes consumidores);
- Prêmios (cidades solares, selos, e bônus);
- Dispositivos legais e regulatórios (códigos de obras, obrigações contratuais das concessionárias de energia;
- Capacitação de profissionais (instaladores, administradores prediais, universidades etc.).

O Brasil já domina a tecnologia e fabrica produtos adequados às condições do mercado nacional, contando com 140 indústrias das quais, 34 participam do Programa Brasileiro de Etiquetagem. Tais indústrias produzem 250 modelos, que representam 80% do mercado. A etiquetagem tornou-se compulsória a partir de 2007. A produção anual de coletores é de 760 mil m<sup>2</sup>.

Dentre as iniciativas nacionais pode-se destacar:

- Rede Cidades Solares (Vitae Civilis, ABRAVA, Prefeituras Municipais): reconhecimento ao empenho do município na disseminação do uso de aquecedores solares;
- O regulamento dos Programas de Eficiência Energética das Concessionárias permite a substituição de chuveiros elétricos por aquecedores solares em

residências de baixa renda;

- Projetos piloto em diversos estados do país;
- Projetos financiados pela Caixa Econômica Federal;
- Teses e dissertações financiadas pelas agências oficiais de fomento à pesquisa;
- O Grupo de Estudo em Energia (GREEN) da PUC Minas participa do Programa Brasileiro de Etiquetagem de Equipamentos Solares (PBE), resultante de um esforço conjunto do governo brasileiro, representado pelo Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO), e da Associação Brasileira de Refrigeração, Ar Condicionado, Ventilação e Aquecimento (ABRAVA.).

No entanto, existem as barreiras para o desenvolvimento do aquecimento solar de água, podendo-se destacar:

- Inexistência de uma única ação coordenada nacionalmente, que abranja fabricantes, concessionárias do setor elétrico, agências reguladoras, instituições financeiras e consumidores para a promoção do aquecimento solar;
- Resistência, por parte de algumas concessionárias, em promover novos projetos de substituição de chuveiros por sistemas de aquecimento solar;
- Independência dos municípios no estabelecimento dos requisitos a serem incluídos em seus códigos de obras;
- Inexistência de requisito para a instalação de aquecedores solares em edificações construídas por meio de créditos habitacionais.

No cenário brasileiro, torna-se cada vez mais evidente a necessidade de incentivo ao uso de energias renováveis complementares à atual geração hidrelétrica. Busca-se, dessa forma, garantir níveis de fornecimento de energia elétrica necessários ao crescimento populacional e universalização dos serviços de energia, ao crescimento econômico e à geração de novos postos de trabalho, com menor impacto ambiental possível. A energia solar térmica tem-se mostrado não apenas como solução técnica e economicamente viável para os problemas de redução do consumo de energia elétrica no setor residencial brasileiro e de modulação da curva de carga das concessionárias de energia, como também age sob a forma de mecanismo de desenvolvimento limpo para a nação.

No caso do aquecimento solar de água em substituição aos chuveiros elétricos, deve-se ressaltar ainda que, embora não ocorra geração de energia em seu sentido mais restrito, a

retirada dos aquecedores elétricos instantâneos (chuveiros elétricos) e a correspondente redução de sua participação no horário de pico de demanda das concessionárias de energia elétrica do país, pode ser interpretada como uma intensa e constante geração virtual de energia elétrica. Finalmente, vale lembrar que o Brasil se encontra em uma região entre trópicos e próximo à linha do equador privilegiando-se dos elevados índices solarimétricos que são determinantes para o crescente aproveitamento do aquecimento solar.

Segundo dados do CEPEL, 2006, a menor média anual de irradiação solar no Brasil (SC) é cerca de 30% acima da maior média de irradiação anual da Alemanha (Um dos líderes do mercado Europeu nesse segmento), conforme é mostrado na figura 1.

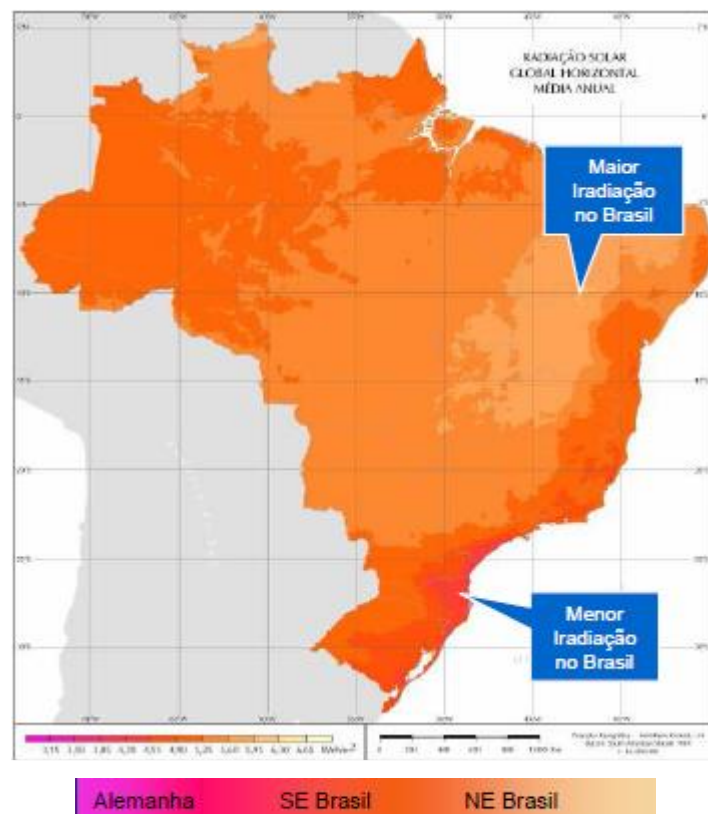


Figura 1 – Potencial energético brasileiro

([http://catedradogas.iee.usp.br/palestras/palestra\\_carlosfaria.pdf](http://catedradogas.iee.usp.br/palestras/palestra_carlosfaria.pdf))

Portanto, dadas as condições propícias do País ao aproveitamento de energia solar, o aquecimento de água por termoacumulação através do aproveitamento desta fonte renovável ocorreu de forma mais ou menos espontânea. Como a busca pela sustentabilidade ambiental das instalações de grande porte tornou-se inexorável, o aquecimento solar de água se mostra como uma das medidas mais viáveis técnica e economicamente no setor residencial e adequado para receber maiores incentivos.

## REFERÊNCIAS

1. ABNT – NB 128/1963 Instalações Prediais de Água Quente – (página 2; tabela I e II).
2. ABNT – NBR 5626 - Instalações Prediais de Água Fria – 1998.
3. ABNT – NBR 10184: Coletores solares planos para líquidos: determinação do rendimento térmico. Rio de Janeiro, 1988a.
4. ABNT – NBR 10185: Reservatórios térmicos para líquidos destinados a sistemas de energia solar: determinação de desempenho térmico. Rio de Janeiro, 1988b.
5. ABNT – NBR 12269: Execução de instalações de sistemas de energia solar que utilizam coletores solares planos para aquecimento de água. Rio de Janeiro, 1992.
6. ABNT – NBR 7198: Projeto e execução de instalações prediais de água quente. Rio de Janeiro, 1993.
7. Agência Nacional de Energia Elétrica. Manual para elaboração do programa anual de combate ao desperdício de energia elétrica. Disponível em: <<http://aneel.gov.br>>. Acesso em: 1 jan. 2005.
8. American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE). ASHRAE Handbook: heating, ventilating and air-conditioning systems and equipment. Atlanta, 1996. Cap. 33.
9. Arruda, L.B. Operação de sistemas de aquecimento solar de água com controle de vazões em coletores planos. 2004. 230 p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.
10. ASHRAE Handbook: heating, ventilating and air-conditioning applications. SI ed. Atlanta: ASHRAE, 1999. cap 32.
11. Associação Brasileira de Refrigeração, Ar Condicionado, Ventilação e Aquecimento

- (ABRAVA). Disponível em: <http://www.abrava.com.br>. Acesso em: 20 out. 2005.
12. Babu, K. S. & Satyamurty, V. V. Frequency distribution of daily clearness indices through generalized parameters. *Solar Energy*, 70, pp. 35-43 (1987).
  13. Bastos, L. E. G., Projeto de Redes Complexas de Coletores Solares, ENCIT, 1988.
  14. Bendt, P; Collares, M; Rabl, A. The frequency Distribution of Daily Insulation Values. *Solar Energy* 27, pp.1-5 (1981).
  15. Bliss, R. W., The derivations of several plate efficiency factors useful in the design of flat plate solar heat collectors , *Solar Energy*, 3, 55, 1959.
  16. Boyle, G. (Ed.). *Renewable Energy: Power a Sustainable Future*. Oxford: Open University, 1996.
  17. Camargo, I.M.T. *Noções básicas de engenharia econômica: aplicações no setor elétrico*. Brasília: FINATEC, 141 p., 1998.
  18. Campos, José Ruy Veloso. *Estudo de viabilidade para projeto hoteleiro*. Campinas, SP: Papirus, 2003.
  19. Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito (CRESESB/CEPEL). Brasília: 2003. [Homepage Institucional]. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/tutorial/solar/apstenergiasolar.htm>. Acesso em: 25 mar. 2006.
  20. CHURCHILL, S.W.; BERNSTEIN, M. A correlating equation for forced convection from gases and liquids to a circular cylinder in crossflow. *Journal of Heat Transfer*, v. 99, p.300-306, May 1977.
  21. Collares-Pereira, M., and A. Rabl, 1979: The average distribution of solar radiation correlations between diffuse and hemispherical and between daily and hourly insolation values. *Sol. Energy*, 22, 155–164.
  22. Colle, S.; Pereira, E. B. *Atlas de irradiação solar do Brasil – 1ª. versão para irradiação*

- global derivada de satélite e validada na superfície. Brasília: Instituto Nacional de Meteorologia, 1998.
23. Diffey, B.L. Sources and measurement of ultraviolet radiation. *Methods*, v.28, p.4-13, jun. 2002.
24. Duffie, J.A.; Beckman, W.A. *Solar engineering of thermal processes*. 2 Ed. New York: John Wiley & Sons, 1991.
25. Duffie, J.A.; Beckman, W. A.; Klein, S. A. *Solar Heating Design by the F-Chart Method*. New York: John Wiley & Sons, 1977.
26. Echer, E.; Souza, M. P.; Schuch, N. J. A lei de Beer aplicada na atmosfera terrestre. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 23, n. 3, Sep. 2001.
27. ELETROBRÁS. Departamento de Estudos Energéticos e Mercado (DEM). Boletim Anual. Sistema de Informações Estatísticas do Setor de Energia Elétrica (SIESE), 2002. Disponível em: <<http://www.eletrobras.gov.br>>. Acesso em: 3 mar. 2004.
28. Erbs, D.G., Klein, S.A., Duffie, J.A. Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly-average global radiation. *Solar Energy*, v.28, p.293-302, 1982.
29. Gerald, C.F., Weatley, P.O., *Applied Numerical Analysis*. Addison-Welwy Publ. Co., 579 p., 1994.
30. GREEN /SOLAR - <http://bhzgreensrv02.green.pucminas.br>
31. H. D. Hottel and A. Whillier, "Evaluation of flat plate collector performance," *Transactions of the Conference on the use of solar energy II, Thermal Processes*, 74-104, University of Arizona, Tempe, Ariz., 1955.
32. Hellstrom, B.; et. Al. The impact of optical and thermal properties on the performance of flat plate solar collectors. *Renewable Energy*, n. 28, p.331-344, 2003.

33. Hollands, K. G. T. & Huget, R. G. A probability density function for the clearness index, with applications. *Solar Energy*, 30, pp235-253, (1982).
34. Holman, J.P. – *Transferência de Calor*. Ed. McGraw-Hill, 1998.
35. Hottel, H. C.; Woertz, B. B. *Trans. ASME*, v.64, p.91, 1942.
36. Hottel, H.C., Whillier, A. 1955. Evaluation of flat-plate collector performance. *Trans. Of the Conference on the Use of Solar Energy -The Scientific Basis*, Vol. 2, University of Arizona, pp. 74-104. (Used in last reference)
37. Hottel, H.C., Woertz, B.B. 1942. Performance of flat-plate solar heat collectors. *Trans. ASME*, Vol. 64, p. 91.
38. Hudson, L.G.; Markell, J. *Solar technology*. Reston: Reston Publishing Company, 1985.
39. INCROPERA, F.P.; WITT, D.P. *Fundamentos de transferência de calor e massa*. 5ªEd. LTC Editora, 2003.
40. *Instalaciones solares térmicas. Manual para uso de instaladores, fabricantes, proyectistas y arquitectos, instituciones de enseñanza y de investigación*. Edita. Junta de Andalucía. SODEAN S.A. Consejería de Empleo y Desarrollo Tecnológico.
41. Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO). Disponível em: <<http://www.inmetro.com.br>>. Acesso em Out. 2005
42. Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial. Programa Brasileiro de Etiquetagem: referências de etiquetagem - Resp/006-SOL - sistemas e equipamentos para aquecimento solar de água regulamento específico para uso da ENCE – 1997. Disponível em <[www.inmetro.gov.br](http://www.inmetro.gov.br)> acessado em 07 10/11/2005
43. Iqbal, M. *An introduction to solar radiation*. New York: Academic Press, 1983. 390 p.

44. Jiménez, J. I.; Castro, Y. Solar radiation on sloping surfaces with different orientations in Granada, Spain. *Solar Energy*, v.28, p. 257-262, 1982.
45. Jin, J. et al Estimation of daily diffuse solar radiation in China. *Renewable Energy*, v. 29, p. 1537 - 1548, 2004.
46. Klein, S. A., and J. C. Theilacker, 1981: An algorithm for calculating monthly-average radiation on inclined surfaces. *J. Sol. Energy ASME*, 103, 29–36.
47. Klein, S.A. 1973. The effects of thermal capacitance upon flat-plate solar collectors. M.S Thesis, Dept. of Chemical Engineering, University of Wisconsin.
48. Klein, S.A. 1973. TRNSYS - A transient simulation program. Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison. Rept. 3.
49. Klein, S.A. 1976. A design procedure for solar heating systems. Ph.D. Thesis, University of Wisconsin-Madison.
50. Klein, S.A., Beckman, W.A. 1979. A general design method for closed-loop solar energy systems. *Solar Energy*, Vol. 22, No. 3, pp. 269-282.
51. Klein, S.A., Beckman, W.A. 1983. *F-Chart* Solar Energy System Analysis: Version 5. FChart Software, 4406 Fox Bluff Road, Middleton, Wisc. 53562, [www.fchart.com](http://www.fchart.com).
52. Klein, S.A., Beckman, W.A. 1993. *F-Chart* Solar Energy System Analysis: Version 6.17W. *F-Chart* Software, 4406 Fox Bluff Road, Middleton, Wisc. 53562, [www.fchart.com](http://www.fchart.com).
53. Klein, S.A., Beckman, W.A., Duffie, J.A. 1976. A design procedure for solar heating systems. *Solar Energy*, Vol. 18, No. 2, pp. 113-127.
54. Klein, S.A., Beckman, W.A., Duffie, J.A. 1976a. A Design Procedure for Solar Heating Systems. *Solar Energy*, Vol. 18, pp. 113-127.



55. KREITH, F. Princípios da transmissão de calor. Cord. Trad. Remi Benedito Silva. São Paulo, Edgard Blucher, 1973.
56. Lima, J. B. A. Otimização de sistema de aquecimento solar de água em edificações residenciais unifamiliares utilizando o programa TRNSYS. 2003. 123p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.
57. Liu, B. Y. H., Jordan, R.C. 1963. The long-term average performance of flat-plate solar energy collectors: With design data for the U.S., its outlying possessions and Canada. Solar Energy, Vol. 7, No. 2, pp. 53-74.
58. Magnoli, D.; Scalzaretto, R. Geografia, espaço, cultura e cidadania. São Paulo: Moderna, 1998. v.1.
59. Ministério da Ciência e Tecnologia. Observatório Nacional. Glossário. Brasília, 2005. Disponível em: <http://www.on.br/glossario/alfabeto/i/i.html>. Acesso em: 02 abr. 2006.
60. NAKAI, S. OKAZAKI, T. Heat transfer from a horizontal circular wire at small Reynolds and Grashof numbers. International Journal Of Heat And Mass Transfer, v. 18, p. 387-396, 1975.
61. Noam, Lior, Thermal Theory and Modeling of Solar Collectors, Chapt. 4 in Solar Collectors, Energy Storage and Materials, Editor F. deWinter, pp. 99-182, MIT Press (1991).
62. 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>. Acesso em: 02 abr. 2006.
63. Oliveira, S. H. F. Dimensionamento de sistemas fotovoltaicos autônomos: ênfase na eletrificação de residências de baixo consumo. 1997. 240 f. Dissertação (Mestrado em Energia) – Interunidades (EP, FEA, IEE, IF), Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

64. Oonk, R.L., Jones, D.E. and Cole-Appel, B.E., Calculation of performance of N collectors in series from test data on a single collector, *Solar Energy*, Vol. 23, N<sup>o</sup>.5, 1979, pp. 535
65. Pereira, E.B.; Martins, F. R.; Luna, S. e R  ther R., *Atlas Brasileiro de Energia Solar / – São José dos Campos, IMPE 2006. il. 60p.*
66. Porto, Laura, *Energia Solar no Brasil – João Pessoa, 2007.*
67. RADIASOL, versão 2.1. Laboratório de Energia Solar – Grupo de Estudos Térmicos e Energéticos (GESTE), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), 2001.
68. Remund, J.; Salvisberg, E.; Kunz, S. On the generation of hourly short wave radiation data on tilted surfaces. *Solar Energy*, V. 62, N. 5, P. 331-344,1998.
69. Santos, E. O. , *Administra  o financeira da pequena e média empresa. São Paulo, SP: Atlas, 2001.*
70. Saunier, G.Y., Reddy, T.A. and Kumar, S., A monthly probability distribution function of daily global irradiation values appropriate for both tropical and temperate locations. *Solar Energy* 38, 169-177, 1987.
71. Saraiva, Ant  nio Carlos Varela (2006). *Estudo Espectral da Variabilidade do Raio Solar. INPE – São José dos Campos.*
72. SCHULTZ, W.W.; GOLDSCHMIDT, V.W. Distribution efficiency and characteristics of start-up and shutdown of flow in hot water distribution lines. In: *Transactions of ASHRAE semiannual meeting*, v. 89, Part 1B, p. 42-60, 1983.
73. Souka, A. F., & Safwat, H.H. (1966). Optimum orientations for the double exposure flat-plate collector and its reflectors. *Solar Energy* Vol. 10, pp 170-174.
74. Souza, Acilon Batista de. *Projeto de investimentos de capital: elabora  o, análise, tomada de decisão. São Paulo, SP : Atlas, 2003.*

75. Tamborianski, V. M.; Lima, J.B.A.; IOSHIMOTO, E. Análise de custos de aquecimento de água em um conjunto habitacional. In: FENDRICK, R. Tecnologias na Construção Civil e Matemática Aplicada. Curitiba, Editora Universitária Champagnat, 2002. p.45-53.
76. Tiba, C. Atlas Solarimétrico do Brasil – banco de dados terrestres. Recife: Editora Universitária da UFPE, 2000.
77. Whillier, A. 1953a. The Utilization of Solar Energy in South Africa. Journal of South Africa Institute of Mechanical Engineers, Vol. 2, No. 9, pp. 260-266 (April).
78. Whillier, A. 1953b. Solar energy collection and its utilization for house heating. Ph.D. Dissertation, Dept. of Mechanical Engineering, MIT.
79. Whillier, A. Prediction of Performance of Solar Collectors. In Applications of Solar Energy for Heating and Cooling of Buildings. ASHRAE 1977, New York, 1977.